



ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

85  
Años  
1936 - 2021

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

ACADEMIA COLOMBIANA  
DE CIENCIAS EXACTAS,  
FÍSICAS Y NATURALES

Vol. 46 • Número 180 • Págs. 611- 856 • Julio - Septiembre de 2022 • Bogotá - Colombia





ACADEMIA COLOMBIANA  
DE CIENCIAS EXACTAS,  
FÍSICAS Y NATURALES

ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

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

Vol. 46 • Número 180 • Págs. 611-856 • Julio - Septiembre de 2022 • Bogotá - Colombia

## Comité editorial

### Editora

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

**Asistente editorial** Carolina Acosta

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

### Editores asociados

#### Ciencias Biomédicas

- Luis Fernando García, M.D., M. Sc.  
Profesor emérito, Universidad de Antioquia,  
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
- Gloria Patricia Cardona Gómez, Ph. D.  
Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia
- Helena Groot de Restrepo, M.Sc.  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

#### Ciencias del Comportamiento

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

#### Ciencias Físicas

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

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

### Ciencias Naturales

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

### Ciencias Químicas

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

### Ciencias de la tierra

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

### Matemáticas

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

## Comité científico internacional

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

## Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana  
Agris  
Dialnet  
EBSCO  
Historia Mathematica

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

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

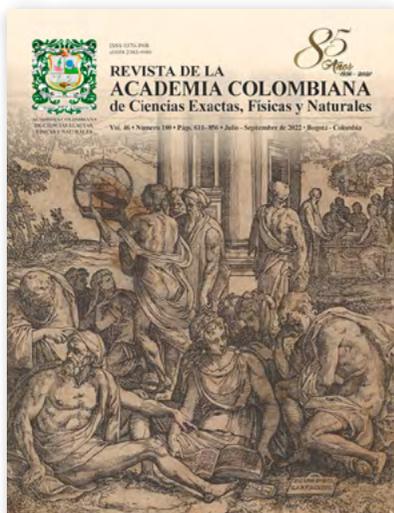
Publindex, Minciencias (convocatoria 910 de 2021), categoría C

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

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

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

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



## Nuestra portada

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

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

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

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

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



ACADEMIA COLOMBIANA  
DE CIENCIAS EXACTAS,  
FÍSICAS Y NATURALES

ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

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

Vol. 46 • Número 180 • Págs. 611-856 • Julio - Septiembre de 2022 • Bogotá - Colombia

## Contenido - Contents

**Ciencias  
Físicas**

Physical Sciences

### Artículo original

#### **Efecto Hall cristalino en el antiferromagnético colineal no convencional NiF<sub>2</sub>**

Crystal Hall effect in an unconventional collinear antiferromagnet NiF<sub>2</sub>

*Rafael González-Hernández, Roberto González, Libor Šmejkal* ..... 617

### Artículo original

#### **Rare-earth ferrobismuthites: ferromagnetic ceramic semiconductors with applicability in spintronic devices**

Ferrobismutitas de tierra rara: cerámicos ferromagnéticos semiconductores con aplicabilidad en dispositivos espintrónicos

*Jairo Roa-Rojas, Javier A. Cuervo Farfán, Crispulo E. Deluque Toro, David A. Landínez Téllez, Carlos A. Parra Vargas* ..... 628

### Opinión

#### **Sinergia en las ciencias básicas para la solución de problemas de ingeniería**

Synergy in the basic sciences for the solution of engineering problems

*Horacio Torres-Sánchez* ..... 646

### Artículo original

#### **Exponentes críticos estáticos, efectos de anisotropía, Hall y magneto-calórico, e interacciones magnéticas en cintas de aleaciones basadas en FeCr, FeCo y MnFe**

Static critical exponents, anisotropy, Hall and magneto-caloric effects, and magnetic interactions in FeCr, FeCo, and MnFe-based alloy ribbons

*Andrés Rosales-Rivera* ..... 656

**Ciencias  
Naturales**

Natural Sciences

### Artículo original

#### **Evaluación de residuos orgánicos generados en plazas de mercado para la producción de enzimas bacterianas**

Evaluation of organic waste from marketplaces to produce bacterial enzymes

*Etna Milena Sánchez-Castelblanco, Juan Pablo Heredia-Martín* ..... 675

Ensayo

**En el bicentenario de Gregor Mendel: una conmemoración de su herencia y herederos**

On Gregor Mendel's Bicentenary: A Commemoration of His Heritage and Heirs

*Alberto Gómez Gutiérrez, PhD FLS* ..... 685

Original article

**Range extension and distribution update of *Hsunycteris cadenai* (Chiroptera: Phyllostomidae)**

Extensión del rango y mapa de distribución actualizado de *Hsunycteris cadenai*  
(Chiroptera: Phyllostomidae)

*Leison Palacios-Mosquera, Víctor Danilo Palacios-Mayoral, Yucely del Carmen Copete-Mosquera,  
Alex Mauricio Jimenez-Ortega, Hugo Mantilla-Meluk, Paúl M. Velazco* ..... 690

Artículo original

**Caracterización morfológica de los estadios embrionarios de la raya dulceacuícola  
*Potamotrygon magdalenae* (Elasmobranchii: Potamotrygonidae)**

Morphological characterization of the embryony stages of the freshwater stingray  
*Potamotrygon magdalenae* (Elasmobranchii: Potamotrygonidae)

*Sergio Antonio Lizcano-Gutiérrez, Martha Patricia Ramírez-Pinilla* ..... 697

Artículo original

**Reacción y rendimiento de microinjertos de tomate (*Solanum* spp.) inoculados con  
*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen causante del  
marchitamiento vascular**

Reaction and yield of tomato micrografts (*Solanum* spp.) inoculated with vascular wilt-causing  
*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen

*Dora Janeth García-Jaramillo, Silvia Patricia López-Zapata, Santiago Bustamante-Granada,  
Walter Ricardo López, Jairo Castaño-Zapata, Nelson Ceballos-Aguirre* ..... 714

Artículo original

**Diversidad taxonómica y patrones de diversidad de la flora en humedales de la costa peruana**

Taxonomic diversity and patterns of flora diversity in coastal wetlands of Perú

*Sergio Gonzáles, Héctor Aponte* ..... 730

Artículo original

**Estudios monográficos sobre Agavaceae de Suramérica. Primer registro de *Furcraea foetida*  
para las floras de Ecuador y Perú**

Monographic studies in South American Agavaceae. First report of *Furcraea foetida* for  
Ecuadorian and Peruvian floras

*Diego Giraldo-Cañas* ..... 742

Original article

**New records of lichen genera and species for Colombia**

Nuevos registros de géneros y especies de líquenes para Colombia

*Edier Soto Medina, André Aptroot, Robert Lücking* ..... 751

Artículo original

**El avance de la línea de costa de las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande y  
la construcción de la Escollera en 1758 en Cartagena de Indias**

The advance of the coastline of the peninsulas of Bocagrande and Castillogrande and  
the construction of the Breakwater in 1758 in Cartagena de Indias

*Carlos Alberto Andrade-Amaya, Richard Guzmán-Martínez, Diana María Quintana-Saavedra* ..... 758

Artículo original

**Implicaciones metodológicas e inconsistencias de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático de Colombia**

Methodological implications and inconsistencies of Colombia's Third National Communication on Climate Change

*Paola A. Arias, Laura D. Villegas, Oscar J. Mesa, José D. Pabón, Jacobo Arango, Santiago Arango-Aramburo, Dolores Armenteras, Lina Berrouet, Rolando Barahona, Janet Barco, Yuley Cardona, Yesid Carvajal-Escobar, Lina I. Ceballos-Bonilla, Wilmar L. Cerón, Jaime H. Escobar, Catalina González, Isabel C. Hoyos, Natalia Hoyos, Carlos Jaramillo, Giovanni Jiménez-Sánchez, J. Alejandro Martínez, Germán Poveda, Benjamín Quesada, Estela Quintero-Vallejo, Ángela M. Rendón, Daniel Ruiz-Carrascal, Alejandro Salazar, Juan F. Salazar, Adriana Sánchez, Sara C. Vieira, Juan Camilo Villegas, Clara Villegas-Palacio, Manuel D. Zuluaga* .....

769

Artículo original

**El huracán que pasó sobre la Isla de San Andrés en 1911**

The hurricane that affected San Andrés Island in 1911

Juan C. Ortiz, Mario Conde .....

795

Club de revistas/Journal Club

**Un microorganismo que no lo es: Candidatus Thiomargarita magnifica**

A microorganism that is not: Candidatus Thiomargarita magnifica

*María Mercedes Zambrano* .....

807

**Las evidencias que sitúan el origen del SARS-CoV-2 en el Mercado Mayoritario de Mariscos de Huanan, Wuhan**

The evidence that places the origin of SARS-CoV-2 in the Majority Seafood Market of Huanan, Wuhan

*Juana Ángel, Manuel Franco* .....

811

**La paleomicrobiología molecular permite dilucidar el origen de la plaga**

Molecular paleomicrobiology allows to elucidate the origin of plague

*Luis F. García* .....

815

**Procesos tempranos de las cortezas planetarias revelados por el sitio de eyección del meteorito marciano más antiguo**

Early planetary crustal processes revealed by the oldest Martian meteorite ejection site

*José Gregorio Portilla Barbosa* .....

819

Opinión/ Opinion

**James Lovelock: la visión de un científico excepcional**

James Lovelock: the vision of an exceptional scientist

**Peter Paul Bunyard, FLS** .....

823

Vida de la Academia

**La ciencia, un antídoto contra los conflictos sociales sin fin**

Science, an antidote to endless social conflicts

*César Pulgarín* .....

832

**Un Plan Regional para Educación, Ciencia y Tecnología, Reflexiones de un neo-académico de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.**

A Regional Plan for Education, Science and Technology, Reflections of a neo-academic of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences

*Galileo Violini* .....

834

Enfoque y alcance

Focus and Scope .....

843

Artículo original

## Efecto Hall cristalino en el antiferromagnético colineal no convencional NiF<sub>2</sub>

### Crystal Hall effect in an unconventional collinear antiferromagnet NiF<sub>2</sub>

● Rafael González-Hernández<sup>1,\*</sup>, ● Roberto González<sup>1</sup>, ● Libor Šmejkal<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física y Geociencias, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.

<sup>2</sup> Institut für Physik, Johannes Gutenberg Universität Mainz, D-55099 Mainz, Germany

<sup>2</sup> Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Cukrovarnická 10, 162 00 Praha 6 Czech Republic

Artículo de posesión para admisión de Rafael González-Hernández, como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

## Resumen

A lo largo de un siglo, la corriente eléctrica transversal, sin disipación de energía, que genera el efecto Hall continúan desempeñando un papel central en la investigación de materia condensada por su intrigante naturaleza cuántica, relativista y topológica. El efecto Hall anómalo requiere la ruptura espontánea de la simetría de reversión temporal, lo cual es atribuido al ordenamiento magnético de los espines dentro del material cristalino (como es el caso del hierro). Recientemente, se identificó la presencia del efecto Hall anómalo, llamado efecto Hall cristalino, en ciertos materiales antiferromagnéticos no convencionales, donde la ruptura de simetría de inversión temporal es causada por la disposición de los átomos no magnéticos en estructura cristalina antiferromagnética. En el presente trabajo se estudia el efecto Hall cristalino en el fluoruro de níquel (NiF<sub>2</sub>) por medio de un análisis de simetría y cálculos de primeros principios. Se encuentra que la conductividad Hall anómala para el NiF<sub>2</sub> podría alcanzar valores cercanos a 700 S/cm. Esta respuesta Hall se obtiene para el eje fácil de magnetización del material; esto no se presenta en otros cristales tipo rutilo estudiados recientemente donde el vector antiferromagnético tiene que reorientarse aplicando un campo externo. Además, se muestra el origen en el espacio recíproco de la conductividad Hall anómala y la manera en que se puede controlar mediante la rotación del vector de Néel, el cual da cuenta del ordenamiento antiferromagnético del material. Nuestros resultados indican que el NiF<sub>2</sub> podría ser un elemento clave en el diseño de futuros dispositivos espintrónicos basados en materiales antiferromagnéticos no convencionales.

**Palabras clave:** Simulación de materiales; Efecto Hall cristalino; Materiales antiferromagnéticos; NiF<sub>2</sub>.

## Abstract

Dissipation less transversal Hall currents are intensively researched for more than one century due to their intriguing quantum, relativistic, and topological origin. The spontaneous Hall effect requires time-reversal symmetry breaking, which is induced by the spin ordering and traditionally was attributed to the magnetization in ferromagnetic materials such as iron. Recently, spontaneous, so-called crystal, Hall effect was identified, which is induced by unconventional magnetism arising from the interplay of collinear antiferromagnetism and nonmagnetic crystal structure. Here we study this crystal Hall effect in insulating NiF<sub>2</sub> crystal from the symmetry analysis and first-principle calculations in dependence on elec-

**Citación:** González-Hernández R, González R, Šmejkal L. Efecto Hall cristalino en el antiferromagnético colineal no convencional NiF<sub>2</sub>. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):617-627, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1643>

**Editor:** Jairo Roa Rojas

**\*Correspondencia:**

Rafael González-Hernández;  
rafaelgonzalezgh@gmail.com

**Recibido:** 12 de marzo de 2022

**Aceptado:** 14 de junio de 2022

**Publicado en línea:** 6 de julio de 2022



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

tron filling, and we predict spontaneous Hall response can be as large as 700 S/cm. In NiF<sub>2</sub>, the antiferromagnetic vector is oriented along the crystal axis conducive for the Hall response. This property is elusive in other recently studied rutile crystals where the antiferromagnetic vector had to be reoriented by the applied field. Additionally, we analyze the momentum space resolved contribution to the spontaneous Hall conductivity and the Neel vector rotation dependence of the effect. Our calculations show that the NiF<sub>2</sub> can be useful element in future spintronics based on unconventional antiferromagnets.

**Keywords:** Materials simulation, Crystal Hall effect; Antiferromagnetic materials; NiF<sub>2</sub>

## Introduction

Si se aplica un voltaje a un conductor convencional como el cobre, la corriente fluye en la dirección dada por el campo eléctrico. Y si además se somete a un campo magnético externo, la corriente eléctrica se desvía perpendicularmente. Esta componente adicional se conoce como corriente Hall, en honor al físico Prof. Edwin Hall quien describió por primera vez este fenómeno en 1879 (Hall, 1879). Este efecto se ha utilizado para caracterizar materiales semiconductores, los cuales dieron forma a la electrónica del silicio, base actual de los computadores y teléfonos inteligentes. El profesor Hall también investigó el comportamiento de esta corriente en materiales con una magnetización interna (materiales ferromagnéticos), como el hierro, encontrando que también se produce tal desviación de la corriente esta vez sin necesidad de un campo magnético externo, a lo que llamo efecto Hall anómalo (Hall, 1879). Fenómeno que se ha convertido en una de las piedras angulares para el desarrollo de la magnetoelectrónica, un campo amplio que se extiende desde las tecnologías de sensores hasta las memorias magnéticas. Por otro lado, el descubrimiento de los materiales antiferromagnéticos (AFM), que son mucho más comunes en la naturaleza que los ferromagnéticos, se atribuye al profesor Louis Néel (Premio nobel de Física en 1970 por esta contribución) (Neel, 1970). En estos materiales, los momentos magnéticos de los átomos se orientan en direcciones completamente opuestas. Por lo tanto, los efectos observados en los ferromagnetos se anulan entre sí, incluida la corriente de Hall anómala. Así, los antiferromagnetos en el exterior se comportan como conductores no magnéticos habituales, por tanto, no llaman la atención para aplicaciones en magnetoelectrónica, como el mismo Prof. Néel mencionó en su lectura del premio nobel (Neel, 1970).

El efecto Hall anómalo es un fenómeno que no debería presentarse en materiales antiferromagnéticos o no magnéticos, y ser solo característico de materiales con campos magnéticos internos, como los ferromagnetos (o imanes comunes) (Nagaosa, Sinova, Onoda, MacDonald, & Ong, 2010). Sin embargo, la combinación de factores como la simetría de los átomos no magnéticos dentro de un cristal antiferromagnético reevalúa esta teoría y produce novedosos efectos, como se demostró en el reciente trabajo de Šmejkal *et al* (Šmejkal, González-Hernández, Jungwirth, & Sinova, 2020). En este, se explica la aparición de un efecto Hall anómalo en ciertos materiales antiferromagnéticos colineales, el cual se denomina efecto Hall cristalino. Este fenómeno es el resultado de la combinación de elementos antiferromagnéticos con átomos no magnéticos, que contrario al conocimiento actual, produce una corriente de Hall anómala nunca observada previamente en materiales antiferromagnéticos o cristales no magnéticos independientemente.

La combinación de elementos antiferromagnéticos y no magnéticos ocurre con mucha frecuencia en la naturaleza, como es el caso de los difluoruros de metales de transición, como el MnF<sub>2</sub>, FeF<sub>2</sub> y NiF<sub>2</sub> (Corrêa & Výborný, 2018). En particular, el NiF<sub>2</sub> ha llamado la atención de la comunidad científica por tener un ordenamiento antiferromagnético colineal a baja temperatura con una posible señal Hall para el caso donde se inclinan sus momentos magnéticos en la configuración AFM; según el modelo teórico reportado por Chen *et al* (Li, MacDonald, & Chen, 2019). En el presente trabajo, se muestra teórica y computacionalmente que el NiF<sub>2</sub> efectivamente presenta una señal Hall anómala (debida al efecto

Hall cristalino) además de un desdoblamiento de espines en su estructura de bandas. Los resultados del presente estudio contribuyen al campo de la espintrónica antiferromagnética (Baltz et al., 2018), la cual se espera que en futuro revierta creciente demanda de componentes pesados y raros en la magnetoelectrónica convencional, y en cambio, dirigir el interés hacia materiales más abundantes y sostenibles (como el níquel y flúor). Además, la corriente de Hall exhibe una baja disipación de energía eléctrica, posicionándolo estratégicamente como una solución al hecho que las tecnologías de la información se están convirtiendo en la mayor fuente de consumo energético a nivel mundial. Dado que estos materiales no presentan un campo magnético externo, son magnéticamente invisibles, se pueden empaquetar de manera muy compacta y permitir un alto grado de miniaturización para aplicaciones en nanoelectrónica moderna. Estos materiales, previamente pasados por alto, se destacan también en términos de rapidez de cálculo, ya que permiten velocidades de operación mucho más altas que los materiales ferromagnéticos, por lo que las frecuencias de los componentes electrónicos podrían cambiarse del rango de Gigahercios al rango de Terahercios. Por lo que este descubrimiento se posiciona como uno de los más importantes en el nuevo y creciente campo de la magnetoelectrónica antiferromagnética, conocido también como espintrónica antiferromagnética (Šmejkal, Mokrousov, Yan, & MacDonald, 2018).

## Metodología

En el presente trabajo se realizaron cálculos de primeros principios (o *ab-initio*) utilizando los fundamentos de la teoría funcional de la densidad (DFT) (Kohn & Sham, 1965) en el esquema de la aproximación del método del pseudopotencial y ondas planas (Blöchl, 1994). Los efectos de intercambio y correlación fueron tratados con la aproximación de gradiente generalizado (GGA) en la parametrización de Perdew, Burke y Ernzerhof (PBE) (Perdew, Burke, & Ernzerhof, 1996), tal como está implementado en el código computacional vienna *ab-initio* software package (VASP) (Kresse & Hafner, 1993; Kresse & Furthmüller, 1996). La función de onda de electrones se expandió en ondas planas hasta una energía de corte de 500 eV y se utilizó una malla de puntos  $k$  de  $12 \times 12 \times 16$  para describir la primera zona de Brillouin. La interacción de Hubbard para los estados  $d$ -Ni se incluyó con un parámetro  $U$  de 2.0 eV (Corrêa & Vyborny, 2018).

Se utilizó la teoría de la respuesta lineal para obtener el tensor de conductividad eléctrica. Para evaluar la fórmula de Kubo, se empleó el hamiltoniano en el modelo de enlace fuerte  $\hat{H}(\mathbf{k})$  construido en la base de las funciones de Wannier maximamente localizadas (MLWF) calculadas a partir de funciones de Bloch del método DFT (Marzari, Mostofi, Yates, Souza, & Vanderbilt, 2012; Mostofi et al., 2014). En este formalismo, las componentes de la conductividad Hall se determinan con una integración de la curvatura de Berry ( $\Omega^z(\mathbf{k})$ ) en la primera zona de Brillouin (ZB), usando una malla de puntos  $k$  de  $320 \times 320 \times 320$  (Wu, Zhang, Song, Troyer, & Soluyanov, 2018):

$$\sigma_{xy} = -\frac{e^2}{\hbar} \int_{ZB} \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \Omega^z(\mathbf{k}) \quad (1)$$

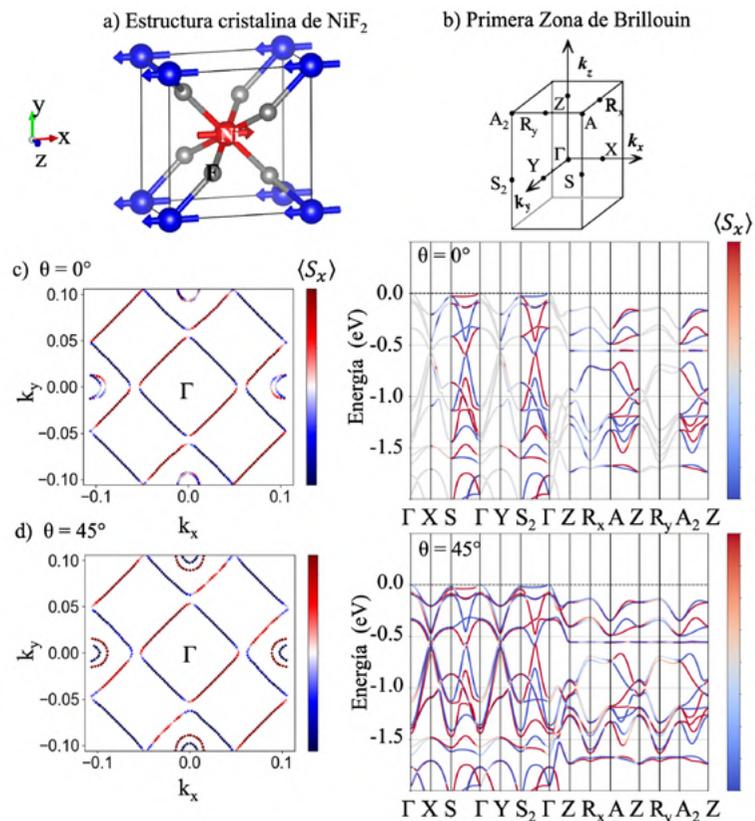
Con la curvatura de Berry escrita como (Xiao, Chang, & Niu, 2010):

$$\Omega^z(\mathbf{k}) = -2\hbar \text{Im} \sum_{n \neq m} \frac{\langle u_{nk} | \hat{v}_x | u_{mk} \rangle \langle u_{nk} | \hat{v}_y | u_{mk} \rangle}{(\epsilon_{nk} - \epsilon_{mk})^2} \quad (2)$$

Donde  $\hbar \hat{v}_i = \partial \hat{H}(\mathbf{k}) / \partial k_i$  es la componente  $i$  del operador de velocidad, y  $u_{mk}$  y  $\epsilon_{nk}$  son los estados propios y los valores propios del hamiltoniano de enlace fuerte  $\hat{H}(\mathbf{k})$ , respectivamente.

## Resultados y discusión

El fluoruro de níquel ( $\text{NiF}_2$ ) es un material antiferromagnético que crece en una estructura cristalina tipo rutilo, con 2 átomos de Ni y 4 de F en la celda unitaria, como se muestra en la figura 1a. Se observa una estructura tetragonal con parámetros de red optimizados de 4.71 y 3.12 Å, los cuales son muy cercanos a los reportados experimentalmente (Stout & Reed, 1954). En esta figura se muestra la configuración antiferromagnética con momentos magnéticos alineados antiparalelamente y compensados (configuración AFM) en la dirección [100], la cual denominaremos configuración  $0^\circ$ , y corresponde a la fase más estable del material. En la figura 1b se muestra la primera zona de Brillouin para la celda unitaria del  $\text{NiF}_2$ , la cual también es una celda tetragonal. Se indican además los puntos de alta simetría que se emplearán en el cálculo de la relación de dispersión electrónica o estructura de bandas.



**Figura 1.** a) Estructura cristalina tipo rutilo y b) primera zona de Brillouin para el material  $\text{NiF}_2$ . Superficie de energía constante ( $E - E_{\text{Fermi}} = -0.2 \text{ eV}$ ) en plano  $k_z = 0$  y estructura de bandas para el caso del vector de Néel orientado en la c) dirección [100] (configuración  $0^\circ$ ) y d) dirección [110] (configuración  $45^\circ$ ) incluida la interacción SOC. Se presenta la proyección de la componente  $S_x$  del espín en la superficie de energía constante y en las bandas de energía. Las gráficas fueron realizadas usando el código pyprocar (Herath et al., 2020) y la energía de Fermi se ha ajustado a cero en el borde superior de la banda de valencia.

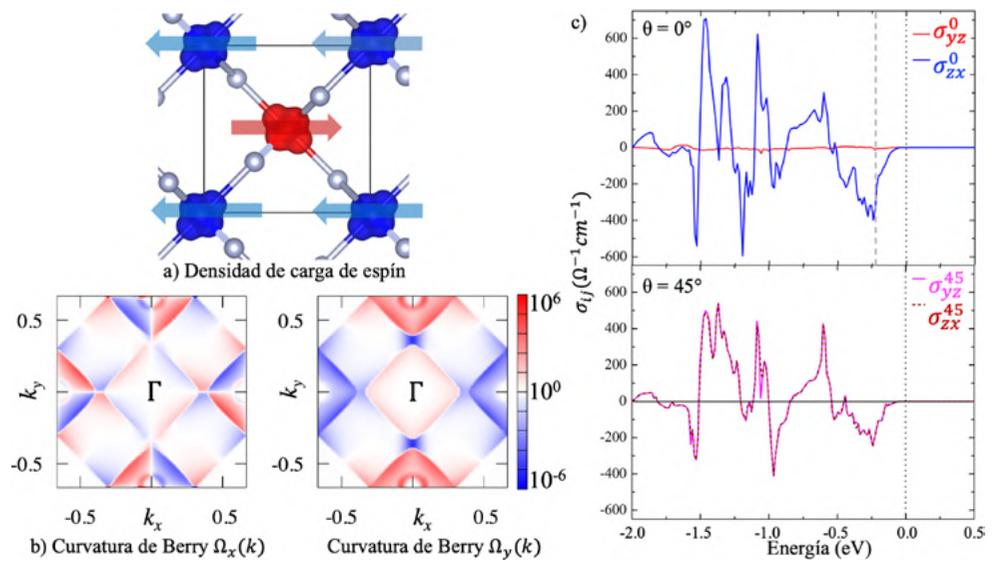
En la figura 1c podemos ver la estructura de bandas electrónica y la proyección de la componente  $x$  del espín  $S_x$  del átomo de Ni sobre la estructura de  $\text{NiF}_2$ , en el caso de la orientación  $0^\circ$  (vector de Néel paralelo al eje  $x$ ). De esta figura se nota que el material es un compuesto aislante con el máximo de la banda de valencia en el punto  $\Gamma$ . El material presenta

una brecha de energía de aproximadamente 2.75eV, la cual es cercana a la reportada por Cinthia y Karel (**Corrêa & Vybourný**, 2018). Vale la pena resaltar que aunque el momento magnético total de la celda es nulo, se presenta un desdoblamiento de las componentes del espín (+S<sub>x</sub> y -S<sub>x</sub>) en ciertas direcciones de alta simetría, aun sin tener en cuenta la interacción espín-órbita (SOC) dentro de los cálculos. El desdoblamiento del espín en un camino de alta simetría (por ejemplo  $\Gamma$ -S) es compensado por el desdoblamiento opuesto del espín en un camino equivalente (por ejemplo  $\Gamma$ -S<sub>2</sub>) como se muestra en la figura 1c y 1d. El desdoblamiento de espín es notorio cuando se calcula la proyección de espín sobre la superficie de energía constantes en el plano  $k_z=0$  (ver figura 1). Este fenómeno se ha explicado desde el punto de vista de las simetrías magnéticas y de la interacción de intercambio que estabiliza el estado AFM, lo que produce un novedoso estado magnético en ciertos materiales AFM no convencionales, denominado altermagnetismo (**Šmejkal, Sinova, & Jungwirth**, 2021). Se observa que los desdoblamientos de las componentes de espín en este material son cercanos a  $\sim 0.5$ eV, y son considerables en los caminos de alta simetría  $\Gamma$ -S y A-Z. Este desdoblamiento es mucho más grande que el presentado en el efecto Rashba, donde los desdoblamientos de espín son proporcionales a la interacción SOC y son del orden de décimas de meV (**Manchon, Koo, Nitta, Frolov, & Duine**, 2015). Este es un resultado fundamental para las posibles aplicaciones de estos materiales en el campo de la espintrónica.

Por otro lado, en la figura 1d se presenta la estructura de banda para la configuración AFM cuando el vector de Néel rota 45° respecto al eje  $x$ . Se nota un ligero cambio de la estructura electrónica cerca del nivel de Fermi cuando el vector de Néel rota a la dirección [110] en el plano  $xy$  (configuración 45°). Se observa un leve desdoblamiento del espín en otras direcciones de alta simetría del material adicionales al caso 0°. Sin embargo, la forma y posición energética de las bandas no se altera considerablemente, lo que indica que las características electrónicas son dominadas por la configuración magnética sin la interacción SOC, como ocurre en otros materiales antiferromagnéticos no convencionales (**Šmejkal et al.**, 2021).

Para estudiar el origen del efecto Hall cristalino en el NiF<sub>2</sub> se calculó la densidad de carga de espín ( $\rho_{up}(\mathbf{r})-\rho_{dn}(\mathbf{r})$ ) en el espacio real como se muestra en la figura 2a. Esta densidad es intensa y antiparalela alrededor de los dos átomos de Ni, los cuales generan el antiferromagnetismo dentro de la estructura. Además, se observa una densidad de espín anisotrópica alrededor de los átomos de Ni debido a la presencia del F en la estructura de rutilo. Este comportamiento desaparece al remover los átomos de F, y es parte del mecanismo que genera la ruptura de simetría de reversión temporal en el compuesto de NiF<sub>2</sub> y genera el conocido efecto Hall cristalino (**Šmejkal et al.**, 2020). La anisotropía en la densidad de carga de espín no es convencional en todos los antiferromagnetos debido a que ciertas simetrías, que conectan las subredes de los átomos magnéticos dentro del material, hacen que la densidad de espín sea isotrópica para cancelar la magnetización total.

Adicionalmente, para conocer la fuente del efecto Hall cristalino en el espacio recíproco, en la figura 2b se muestra las componentes  $x$  y  $y$  de curvatura de Berry ( $\Omega_x(\mathbf{k})$  y  $\Omega_y(\mathbf{k})$ ) en la primera zona de Brillouin (para el plano  $k_z=0$ ), como se define en la ecuación (2). En esta se puede observar que las posiciones en el espacio  $k$  donde la curvatura es más intensa (zonas azules y rojas) se pueden relacionar con los puntos de cruce (o anticruce) en la superficie de energía constante de la figura 1c, los cuales incrementan el valor del denominador en la ecuación (2). Se puede notar que la integral de la curvatura  $\Omega_x(\mathbf{k})$  se anula debido a la simetría de las contribuciones positivas (rojo) y negativas (azul) de la misma, haciendo que la componente de la conductividad Hall  $\sigma_{zy}$  se cancele. Por otro lado, la integral de la curvatura  $\Omega_y(\mathbf{k})$  es diferente de cero y produce una señal  $\sigma_{zx}$  considerable; de la misma manera que en otros materiales antiferromagnéticos no convencionales como el FeSb<sub>2</sub> (**Mazin, Koepf, Johannes, González-Hernández, & Šmejkal**, 2021) y el RuO<sub>2</sub> (**Šmejkal et al.**, 2020).



**Figura 2.** a) Densidad de carga de espín ( $\rho_{up}(\mathbf{r}) - \rho_{dn}(\mathbf{r})$ ) en el espacio real y b) componentes  $\Omega_x(\mathbf{k})$  y  $\Omega_y(\mathbf{k})$  de la curvatura de Berry en el espacio recíproco (plano  $k_z=0$ ) para el material NiF<sub>2</sub> cuando el vector de Néel está orientado en la dirección [100] (configuración 0°) y  $E - E_{Fermi} = -0.2\text{eV}$ . Conductividad de Hall anómala ( $\sigma_{ij}$ ) en función de la energía de Fermi cuando el vector de Néel es paralelo a c) [100] y [110], es decir, las configuraciones 0° y 45°, respectivamente. La densidad de carga de espín fue graficada con el código VESTA (Momma & Izumi, 2011).

En la figura 2c se muestra que la conductividad de Hall anómala (AHC) calculada usando la ecuación (1) en función de la posición del nivel de Fermi, cuando el vector de Néel está orientado 0° respecto al eje  $x$  en el material NiF<sub>2</sub>. Se nota un valor distinto de cero para la conductividad Hall anómala por debajo del nivel de Fermi, incluso teniendo un momento magnético total nulo por celda unitaria. Por lo tanto, un leve dopaje del material NiF<sub>2</sub> podría inducir valores considerables en el valor de la AHC que están cerca de los cruces (o anticruce) de energía en la estructura de bandas. Estos dopajes se podrían realizar con impurezas atómicas o con vacancias de F en el material NiF<sub>2</sub>. Adicionalmente, el efecto Hall cristalino en NiF<sub>2</sub> se podría explorar experimentalmente usando su homólogo magneto-óptico, como en el caso de películas delgadas de SrRuO<sub>3</sub> (Samanta et al., 2020).

A pesar de que el efecto de la interacción SOC es pequeño en el material estudiado, se encontró que el AHC desaparece cuando se apaga el efecto del SOC en el cálculo, como se ha reportado para diversos materiales FM y AFM (Nagaosa et al., 2010). En la figura 2c se observa que la conductividad es distinta de cero para una configuración de 0° en NiF<sub>2</sub> es la componente  $\sigma_{zx}$  del tensor de conductividad Hall, que representa un campo eléctrico aplicado en la dirección  $z$  y una señal Hall anómala medida en la dirección  $x$ . Para esta componente se obtiene un pico en la conductividad Hall de 400 S/cm por debajo del nivel de Fermi a un valor de -0.25 eV. Para la configuración AFM con un vector de Néel orientado 45° (figura 2c), los valores no nulos de las componentes de la conductividad corresponden a  $\sigma_{yz}$  y  $\sigma_{zx}$ , los cuales son cercanos a 250 S/cm para un nivel de Fermi de -0.25 eV. Estos valores de AHC son similares a los reportados para materiales AFM no colineales como 330 S/cm (Mn<sub>3</sub>Ge) (Nakatsuji, Kiyohara, & Higo, 2015) y 312 S/cm (Mn<sub>3</sub>Ir) (Chen, Niu, & MacDonald, 2014), y 34 S/cm para materiales AFM colineales como RuO<sub>2</sub> (Šmejkal et al., 2020).

Por otro lado, realizando un análisis de las simetrías magnéticas del material NiF<sub>2</sub> en sus diferentes configuraciones antiferromagnéticas es posible conocer la respuesta del material

NiF <sub>2</sub> <b>n</b>   [100]	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \sigma_{xz} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\sigma_{xz} & 0 & 0 \end{pmatrix}$	NiF <sub>2</sub> <b>n</b>   [110]	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \sigma_{xz} \\ 0 & 0 & \sigma_{yz} \\ -\sigma_{xz} & -\sigma_{yz} & 0 \end{pmatrix}$
-----------------------------------	--	-----------------------------------	---

**Table 1.** Análisis de simetría del tensor de conductividad Hall para el material antiferromagnético no convencional NiF<sub>2</sub> para el caso donde el vector de Néel **n** esta orientado paralelo a la dirección [100] (configuración de 0°) y en la dirección [110] (configuración de 45°).

ante un campo eléctrico externo (Seemann, Ködderitzsch, Wimmer, & Ebert, 2015). En este sentido cuando se tiene un vector de Néel alineado en las direcciones [100] y [110], las operaciones de simetría del grupo magnético puntual en cada caso son:  $Pnn'm'$ :  $P, G_y, S_{2y}, TC_{2z}, TM_z, TG_x, TS_{2x}$  y  $Cmm'm'$ :  $P, M_{xy}, C_{2xy}, TC_{2z}, TM_z, TM_{xy}, TC_{2xy}$ ; respectivamente. Donde las operaciones de simetría se denotan por: un plano de deslizamiento  $G_y$  (operación espejo en el eje  $y$  y con traslación parcial de la celda), un rotación de 180 grados a lo largo del eje  $z$  ( $C_{2z}$ ), un rotación de 180 grados tipo tornillo  $S_{2y}$  (rotación  $C_{2y}$  combinada con una traslación parcial de la celda) y la operación de reversión temporal  $T$  (operación anti-unitaria), la cual esta combinada con otras operaciones de simetría (Šmejkal et al., 2020). Usando solo estas operaciones de simetría fue posible determinar las componentes no nulas del tensor de conductividad Hall (ver tabla 1) y verificar así que las componentes del tensor calculas desde primeros principios (ver figura 2c) son coherentes con los resultados que predicen las operaciones de simetría magnéticas del material.

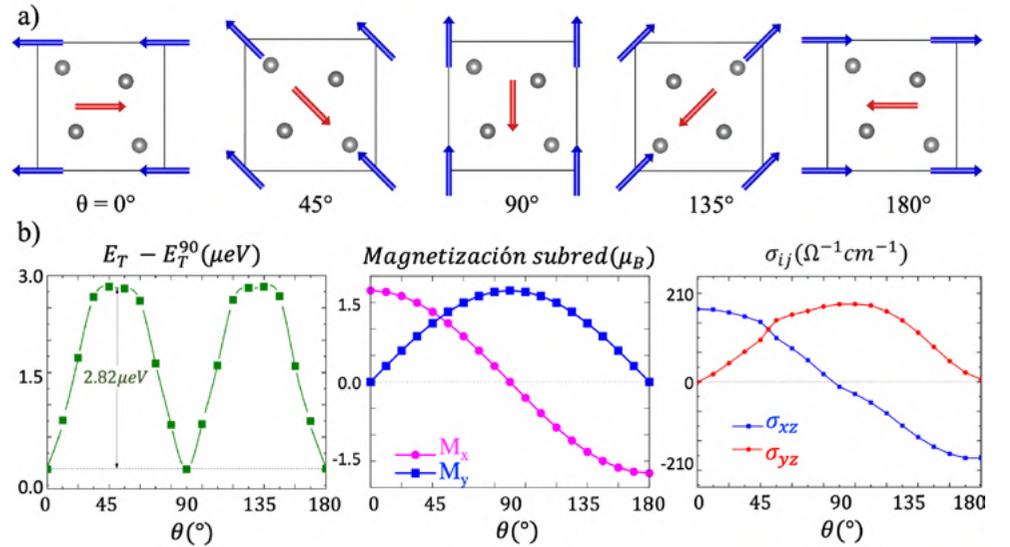
Finalmente, se realizó un estudio de las propiedades magnéticas y de transporte electrónico cuando se realiza la rotación del vector de Néel en el plano  $xy$  para material antiferromagnético NiF<sub>2</sub>; estas rotaciones están representadas en las celdas unitarias de la figura 3a. La figura 3b muestran la energía total relativa, las componentes ( $M_x$  y  $M_y$ ) del momento magnético de cada sub-red de átomos de Ni en función de la rotación angular del vector de Néel sobre el plano  $xy$ . Podemos notar como la componente  $M_x$  (y  $M_y$ ) de la magnetización se modifican de manera senoidal (y cosenoidal), siendo la magnitud de la misma casi constante a lo largo de toda la rotación. La magnitud de la magnetización es aproximadamente de  $1.72 \mu_B$ , la cual es cercana al valor de  $1.63 \mu_B$  calculado teóricamente por Cinthia y Karel (Corrêa & Výborný, 2018) y al valor experimental obtenido por Stremper et al (Stremper, Rütt, Bayrakci, Brückel, & Jauch, 2004), con una magnetización de  $1.96 \mu_B$ . Durante la rotación se preservó el carácter antiferromagnético del material; y como se nota en la tabla 2 se encuentra una contribución muy leve a la magnetización total ( $-0.004 \mu_B$ ) que indican que el NiF<sub>2</sub> es en realidad un material antiferromagnético.

Por otra parte, la energía de anisotropía magnetocristalina (MAE) obtenida en nuestro trabajo es de  $2.82 \mu eV$ , cercana al valor experimental de Ni-fcc puro reportado por Stearns (Halilov, Perlov, Oppeneer, Yaresko, & Antonov, 1998), que fue de  $2.7 \mu eV$ . El efecto de la F no es fuerte en los valores de MAE para NiF<sub>2</sub>. Sin embargo, la presencia de átomos de F cambia las propiedades magnéticas y transforma el Ni puro de un material metálico ferromagnético a un aislante antiferromagnético en el NiF<sub>2</sub>. En la Figura 3b podemos observar que el AHC se puede controlar cuando el vector de Néel gira en el plano  $xy$ . Se nota que los diferentes componentes del AHC se intercambian de acuerdo con la simetría del tensor de conductividad Hall, y que estas componentes son diferentes de cero aun cuando la magnitud total de la magnetización de la celda es cero para todas las rotaciones. Además, se observa el cambio de signo de las componentes del AHC cuando se rota 180 grados el vector de Néel; esta rotación es equivalente a invertir las posiciones de los átomos de F en la estructura cristalina de la figura 3a, lo que conecta la respuesta Hall con la configuración magnética y/o la estructural cristalina del material (posición de los átomos no magnéticos). Este ultimo fenómeno hace del efecto Hall cristalino un posible método para invertir cor-

	$x$	$y$	$z$	$M_x(\mu_B)$	$M_y(\mu_B)$	$M_z(\mu_B)$
Ni1	0.000	0.000	0.000	1.727	-0.001	0.000
Ni2	0.500	0.500	0.500	-1.728	-0.001	0.000
Total				0.000	-0.004	0.000

**Table 2.** Posiciones atómicas (en fracción de la celda unitaria) y componentes de la magnetización local (en  $\mu_B$ ) de los átomos de Ni en la estructura rutilo del  $\text{NiF}_2$ . Las componentes totales de la magnetización por celda unitaria para el  $\text{NiF}_2$  en el caso donde el vector de Néel  $\mathbf{n}$  esta orientado paralelo a la dirección [100] (configuración de  $0^\circ$ ).

rientes eléctricas con la rotación del vector de Néel, lo cual lo hace valioso en el naciente campo de la espongónica antiferromagnética (González-Hernández et al., 2021). De las figuras 3b se puede verificar que el AHC en el  $\text{NiF}_2$  no es proporcional a alguna componente remanente de la magnetización de la muestra, lo que indica que el efecto Hall cristalino es robusto y es debido completamente al ordenamiento AFM en la estructura cristalina del material. Para finalizar, cabe resaltar que una de las posibles aplicaciones para el material  $\text{NiF}_2$  estarían relacionadas con el reciente descubrimiento de los fenómenos magnetorresistencia gigante y túnel para multicapas de estos antiferromagnetos colineales no convencionales (Šmejkal, Hellenes, González-Hernández, Sinova, & Jungwirth, 2022).



**Figura 3.** a) Estructuras cristalinas que representan la rotación del vector de Néel (ángulos de  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  y  $180^\circ$ ) en la estructura cristalina del material antiferromagnético  $\text{NiF}_2$ . b) Energía total relativa (respecto a la configuración de  $90^\circ$ ), componentes del momento magnético ( $M_x$  y  $M_y$ ) de cada sub-red de átomos de Ni y conductividad Hall anómala  $\sigma_{ij}$  (calculada para  $E=E_F-650 meV$ ) en función de la rotación angular del vector de Néel en el plano  $xy$ .

## Conclusiones

Se sabe desde hace varias décadas que los materiales no magnéticos y antiferromagnéticos no generan corrientes de Hall individualmente. Sin embargo, en el presente trabajo se encontró que el material antiferromagnético no convencional  $\text{NiF}_2$ , con una estructura cristalina tipo rutilo la cual combina átomos no magnéticos y antiferromagnéticos, genera un corriente Hall anómala destacable y posiblemente observable en laboratorios de todo el mundo.

El descubrimiento de este nuevo fenómeno, denominado efecto Hall cristalino, contribuye en la detención de señales Hall en materiales antiferromagnéticos colineales, en los cuales se pensaban estas señales no se podían manifestar. Se encontró que la respuesta Hall puede ser considerable en el material antiferromagnético NiF<sub>2</sub> cuando el vector de Néel está orientado en el plano *xy*. Finalmente, se observó que la señal del efecto Hall cristalino se puede controlar con la rotación del vector Néel en el material NiF<sub>2</sub>. Este tipo de estudio se puede extender a otros materiales antiferromagnéticos colineales no convencionales los cuales sorprendentemente son más comunes de lo esperado en la naturaleza y relativamente fáciles de manejar experimentalmente. Cabe resaltar que la corriente de Hall generada exhibe una baja disipación de energía eléctrica, posicionándolo este fenómeno estratégicamente en el creciente campo de la espintrónica antiferromagnética.

## Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al profesor Jairo Sinova de la Universidad de Johannes Gutenberg (JGU) por su tiempo y esfuerzo en la discusión del presente trabajo. Agradecemos a la centro de supercomputación Mogon de la JGU ([hpc.uni-mainz.de](http://hpc.uni-mainz.de)), a la Universidad del Norte y a la fundación alemana Alexander von Humboldt por su continuo y valioso apoyo.

## Contribución de los autores

Todos los autores participaron en la realización de los cálculos, la redacción del artículo y en el diseño de las figuras.

## Conflicto de intereses

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

## References

- Baltz, V., Manchon, A., Tsoi, M., Moriyama, T., Ono, T., Tserkovnyak, Y. (2018, Feb). Antiferromagnetic spintronics. *Rev. Mod. Phys.*, *90*, 015005. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.90.015005> doi: 10.1103/RevModPhys.90.015005
- Blöchl P. E. (1994, December). Projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B* *50*, 17953. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.17953>
- Chen, H., Niu, Q., MacDonald, A. H. (2014, Jan). Anomalous hall effect arising from noncollinear antiferromagnetism. *Phys. Rev. Lett.*, *112*, 017205. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.112.017205> doi: 10.1103/PhysRevLett.112.017205
- Correã, C. A., Výborný, K. (2018, Jun). Electronic structure and magnetic anisotropies of antiferromagnetic transition-metal difluorides. *Phys. Rev. B*, *97*, 235111. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.97.235111> doi: 10.1103/PhysRevB.97.235111
- González-Hernández, R., Šmejkal, L., Výborný, K., Yahagi, Y., Sinova, J., Jungwirth, T. C. V., Železný, J. (2021, Mar). Efficient electrical spin splitter based on non-relativistic collinear antiferromagnetism. *Phys. Rev. Lett.*, *126*, 127701. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.126.127701> doi: 10.1103/PhysRevLett.126.127701
- Halilov, S. V., Perlov, A. Y., Oppeneer, P. M., Yaresko, A. N., Antonov, V. N. (1998, Apr). Magnetocrystalline anisotropy energy in cubic Fe, Co, and Ni: Applicability of local-spin-density theory reexamined. *Phys. Rev. B*, *57*, 9557-9560. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.57.9557> doi: 10.1103/PhysRevB.57.9557
- Hall, E. H. (1879). On a new action of the magnet on electric currents. *American Journal of Mathematics*, *2*(3), 287-292. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2369245>
- Herath, U., Tavazde, P., He, X., Bousquet, E., Singh, S., Muñoz, F., Romero, A. H. (2020). Pyprocar: A python library for electronic structure pre/post-processing. *Computer Physics Communications*, *251*, 107080. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465519303935> doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2019.107080>

- Šmejkal, L., Hellenes, A. B., González-Hernández, R., Sinova, J., Jungwirth, T. (2022, Feb). Giant and tunneling magnetoresistance in unconventional collinear antiferromagnets with nonrelativistic spin-momentum coupling. *Phys. Rev. X*, *12*, 011028. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.12.011028> doi: 10.1103/PhysRevX.12.011028
- Kohn, W., Sham, L. J. (1965, Nov). Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Phys. Rev.*, *140*, A1133-A1138. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.140.A1133> doi: 10.1103/PhysRev.140.A1133
- Kresse, G., Furthmüller, J. (1996). Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Phys. Rev. B*, *54*(16), 11169-11186. doi: 10.1103/PhysRevB.54.11169
- Kresse, G., Hafner, J. (1993). Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Phys. Rev. B*, *47*(1), 558-561. doi: 10.1103/PhysRevB.47.558
- Li, X., MacDonald, A. H., Chen, H. (2019). *Quantum anomalous hall effect through canted antiferromagnetism*, *arxiv:1902.10650*.
- Manchon, A., Koo, H. C., Nitta, J., Frolov, S. M., Duine, R. A. (2015, Sep 01). New perspectives for rashba spin-orbit coupling. *Nature Materials*, *14*(9), 871-882. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/nmat4360> doi: 10.1038/nmat4360
- Marzari, N., Mostofi, A. A., Yates, J. R., Souza, I., Vanderbilt, D. (2012, Oct). Maximally localized wannier functions: Theory and applications. *Rev. Mod. Phys.*, *84*, 1419-1475. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.84.1419> doi: 10.1103/RevModPhys.84.1419
- Mazin, I. I., Koepfner, K., Johannes, M. D., González-Hernández, R., Šmejkal, L. (2021). Prediction of unconventional magnetism in doped FeSb<sub>2</sub>. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *118*(42), e2108924118. Retrieved from <https://doi.org/10.1073/pnas.2108924118> doi: 10.1073/pnas.2108924118
- Momma, K., Izumi, F. (2011, Dec). Vesta3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *Journal of Applied Crystallography*, *44*(6), 1272-1276. Retrieved from <https://doi.org/10.1107/S0021889811038970> doi: 10.1107/S0021889811038970
- Mostofi, A. A., Yates, J. R., Pizzi, G., Lee, Y.-S., Souza, I., Vanderbilt, D., Marzari, N. (2014). An updated version of wannier90: A tool for obtaining maximally-localised wannier functions. *Computer Physics Communications*, *185*(8), 2309-2310. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001046551400157X> doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.05.003>
- Nagaosa, N., Sinova, J., Onoda, S., MacDonald, A. H., Ong, N. P. (2010). Anomalous Hall effect. *Rev. Mod. Phys.*, *82*, 1539-1592. doi: 10.1103/RevModPhys.82.1539
- Nakatsuji, S., Kiyohara, N., Higo, T. (2015, Nov 01). Large anomalous hall effect in a non-collinear antiferromagnet at room temperature. *Nature*, *527*(7577), 212-215. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/nature15723>
- Neel, L. (1970, dec). *Magnetism and the local molecular field*. [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org), Nobel Foundation.
- Perdew, J. P., Burke, K., Ernzerhof, M. (1996, Oct). Generalized gradient approximation made simple. *Phys. Rev. Lett.*, *77*, 3865-3868. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.77.3865> doi: 10.1103/PhysRevLett.77.3865
- Samanta, K., Ležaić, M., Merte, M., Freimuth, F., Blügel, S., Mokrousov, Y. (2020). Crystal hall and crystal magneto-optical effect in thin films of srRuO<sub>3</sub>. *Journal of Applied Physics*, *127*(21), 213904. Retrieved from <https://doi.org/10.1063/5.0005017> doi: 10.1063/5.0005017
- Seemann, M., Ködderitzsch, D., Wimmer, S., Ebert, H. (2015, Oct). Symmetry-imposed shape of linear response tensors. *Phys. Rev. B*, *92*, 155138. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.92.155138> doi: 10.1103/PhysRevB.92.155138
- Šmejkal, L., Mokrousov, Y., Yan, B., MacDonald, A. H. (2018, Mar). Topological antiferromagnetic spintronics. *Nature Physics*, *14*(3), 242-251.
- Stout, J. W., Reed, S. A. (1954, Nov 01). The crystal structure of mnF<sub>2</sub>, feF<sub>2</sub>, cof<sub>2</sub>, nif<sub>2</sub> and znF<sub>2</sub>. *Journal of the American Chemical Society*, *76*(21), 5279-5281. Retrieved from <https://doi.org/10.1021/ja01650a005> doi: 10.1021/ja01650a005
- Stremper, J., Rütt, U., Bayrakci, S. P., Brückel, T., Jauch, W. (2004, Jan). Magnetic properties of transition metal fluorides mf<sub>2</sub> (m = Mn, fe, co, ni) via high-energy photon diffraction. *Phys. Rev. B*, *69*, 014417. Retrieved from <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.69.014417> doi: 10.1103/PhysRevB.69.014417

- 
- Šmejkal, L., González-Hernández, R., Jungwirth, T., Sinova, J.** (2020). Crystal time-reversal symmetry breaking and spontaneous hall effect in collinear antiferromagnets. *Science Advances*, 6(23), eaaz8809. doi: 10.1126/sciadv.aaz8809
- Wu, Q., Zhang, S., Song, H.-F., Troyer, M., Soluyanov, A. A.** (2018). Wanniertools: An open-source software package for novel topological materials. *Computer Physics Communications*, 224, 405-416. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465517303442> doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2017.09.033>
- Xiao, D., Chang, M.-C., Niu, Q.** (2010, Jul). Berry phase effects on electronic properties. *Rev. Mod. Phys.*, 82, 1959-2007. Retrieved from <https://link.aps.org/> doi:10.1103/RevModPhys.82.1959 doi: 10.1103/RevModPhys.82.1959
- Šmejkal, L., Sinova, J., Jungwirth, T.** (2021). *Altermagnetism: spin-momentum locked phase protected by non-relativistic symmetries*, arxiv:2105.05820.

Artículo original

## Rare-earth ferrobismuthites: ferromagnetic ceramic semiconductors with applicability in spintronic devices

### Ferrobismutitas de tierra rara: cerámicos ferromagnéticos semiconductores con aplicabilidad en dispositivos espintrónicos

✉ Jairo Roa-Rojas<sup>1,\*</sup>, ✉ Javier A. Cuervo Farfán<sup>1</sup>, ✉ Crispulo E. Deluque Toro<sup>2</sup>,  
✉ David A. Landínez Téllez<sup>1,3</sup>, ✉ Carlos A. Parra Vargas<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Física de Nuevos Materiales, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

<sup>2</sup> Grupo de Nuevos Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

<sup>3</sup> Grupo de Estudios de Materiales GEMA, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

<sup>4</sup> Grupo de Física de Materiales, Escuela de Física, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

Inaugural article for admission of Jairo Roa-Rojas, as a full member of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences

## Abstract

We report here the synthesis process of the perovskite-like complex material  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  (R=Eu, Sm, Dy) using the ceramic method, as well as its structural, optical, magnetic, and electrical characterizations. Refined X-ray diffraction data revealed that this material crystallizes in an orthorhombic structure (space group Pnma number 62). The band gap value in the optical response shown in the diffuse reflectance spectroscopy curve was typical of semiconductor materials. The magnetization exhibited a very low coercive field hysteretic behavior, which is characteristic of weak ferromagnetism, for all temperatures examined below 300 K and the various magnetic fields applied. The real and complex electric permittivity curves showed the occurrence of dielectric relaxation processes at 113 K in agreement with reports of pyroelectric and thermo-stimulated currents as a function of temperature revealing the appearance of ferroelectric polarization below 113 K with possible magnetoelectric coupling. On the other hand, we made a theoretical study of the electronic structure with and without the inclusion of a Berry distortional phase and ab-initio calculations following the density functional theory formalism and the pseudopotential plane wave method. In this formalism, the exchange and correlation mechanisms are described by the generalized gradient approach (GGA + U) considering spin polarization. The Berry phase analysis suggested the occurrence of ferroelectricity at temperatures below 113 K consistent with the experimental analysis evidencing a biferroic behavior at low temperatures given that the distortional phase introduces hybridizations between the 3d-Fe and 2p-O states favoring the appearance of Dzyaloshinskii-Moriya interactions, which, in turn, facilitate the appearance of ferroelectricity coexisting with a weak ferromagnetism. The thermodynamic properties in the presence or absence of the Berry phase by means of the Debye quasi-harmonic model revealed the appearance of a ferroelectric transition at 113 K, which corroborates their magnetoelectric nature at low temperatures. The ferromagnetic semiconducting character found at room temperature enhances this material for applications in spintronics technology.

**Keywords:** Perovskite; Structure; Ferromagnetism; Ferroelectricity; Semiconductor; Spintronics.

## Resumen

Se reporta el proceso de síntesis del material complejo de tipo perovskita  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  (R=Eu, Sm, Dy) mediante el método cerámico, así como su caracterización estructural, óptica, magnética y eléctrica. Los datos refinados de difracción de rayos X revelaron que este material cristaliza en

**Citation:** Roa-Rojas J, Cuervo Farfán JA, Deluque Toro CE, *et al.* Rare-earth ferrobismuthites: ferromagnetic ceramic semiconductors with applicability in spintronic devices. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):628-645, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1723>

**Editor:** Diógenes Campos Romero

**\*Corresponding autor:**  
Jairo Roa Rojas; jroar@unal.edu.co

**Received:** June 30, 2022

**Accepted:** August 9, 2022

**Published on line:** September 9, 2022



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

una estructura ortorrómbica (grupo espacial Pnma número 62). La respuesta óptica en la curva de espectroscopia de reflectancia difusa proporcionó un valor de brecha energética típico de los materiales semiconductores. La magnetización presentó un comportamiento histerético de campo coercitivo muy bajo, característico del ferromagnetismo débil, para todas las temperaturas examinadas por debajo de 300 K y la aplicación de varios campos magnéticos. Las curvas de permitividad eléctrica real y compleja evidenciaron la presencia de procesos de relajación dieléctrica a 113 K, lo que concuerda con los reportes sobre corrientes piroeléctricas y termoestimuladas en función de la temperatura y revela la aparición de polarización ferroeléctrica por debajo de los 113 K, con un posible acoplamiento magnetoeléctrico. Por otro lado, se hizo un estudio teórico de la estructura electrónica con y sin la fase distorsiva de Berry. Se hicieron cálculos ab *initio* siguiendo el formalismo de la teoría funcional de la densidad y el método de ondas planas pseudopotenciales, formalismo en el cual los mecanismos de intercambio y correlación se describen mediante el enfoque de gradiente generalizado (GGA + U) considerando la polarización de espín. El análisis con la fase de Berry sugirió la presencia de ferroelectricidad a menos de 113 K, lo que concuerda con el análisis experimental que sugiere un comportamiento biferroico a bajas temperaturas debido a que la fase distorsiva introduce hibridaciones entre los estados 3d-Fe y 2p-O que favorecen la aparición de interacciones Dzyaloshinskii-Moriya, las cuales, a su vez, facilitan la aparición de ferroelectricidad en condiciones de ferromagnetismo débil. Las propiedades termodinámicas en presencia y ausencia de la fase de Berry en el modelo cuasi-armónico de Debye revelaron la aparición de una transición ferroeléctrica a los 113 K, lo que corrobora la naturaleza magnetoeléctrica a bajas temperaturas. El carácter ferromagnético semiconductor a temperatura ambiente potencia este material para aplicaciones en tecnología espintrónica.

**Palabras clave:** Perovskita; Estructura; Ferromagnetismo; Ferroelectricidad; Semiconductor; Espintrónica.

## Introduction

Since the 19th century, the development of physical laws related to the phenomena of electric charge transport was the basis for significant advances in communications, industry, transportation, power generation, and the design of technology for personal and home use, among others. All the technological innovations of the 20th century have been associated with the movement of electric charges determining the concept of electric current. On the other hand, Maxwell's electrodynamics establishes that such movement of charge is intrinsically related to a magnetic response. Oersted, Faraday, Ampère, and Lenz, among others, determined the intensities and directions of the fields produced by the occurrence of electric currents. These fields turned out to be analogous to those evidenced in magnets, in which the forces of attraction or repulsion on some metallic objects have their origin in the movement of electric charges within the atoms, the interactions of these charges with neighboring atoms, and the presence of external magnetic fields. Specifically, the orbital motion of the electron, which is nothing but charge in motion, can be conceived as a current in a loop that creates a very small magnetic field (orbital magnetic moment). Similarly, the rotation of the electron around its own axis in one direction or another is still charge in motion, giving rise to the so-called spin magnetic moment.

According to the Pauli exclusion principle, the atom full electron shells contain electrons distributed in orbitals within which only two can be located: one with spin up and the other with spin down, which explains why the contributions of atoms full shells to the magnetic response of the material are negligible and respond to interactions of the atoms with their neighbors, and why the valence electrons are mostly responsible for the magnetic "tendencies" of some elements. Thus, in the presence of an external magnetic field, a material can exhibit a negative response that opposes the applied field due to the application of Lenz's law at the molecular level. This behavior, observed in more than 30 elements of the periodic table at room temperature, was called *diamagnetism* by Faraday, who perceived that in these materials the direction of the induced currents must oppose the direction of the cause that produces them.

At room temperature, a second group of about 50 elements in the periodic table responds positively as long as they are subjected to an external magnetic field. In these so-called paramagnetic materials, the percentage of the response effect (magnetization) is much greater than the diamagnetism mentioned above as a result of one of the well-known Hund's rules according to which an arrangement of electrons with the same spin orientation in the different possible orbitals of the valence electrons is energetically more favorable than the pairing of the same electrons. The higher the number of unpaired electrons, the higher the effective magnetic moment in the unit cell of the material, the highest values being those observed in some rare earths such as Dy, Ho, Tb, and Er, whose number of *f* orbitals facilitates the possibility of finding up to seven unpaired electron spins.

On the other hand, the most relevant magnetic responses for technological applications are ferromagnetism, antiferromagnetism, and ferrimagnetism. In these three types of response, the materials behave as paramagnetic at high temperatures while below a transition temperature, the ordering of the magnetic moments changes due to the presence of interaction potentials between them. In the former, these interactions give rise to magnetic domains and Bloch walls that decrease the internal energy of the materials, so that below the Curie temperature, where the material is ferromagnetic, the application of positive and negative external fields makes it possible to observe one of its main characteristics: the hysteresis curve. This curve shows three parameters that depend on the specific composition of each material: the so-called coercive field, the saturation magnetization, and the remanent magnetization. The type of technological application depends on their values: for example, high values of these three parameters suggest the design of permanent magnets while low coercive field and high saturation and remanent magnetizations are ideal in devices designed to read and record information on magnetic media. At room temperature, three elements of the periodic table exhibit a ferromagnetic response: Fe, Co, and Ni. In the second group, below the so-called Néel temperature, the interactions between magnetic moments in the domains facilitate the minimum energy for oppositely oriented spins. Finally, in ferrimagnetic materials, a type of incomplete antiferromagnetism occurs determining a majority of spins oriented in the direction and sense of the applied field, so that the material shows a hysteresis curve very similar to that of ferromagnetic materials.

In the cases of ferro-, antiferro- and ferrimagnetic materials, the presence of cations with valence electrons in the 3d, 4d, and 4f orbitals can lead to the occurrence of the so-called crystalline field which, in turn, promotes their splitting in high and low spin orbitals (Estrada-Contreras *et al.*, 2021). This behavior is energetically compensated by structural distortions characterized by the Jahn-Teller effect. As if this were not enough, the type of chemical bonding between the nearest neighbour atoms can be of the bonding, anti-bonding, or non-bonding type where the accumulation of electric charge in the electronic orbitals can adopt various arrangements favoring some interactions and harming others. These phenomena introduce modifications in the exchange mechanisms between valence electrons of neighboring atoms giving rise to exotic magnetic responses, such as giant and colossal magnetoresistance, half-metallicity, multiferroicity, and magnetic semiconductivity, which have unsuspected uses in the emerging spintronics industry.

Classical electrodynamics allows defining the current density of electric charge transport as a function of carrier number density, the value of the electron charge, and its velocity. However, it is well-known that in metallic materials the carriers are the valence electrons and that in semiconductors these electrons are not free and require excitation to bridge the band gap and reach the so-called conduction band. We must not forget, however, the spin of electrons participating in the electric transport, which in metals and semiconductors is symmetrical in the sense that an equal number of electrons with spin up and spin down carry the electric charge. If it is not symmetrical, as is the case in half-metallic materials, where the material is conductive for one of the spin orientations and insulating for the other, or in ferromagnetic semiconductors, where the band gap is smaller for one of the spin orientations than for the other, one could speak of spin transport in addition to charge transport. Thus, a definition of spin current arises which, in analogy with

traditional electrodynamics, should depend on the number of carriers, the transport rate, and the spin value ( $\frac{1}{2}$ ) and not on the charge value of the electric case ( $1.6 \times 10^{-19}$  c). The control of the variables that determine the spin currents is the object of spintronics. Such control can be affected by the generation of spin states, the application of external fields, the introduction of spin-orbit type mechanisms, the application of electromagnetic waves, the inclusion of elements generating orbital splitting, the inclusion of thermal gradients, the application of mechanical rotations, and even by geometrical modifications in the material.

In the present report, we present the perovskite-type ceramic material  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  (R=Eu, Sm, Dy) that evidences measurable physical responses associated with processes promising future application in spintronics. We will explain in detail the family to which the material under study belongs, the synthesis process, the crystallographic analysis, the electrical behavior, the optical response, and the magnetic character of the perovskite-type material  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  (R=Eu, Sm, Dy), as well as the implications and perspectives in the design of technological devices classified as belonging to the spintronics industry.

### *Perovskite-type materials*

A family of versatile materials that represents a large percentage of the systems currently investigated in solid physics and chemistry is constituted by the so-called perovskites. In general, perovskites correspond to the ideal formula  $\text{ABX}_3$ , where A is an alkaline earth element, a rare earth, or a metal or semimetal of large ionic radius, B represents a transition metal or a lanthanide element, and X is usually oxygen or a halogen (Hazen, 1988). Modifications of the atomic radii of A and B introduce structural distortions and new crystalline phases while inclusions of rare earth elements enable the production of materials with exotic electrical and magnetic properties (Llamosa *et al.*, 2009). Partial substitutions of the A cation give rise to complex  $\text{A}_{0.5}\text{A}'_{0.5}\text{BO}_3$  materials (Triana *et al.*, 2012; Cuervo-Farfán *et al.*, 2017). Their chemical configuration offers multiple possibilities for combining different elements, as well as the feasibility of synthesizing new materials with a wide variety of physical properties. Depending on the magnetic and electrical characteristics of A, A', and B it is relatively easy to create new perovskite-type systems with promising prospects in the new field of spintronic technology (Cuervo-Farfán *et al.*, 2016). In this family of perovskite materials, the A and A' cations adopt an arrangement in the form of horizontally intercalated sheets or columnar plane-like layers (King & Woodward, 2010). These structural features constrain the crystal symmetries for the different families of complex perovskites suggesting the occurrence of structural distortions that also correspond to octahedral tilts and rotations that influence the physical properties as a result of the intrinsic characteristics of the material constituents (Benedek, 2014).

The results regarding the structural properties and the electrical, magnetic, and optical responses of materials belonging to these families of perovskite-type materials were correlated with the predictions from the density of electronic states and band structure calculations. We made the calculations using the density-functional theory (DFT), which has become a potentially powerful tool for predicting the physical properties of perovskite-type materials (Landínez-Téllez *et al.*, 2014). Moreover, considering that the macroscopic thermodynamic properties are strongly correlated with the microscopic dynamics of the atoms of the material, and assuming that the collective vibrations of the crystal lattices in these solid materials take place through phonons, it is possible to study the fundamental excitations associated with these thermodynamic properties. The most representative function of phonons occurs in insulators and semiconductors, where they make direct contributions to properties such as the specific heat and thermal expansion indicating that they are temperature-dependent properties. As for phonons, we considered vibrations in perovskite-type crystals as having a harmonic character valid for temperature values below the Debye temperature of the solid. In this sense, theoretical methods can constitute a complementary tool for the study of atomic dynamics at relatively high temperatures by means of approximations such as the quasi-harmonic Debye model (Deluque-Toro *et al.*, 2018). In the present work, we present the results of

the density of electronic states and the behavior of specific heat, the Debye temperature, the entropy, the thermal expansion, and the Grüneisen parameter as functions of pressure and temperature.

The single perovskite-type material  $R\text{FeO}_3$ , known as rare-earth orthoferrite, has been widely investigated for more than 60 years for its G-type antiferromagnetic character (Koehler & Wollan, 1957), as well as for exhibiting simultaneously weak ferromagnetic (Phokha *et al.*, 2014) and ferroelectric (Acharya *et al.*, 2010) responses, for which it can be classified as a multiferroic material (Spaldin, 2020). Experimentally, it has been observed that the rare-earth orthoferrite  $R\text{FeO}_3$  adopts an orthorhombic crystal structure belonging to the  $Pnmb$  space group (number 62), with a tolerance factor of  $\tau=0.951$  and octahedral distortions given by  $a^+b^-b^-$  (Dann *et al.*, 1994). On the other hand, the bismuth-based perovskite  $\text{BiFeO}_3$  has also been widely studied because it exhibits very interesting physical properties with great technological potential. In particular, it shows multiferroicity at temperatures close to room temperature (Lu *et al.*, 2010). This material has a rhombohedral structure (space group  $R3c$ ) at  $T=300$  K (Xu *et al.*, 2009) evidencing antiferromagnetism below the Néel temperature ( $T_N$ ) of  $\approx 640$  K and ferroelectricity at temperatures below the Curie temperature ( $T_C$ ) of  $\approx 1100$  K (Wu *et al.*, 2010). When the bismuth ferrite  $\text{BiFeO}_3$  binds to the rare-earth orthoferrite  $R\text{FeO}_3$  described above, it allows the formation of a complex structure of the  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  type (Cuervo-Farfán *et al.*, 2018; Nieto-Camacho *et al.*, 2020; Garrido *et al.*, 2021).

### Experimental procedures

The  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  ( $R=\text{Eu, Sm, Dy}$ ) samples were synthesized using the conventional solid-state method, i.e., by reacting the high purity precursor oxides produced by Aldrich (99.99% purity):  $\text{R}_2\text{O}_3$  ( $R=\text{Eu, Sm, Dy}$ ),  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . After weighing them in stoichiometric proportions, the powders were inhomogeneously mixed for 3 h in an agate mortar, and then the mixture obtained was subjected to the thermal process of calcination at  $550^\circ\text{C}$  for 36 h. The material was homogenized in an agate mortar for 30 min and then crushed in an acetone binder environment under an axial pressure of 500 MPa for 15 min to obtain disk-shaped samples. Finally, sintering intermediate grinding processes were carried out at  $600^\circ\text{C}$ ,  $715^\circ\text{C}$ , and  $810^\circ\text{C}$  for 24 h each. Structural analysis of the samples was performed using a PANalytical X'pert-Pro X-ray diffractometer ( $\lambda_{\text{Cu}_{K\alpha}}=1.540598$  Å) in the Bragg-Brentano configuration with a  $0.001^\circ$  step at  $2\theta$  and 10 s time. The structural analysis was performed by Rietveld-type refinement to determine the crystallographic properties of the material. The complex impedance was measured as a function of temperature using an Agilent-4194A phase gain and impedance analyzer, a Janis Research cryogenic system (model VPF-475), and a Lake Shore 332 temperature controller. These measurements were done at a temperature variation rate of 1.7 K/min and a frequency range between 102 and 107 Hz. The I-V curve at room temperature was produced from data measured on a Keithley-6517A DC electrometer and a sample holder with gold-plated silver contacts designed and adapted to the cryogenic system and temperature controller by the authors. The band gap and energy excitation regimes at room temperature were examined using a VARIAN Cary 5000 UV-Vis-NIR diffuse reflectance spectrophotometer (DRS) provided with an integrating sphere with a PMT/Pbs detector. The magnetic response was evaluated by measuring magnetization as a function of temperature using the zero field cooling (ZFC) and field cooling (FC) procedures under different magnetic field strengths. Likewise, magnetic hysteresis was measured by varying the applied field strength in isothermal curves at different temperatures. To measure the magnetic response, we used a VSM-PPMS Quantum Design. Several temperatures and applied field regimes were considered for the different samples measured.

### Theoretical calculations

To study of structural, cohesive, electronic, and thermodynamic properties of complex perovskites, we used the VASP code based on the density-functional theory (DFT) and the projector of augmented waves (PAW) (Perdew *et al.*, 1996; Heyd *et al.*, 2003). Since the

generalized gradient approximation (GGA) does not fully describe the system containing 3d-Fe, 3d-Co, and 5d-R orbitals, the exchange and correlation energy was evaluated using the GGA with the corrections to the Hubbard U-potential (GGA+U) (Estrada Contreras *et al.*, 2021; Guss *et al.*, 2014). Due to the ferromagnetic characteristic of the material, the U value was obtained by the method described for this type of magnetic ordering (Liechtenstein *et al.*, 1995) finding optimal potentials  $U_{Fe} = \# \#$  eV. Ion-electron interactions were described through PAW (Blöchl, 1994; Kresse & Joubert, 1999) and all calculations were performed considering spin-polarized configurations. The kinetic energy cutoff for the plane wave expansion of the electronic wave function was 520 eV. We used k-points gratings defined according to the Monkhorst-Pack method (Monkhorst & Pack, 1976) verifying their convergence until obtaining an energy accuracy over 1 meV/atom. We used the Methfessel-Paxton technique (Methfessel & Paxton, 1986) to fill the electronic levels with a mixing factor of 0.1 eV. For these configurations, we considered gratings of  $9 \times 9 \times 7$  k-points, which represent 284 k-points in the irreducible Brillouin zone. We used the conjugate gradient method to find stable ionic positions with an energy value of 0.1 meV as the convergence criterion for the total self-consistent energy calculations. The lattice parameters and internal coordinates of the unit cell were fully optimized by maintaining the spatial symmetry group of the crystal structure until the forces were less than 30 meV/Å and the energy due to ionic relaxation below 1.0 meV/atom. These calculations were performed considering an orthorhombic structure with space group Pnma (number 62) (Jaramillo-Palacio *et al.*, 2017; Jaramillo-Palacio *et al.*, 2021; Gil-Rebaza *et al.*, 2021; Cuervo-Farfán *et al.*, 2020). To determine the density of states (DOS) parameters, we calculated the total energy (E) and external pressure (P) for different volumes (V) varying from the equilibrium volume ( $V_0$ ) up to  $\pm 5\%$  and allowing relaxation of the internal coordinates. The bulk modulus (B0) and its pressure derivative (B') were obtained by fitting the pressure curves as a function of volume from the Murnaghan equation of state (Murnaghan, 1944).

The thermodynamic calculations were done following the Debye quasi-harmonic model (Deluque-Toro *et al.*, 2018a; Deluque-Toro *et al.*, 2018b) where macroscopically measurable thermophysical properties are directly associated with the atoms microscopic dynamics within the material when subjected to pressure and temperature external changes. Considering that the collective vibrations of the crystalline cells of solids occur in the form of phonons, the fundamental excitations associated with these thermodynamic properties can be conveniently calculated. In materials with relatively high electrical resistivities, phonons play a particularly important role in providing relevant contributions to some properties such as the specific heat and the thermal expansion as functions of the temperature. Thus, it is expected that the vibrations of the crystal lattice exhibit a harmonic character for temperature values below the Debye temperature of the material. In this work, we applied the Debye quasi-harmonic model as part of the study of atomic dynamics in the appropriate temperature regime.

### *Crystal structure*

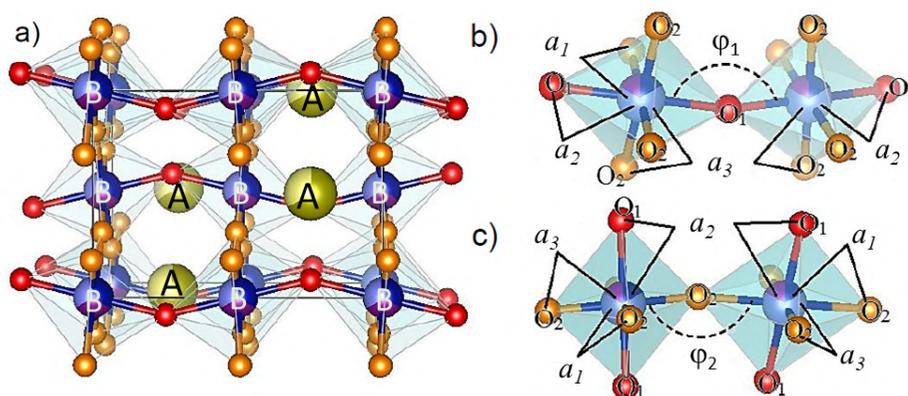
Once the samples were obtained, we proceeded to the structural characterization by obtaining an X-ray diffraction pattern (XRD) at room temperature followed by a careful Rietveld analysis of the experimental data. The results of this analysis revealed that the most stable crystallization structure corresponded to the Pnma space group (number 62) characteristic of orthorhombic perovskite-type materials (Cuervo-Farfán *et al.*, 2020; Cuervo-Farfán *et al.*, 2018; Nieto-Camacho *et al.*, 2020). For this crystalline system, an octahedral tilt of the type  $a^+b^-b^-$ , characterized by the existence of two rotation angles with similar magnitude values and opposite directions, is expected. This distortion is not commensurable with the displacement of Fe cations (Glazer, 1975), so this material is not expected to show ferroelectric properties at room temperature.

The structural exemplification in **figure 1a** shows the typical octahedral distortions of the material where A represents 50% Bi and 50% rare earth, and B=Fe. The out-of-phase inclinations of the  $FeO_6$  octahedra produced along the b and c axes are also shown.

Due to Glazer’s octahedral tilting, the ...O-Fe-O-Fe-O... bonds extend in a zigzag path along the *b* and *c* axes of the crystal cell. These distortions are best observed in **figures 1b** and **1c**, where they are seen to cause differences in the O-Fe-O bond distances along the three octahedral sub-axes, as well as in the Fe-O-Fe bond angles between octahedra. The interatomic distances between Fe<sup>3+</sup> cations and O<sup>2-</sup> anions are denoted as *a*<sub>1</sub>, *a*<sub>2</sub>, and *a*<sub>3</sub>, with 1.99 Å ≤ *a*<sub>*i*</sub> ≤ 2.06 Å and *a*<sub>1</sub> ≠ *a*<sub>2</sub> ≠ *a*<sub>3</sub>. On the other hand, the bond angles in the three crystallographic directions are denoted as φ<sub>1</sub> and φ<sub>2</sub>, such that φ<sub>1</sub> > φ<sub>2</sub> and 146° < φ<sub>1</sub> < 152°. The partial cause of these distortions has to do with the differences in the ionic radius between the R<sup>3+</sup> (1.08 Å ≤ R<sup>3+</sup> ≤ 1.24 Å) and Bi<sup>3+</sup> (1.03 Å) cations in the cubooctahedral coordination occupying the same crystallographic sites as shown in **figure 1a**. Additionally, the electrostatic interactions between the outermost electron orbitals of these ions subtly modify the interatomic distances *a*<sub>*i*</sub> and bond angles φ<sub>*i*</sub> affecting the electrical and magnetic responses of the material. Besides the differences between the O-Fe-O distances in the three sub-axes of the octahedra, there are several factors allowing for the evaluation of the degree of distortion of the crystallographic cell. One of them is the so-called tolerance factor (**Goldschmidt**, 1926), which considers a ratio between the ionic radii of cations and anions according to the expression  $\tau = [1/2(r_A + r_A) + r_O] / \sqrt{2}(r_B + r_O)$  where *r*<sub>A</sub> = *r*<sub>Bi</sub> and *r*<sub>A</sub> = *r*<sub>R</sub> are the ionic radii of Bi<sup>3+</sup> and R<sup>3+</sup> in cubooctahedral coordination, *r*<sub>B</sub> = *r*<sub>Fe</sub>, the ionic radius of Fe<sup>3+</sup> in octahedral coordination, and *r*<sub>O</sub>, the ionic radius of O<sup>2-</sup>. The further away from the ideal value τ=1 expected for a cubic cell without octahedral inclinations, the greater the structural distortion of the material. For the materials analyzed, τ<sub>Eu</sub> = 0.9111, τ<sub>Sm</sub> = 0.9136, and τ<sub>Dy</sub> = 0.8983; it can be inferred, then, that the greatest distortion occurs for R=Dy while the least asymmetric cell takes place for R=Sm.

Another measure of the distorting effects may be predicted by the global instability index (GII), which is given by the root mean square deviation of the experimental bond valence sums from the atomic valence (**Brown**, 2009)  $GII = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i)^2}{N}}$ , where N is the number of ions and d is the bond discrepancy factor defined as the deviation of the bond valence sum from the formal valence (**Yamada et al.**, 2018). The values obtained are *GII*<sub>Eu</sub> = 0.03890, *GII*<sub>Sm</sub> = 0.01719, and *GII*<sub>Dy</sub> = 0.16771. For perovskite-type materials the expected *GII* values < 0.2 have the highest probability of synthesis (**Lufaso & Woodward**, 2001), so it is inferred that the most stable structure corresponds to R=Sm and the least stable R=Dy (although synthesizable by having *GII* < 2).

The optimal distortional magnitude relative to the octahedral tilt and size of octahedra in the crystallographic cell can be estimated by means of the bond valence model, which allows the quantitative description of the inorganic bonding in ionic solids (**Lufaso & Woodward**, 2001). The bond valence *s*<sub>*ij*</sub> associated with each cation-anion interaction is calculated using  $s_{ij} = \exp[(R_{ij} - d_{ij})/B]$ , where *d*<sub>*ij*</sub> is the cation-anion distance. The parameter B



**Figure 1.** Exemplification of structural properties for Bi<sub>0.5</sub>R<sub>0.5</sub>FeO<sub>3</sub> perovskites where the A sites are occupied by Bi<sup>3+</sup> and R<sup>3+</sup> cations while the B sites correspond to Fe<sup>3+</sup>

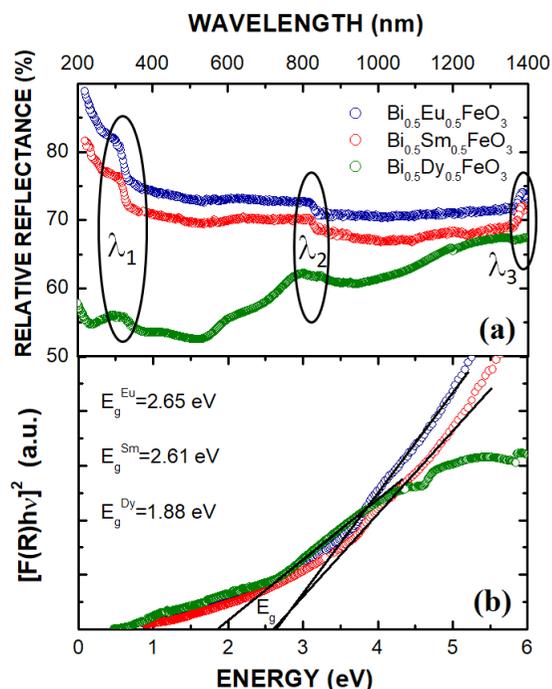
is determined empirically but it can often be treated as a universal constant with a value of 0.37.  $R_{ij}$  is found empirically for each cation-anion pair based on a large number of well-determined bond distances for the cation-anion pair under analysis. The bond valence sum (BVS)  $V_i$  of the A, B, and X ions is calculated by summing the individual bond valences ( $s_{ij}$ ) on each ion according to the equation  $V_i = \sum s_{ij}$ . In the calculations, it is important to take into account the coordination number 6 for  $\text{Fe}^{3+}$  cations and 12 for  $\text{R}^{3+}$  and  $\text{Bi}^{3+}$ , as well as the variations in bond distances due to Glazer distortions. The values found for BVS suggest that the degree of structural distortion in this family of materials increases with the increasing ionic radius of the  $\text{R}^{3+}$  cation.

### Optical characteristics

To experimentally establish the optical response of the material, diffuse reflectance spectroscopy measurements were performed in the  $200 \text{ nm} < \lambda < 1400 \text{ nm}$  wavelength regime as shown in **figure 2a**. Three regimes denoted by wavelengths  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , and  $\lambda_3$  are clearly observed in the figure for the three materials under study. These regimes have place for the energy regions  $3.3 \text{ eV} \leq E_1 \leq 3.6 \text{ eV}$ ,  $1.9 \text{ eV} \leq E_2 \leq 2.2 \text{ eV}$ , and  $1.0 \leq E_3 \leq 1.3 \text{ eV}$ .

The excitations of the three energy regimes mentioned above coincide with the irreducible representation for vibrations given by  $\Gamma = 5_{RSM} + 7B1u + 9B2u + 9B3u$ , where  $5_{RSM}$  represents five vibrational modes observed through Raman spectroscopy while  $7B1u + 9B2u + 9B3u$  corresponds to three modes observable by DRS in the three regions previously determined in the UV-Vis-NIR spectrum shown in **figure 2a** (Cuervo-Farfán *et al.*, 2021). These three energy regimes are related to vibrations in the octahedral Fe-O bonds and in the cuboctahedral R-O and Bi-O bonds (Sorescu *et al.*, 2011).

The analysis method to determine the band gap from this type of spectra is the usual one, which in some cases follows the classical Kubelka-Munk method (Myrick *et al.*, 2011) as shown in **figure 2b**. When dealing with a polycrystalline material with strongly granular morphology and subject to the existence of homogeneities, the band gap value  $E_g$  should be considered as a macroscopic average influenced by several factors: gap values



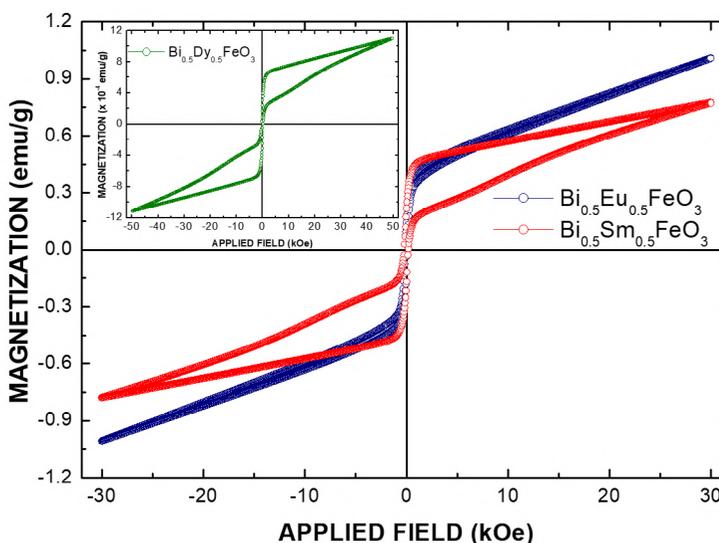
**Figure 2.** DRS spectrum (a) and Kubelka-Munk analysis (b) for the determination of the band gap in the  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  compounds

lower than  $E_g$  due to charge carriers at the grain boundaries perpendicular to the current direction; values higher than  $E_g$  due to insulating grain boundaries, and the potential caused by the porous character of the samples. Under these considerations, the average band gap obtained for the family of perovskites under study was  $E_g^{Eu} = 2.65$  eV,  $E_g^{Sm} = 2.61$  eV, and  $E_g^{Dy} = 1.88$  eV.

**Magnetic feature**

To examine the magnetic character of the  $Bi_{0.5}R_{0.5}FeO_3$  family of perovskite-type materials, isotherm curves at 50, 200, and 300 K temperatures of magnetization as a function of the applied field were carried out in the  $-30 \text{ kOe} \leq H \leq 30 \text{ kOe}$  for  $R=Eu, Sm$  and  $-50 \text{ kOe} \leq H \leq 50 \text{ kOe}$  regimes for  $R=Dy$  as shown in **figure 3**.

The figure shows the occurrence of a weak ferromagnetic response. The corresponding magnetic parameters in **table 1** show a tendency for the coercive field to grow with the increasing effective magnetic moment of the unit cell and decreasing ionic radius of the rare earth cation while the remnant magnetization decreases.



**Figure 3.** Weak ferromagnetic behavior measured at 300 K by magnetization curves as a function of applied field strength for  $Bi_{0.5}R_{0.5}FeO_3$  material ( $R=Eu$  and  $Sm$ ). The inset shows the magnetization for  $R=Dy$ , which evidences a difference of three orders of magnitude with respect to  $R=Eu$  and  $Sm$ .

**Table 1.** Magnetic parameters observed for the  $Bi_{0.5}R_{0.5}FeO_3$  perovskite-like structures

Material	$\mu_{eff}$ ( $\mu_B$ )	R ionic radius (Å)	T (K)	$H_C$ (Oe)	$M_R$ (emu/g)	REF
$Bi_{0.5}Sm_{0.5}FeO_3$	5.8	1.24	50	240	0.29	Cuervo-Farfán <i>et al.</i> , 2020
			200	194	0.24	
			300	151	0.20	
$Bi_{0.5}Eu_{0.5}FeO_3$	5.9	1.12	50	296	0.14	Cuervo-Farfán <i>et al.</i> , 2018
			200	225	0.09	
			300	190	0.05	
$Bi_{0.5}Dy_{0.5}FeO_3$	9.5	1.08	50	700	$3.25 \times 10^{-4}$	Nieto-Camacho <i>et al.</i> , 2020
			200	448	$2.63 \times 10^{-4}$	
			300	300	$2.63 \times 10^{-4}$	

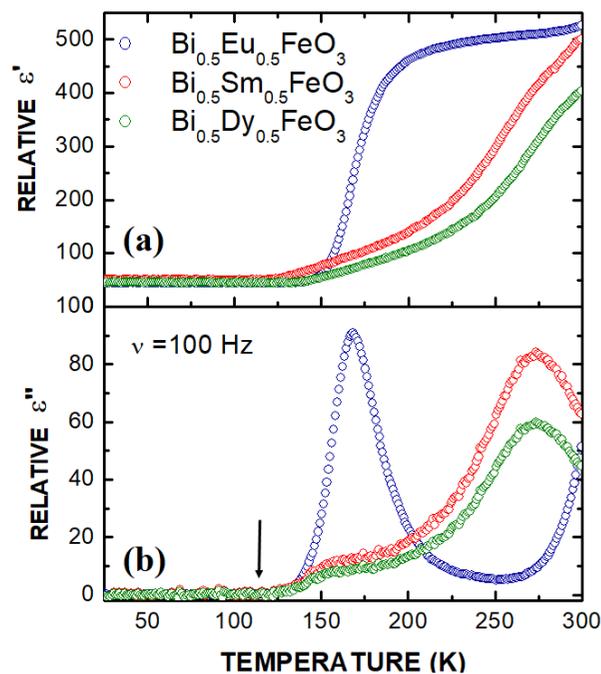
In other words, ferromagnetism tends to soften as the magnetic moment of the unit cell increases and with the chemical compression of the cuboctahedral sub-cell where the cation R, whose ionic radius decreases, is located. This soft character of the ferromagnetic response could have technological utility in devices requiring a fast switching of magnetic spins, which can be achieved by applying low external fields  $H \leq 700$  Oe.

Some features of interest such as the occurrence of narrow magnetic hysteresis and linear character without saturation at relatively high fields in the magnetization curves of **figure 3** are worth mentioning. The linear tendency above the hysteretic behavior in this type of polycrystalline volumetric material could respond to the presence of submicrometer-sized grains, some of them constituted by ferromagnetic monodomains that would give rise to a superparamagnetic type response (see references in **table 1**). The absence of saturation for the applied H field strengths prevents the determination of the effective magnetic moment of the unit cell and it should be noted that for this reason, the values for  $\mu_{\text{eff}}$  in **table 1** are essentially theoretical.

### Electric response

The complex impedance measurements as a function of temperature for the three materials of  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  (R=Eu, Sm, and Dy) revealed the occurrence of a marked dispersion of the complex electric permittivity and evidenced Maxwell-Wagner-type relaxation processes that manifested in a substantial increase of the real part of the electrical permittivity ( $\epsilon'$ ) with increasing temperature (**Cuervo-Farfán et al., 2020; Cuervo-Farfán et al., 2018**). These processes are considered electrically inhomogeneous due to incipient microscopic conduction mechanisms in the dielectric response (**Lunkenheimer et al., 2002**).

On the other hand, in the low-temperature regime, the change in electrical permittivity starts very close to  $T=113$  K. As reported for R=Sm (**Cuervo-Farfán et al., 2020**), in this thermal region the real electrical permittivity varies logarithmically with applied frequency and temperature, which allows determining an Arrhenius-like behavior of the electrical conductivity  $\sigma$  as a function of temperature. The onset of this region, marked with an arrow in **figure 4b**, coincides with the measurements of pyroelectric currents and



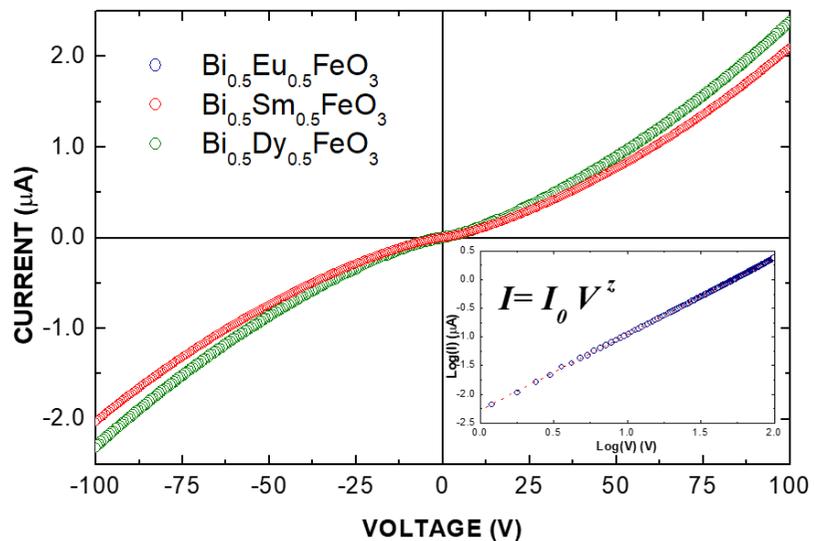
**Figure 4.** (a) Real and (b) complex electrical permittivity as a function of temperature measured on samples of  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  material in a 100 Hz frequency

thermo-stimulated currents for R=Eu (Cuervo-Farfán *et al.*, 2018) according to which this temperature value would coincide with the occurrence of a structural transition from a centrosymmetric to a non-centrosymmetric crystal lattice implying simultaneous effects of ferroelectric polarization with the ferromagnetic response, which would suggest that below T=113 K this family of materials would evidence multiferroic properties.

This behavior responds to the eventual superposition of space charge factors due to the accumulation of free electrons in the grains and intergranular boundaries reducing the resistivity at high temperatures; oxygen vacancies; accumulation of interfacial distortions, and the presence of different polarization mechanisms, among others. It can be assumed, then, that the processes involved in electronic transport correspond to the thermally-activated type and originated through mechanisms related to the ceramic properties of the material that contribute to the electrical conductivity of the composite, such as small polarons associated with lattice deformation, probably with free charges, ionization, or intrinsic ionic conductivity (Dash *et al.*, 2014).

The semiconductor behavior at room temperature was experimentally established through I-V curves, as shown in figure 5. The behavior observed in the I-V curves is clearly nonlinear, fitting an equation of the type  $I=I_0 V^z$  known as the figure of merit of varistor-type semiconductors, where  $I_0$  is a free constant and  $z$  represents the nonlinear coefficient, which generally has non-integer values between 1 and 2 (Pandey *et al.*, 2015). The values obtained for the nonlinear coefficient in the figure of merit of the varistor are in the  $1.32 < z < 1.46$  regime and reveal the growth of the conductivity with the increasing applied field.

According to the nonlinear characteristic of the curves, the increase in the applied voltage promotes an increase in the electrical conductivity manifested in the growth of the slope of the curves suggesting that the applied electric field increases the number of free charge carriers participating in the electrical conduction as expected in semiconductor materials. In the meantime, the varistor-type character originates from the polycrystalline and granular character of the material following the figure of merit in the form of a potential function since its boundaries have micro-junctions acting as circuits formed by microscopic diodes whose conductivity increases with the increment of the applied field because the intra-granular transport current flow dominates over the resistance represented by the inter-granular junctions (Vojta *et al.*, 1996).



**Figure 5.** Measured I-V curves for materials with R=Sm and Dy. The inset shows the power-law behavior characteristic of the varistor-type semiconductor response for R=Eu.

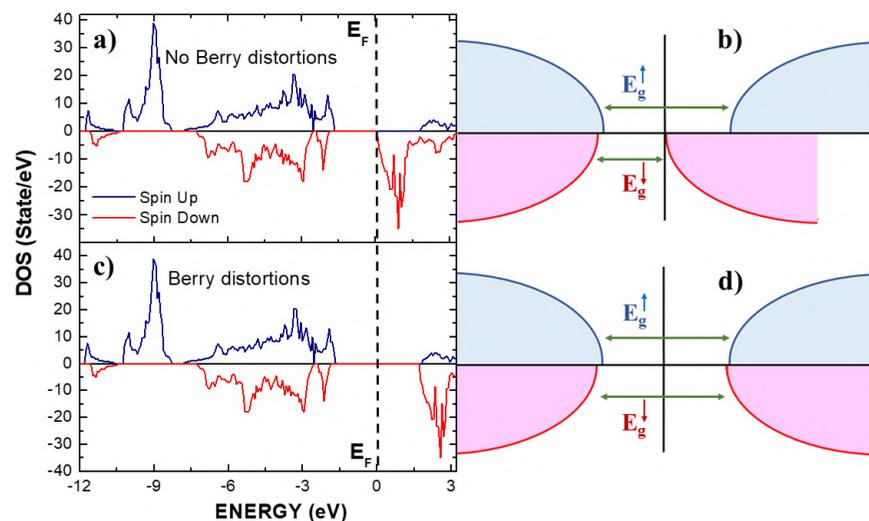
### Electronic properties and phase transition

DFT has proven to be a powerful tool in the prediction of various physical properties in perovskite-like materials (Alarcón-Suesca *et al.*, 2019). To establish the magnetic and semiconducting character of the  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  materials under analysis, we calculated the total density of states considering the structural group Pnma (number 62) for R=Eu (Cuervo-Farfán *et al.*, 2018), R=Sm (Cuervo-Farfán *et al.*, 2020), and R=Dy (Garrido *et al.*, 2021). In all three cases, the total density of states exhibited the behavior exemplified in **figure 6a** for R=Dy considering the up and down spin orientations around the Fermi energy denoted as  $E_F$  for  $E=0$  eV. Two relevant features are clearly observed in the figure: first, the difference between the densities of states for the two spin orientations is a finite value, which guarantees a value of the effective magnetic moment of the unit cell corresponding to that expected from the application of Hund's rules; second, the material exhibits an insulator character for the up-spin polarization ( $E_g^\uparrow=3.49$  eV) and a semiconducting one for the other spin orientation ( $E_g^\downarrow=1.76$  eV). **Figure 6b** schematizes the type of non-symmetric behavior of the band gap for the two spin configurations, one of the characteristics identifying ferromagnetic semiconductor materials (Garrido *et al.*, 2021) that were experimentally established in this manuscript.

The difference between the band gaps for the two (up and down) spin polarizations is very interesting from a technological point of view, particularly for the design of spintronic devices, as an energy excitation in the  $1.76 \text{ eV} < E < 3.49 \text{ eV}$  range enables the transport of electric charge in the material and, besides, makes it possible to generate a  $-\frac{1}{2}$  spin current and the production of spin valves and polarized spin currents.

Given the experimental results suggesting the possibility of ferroelectric ordering at temperatures below 113 K, the Berry phase is used to calculate the density of electronic states in this family of materials (Gil Rebaza *et al.*, 2021). This methodology is applicable because spontaneous ferroelectric polarization is intrinsically related to structural phase transitions between centrosymmetric and non-centrosymmetric cells. Thus, electronic properties in the  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  family of materials can be calculated by introducing octahedral distortions in the Pnma space group cell that characterizes the crystals of these materials.

These structural distortions have been accounted for previously by calculating the Berry's phase of the electronic Bloch wave functions at zero temperature and in the absence of an applied electric field, i.e., as a spontaneous polarization in a ferroelectric



**Figure 6.** Total state density with and without the Berry phase (a and c, respectively), and band scheme of the ferromagnetic semiconductor (b) and biferroic semiconductor (d) for the  $\text{Bi}_{0.5}\text{Dy}_{0.5}\text{FeO}_3$  complex perovskite

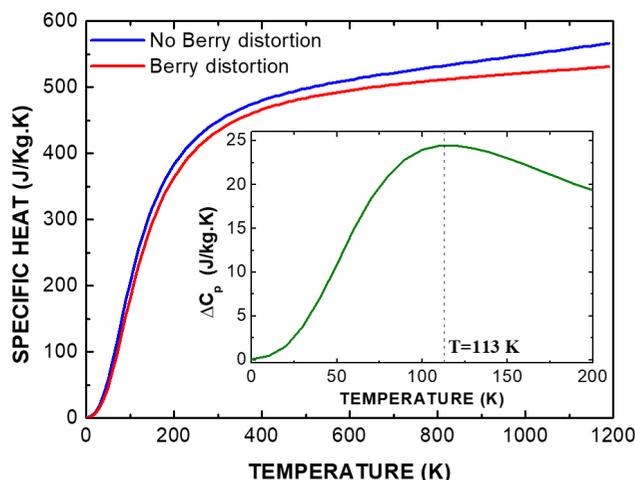
material (Resta, 1994; Resta, 1997). This calculation is made in the absence of an external electric field, so the polarization process is understood as resulting from the dynamics of the network. Thus, a transition associated with microscopic displacements of the Fe cations from their structural sites of symmetry in the  $\text{FeO}_6$  octahedra can be expected.

The results of the total density of states for the two spin-up and spin-down polarizations under the distortional effect for  $R=\text{Dy}$  are presented in **figure 6c**. The most notable characteristics are the tendency of the material to adopt an insulating nature for the two spin orientations eliminating the semiconductor character and the permanence of the ferromagnetic behavior in accordance with the experimental results for  $R=\text{Eu}$ ,  $\text{Sm}$ , and  $\text{Dy}$ , respectively (Cuervo-Farfán *et al.*, 2018; Cuervo-Farfán *et al.*, 2020; Nieto-Camacho *et al.*, 2020). The average band gap calculated for the two spin orientations from the curves in **figure 6c** is 3.5 eV. A graphical representation of the band gap modification around the Fermi level can be seen in **figure 6d**, where the impossibility of obtaining polarized spin currents when the Berry transition takes place at low temperatures is clearly observed. Additionally, an electric polarization curve appears gradually when Berry's distortion is performed (Gil Rebaza *et al.*, 2021).

Finally, it is relevant to establish the possible occurrence of a phase transition between the ferromagnetic semiconductor state at high temperatures and the coexistence of ferromagnetism and ferroelectricity at low temperatures after Berry distortion. For this purpose, the specific heat curves as a function of temperature were obtained without distortion and with Berry's octahedral distortion for  $R=\text{Eu}$  (**figure 7**).

As shown in the inset of **figure 7**, the difference between the specific heat values (with and without the Berry phase) evidences an abrupt change for the value close to  $\Delta C=113$  K consistent with the experimental results reported for  $R=\text{Eu}$  (Cuervo-Farfán *et al.*, 2018) and the onset of the change of the real part of the dielectric permittivity for all compounds with  $R=\text{Eu}$ ,  $\text{Sm}$ , and  $\text{Dy}$ . This transition has to do with the change between a paraelectric state ( $T>113$  K) and a ferroelectric state ( $T<113$  K), which has its origin in a structural transition between the centrosymmetric space group  $\text{Pnma}$  and another polar group (non-centrosymmetric), the  $I4/mcm$ , which has the low global instability index characteristic of some of the perovskite materials reach ordering of the dipole moments at low temperatures (Mishra & Pandey, 2009).

In a complete study of this material under pressures up to 18 GPa, a shift of the transition towards higher temperature regimes was observed (Gil-Rebaza *et al.*, 2021). This Curie temperature shift is due to the increase in pressure decreasing the overlap between



**Figure 7.** Phase transition observed in the specific heat related to ferroelectric ordering at  $T=113$  K in  $\text{Bi}_{0.5}\text{Eu}_{0.5}\text{FeO}_3$ . The inset clearly shows the change in the specific heat difference with and without the Berry phase.

the Fe-3d( $e_g$ ) and O-2p orbitals in the  $\text{FeO}_6$  octahedra of the material, as expected for any insulating perovskite and in oxide material molecules (Korney *et al.*, 2005; Korney & Bellaiche, 2007).

This type of response is expected in multiferroic materials in which the effect of pressure can induce changes in the ferroelectric response (Ding & Shong, 2020), as well as in the occurrence of the magnetoelectric coupling (Gilioli & Ehm, 2014) taking place at  $T=113$  K induced by the Dzyaloshinskii-Moriya-type interactions (Sergienko *et al.*, 2006; Fodouop *et al.*, 2019) associated with the partial tilting of magnetic moments in perovskite octahedra (Dong *et al.*, 2019). The interaction mechanisms are favored by hybridizations between the 3d-Fe and 2p-O orbitals in the octahedra, which result in the ferromagnetic character in the density of states calculation in figures 6a and 6c.

## Conclusions

Rare earth perovskite-like ferrocobaltite  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  (R=Eu, Sm, and Dy) were successfully synthesized using the solid-state reaction method. The structural analysis showed that these materials crystallize in orthorhombic structures belonging to the Pnma space group (number 62) with strong octahedral distortions and cationic disorder of  $\text{Bi}^{3+}$  and  $\text{R}^{3+}$  along the crystallographic axes. The weak ferromagnetic nature of these perovskite materials was established from the hysteretic curves of magnetization as a function of applied field strengths at 50, 200, and 300 K. Dielectric measurements have shown a Maxwell-Wagner-type relaxation process, probably aroused from the depletion layers due to the electrode-sample interfaces and irregular intergranular boundaries. The pyroelectric current and magnetic response characterizations suggested that the  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  perovskites behave as biferroic materials below  $T=113$  K. The analysis of the experimental diffuse reflectance data showed that these materials behave as semiconductors at room temperature with their insulating character expected at temperatures close to 113 K, where the material must also undergo a structural transition to a non-centrosymmetric system that promotes a transition from the ferromagnetic-paraelectric state at high temperatures to the ferromagnetic-ferroelectric state at low temperatures.

We complemented the analysis of the physical properties of the material with a theoretical analysis by means of calculations considering the structural space group Pnma emerging from the experimental results. The density-of-state calculations suggest the appearance of a semiconductor-like behavior with a band gap of 1.76 eV explained by the majority contribution of the 2p-O orbitals in the valence band and the hybridization with the 4f-R and 6p-Bi orbitals. For their part, the Fe cation displacements applied through the Berry-phase study should promote a structural modification between the centrosymmetric space group and a polar (non-centrosymmetric) cell type to promote the spontaneous formation of dipole moments. The octahedral distortions introduced by the Berry phase give rise to Dzyaloshinskii-Moriya interactions that allow the coexistence of the spontaneous ferroelectric electric polarization and the weak ferromagnetic response due to canting effects on the ordered spins. Thus, a marked increase in the value of the forbidden band is obtained when the density of states is determined considering the Berry phase. The macroscopic polarization of the material was calculated through the Berry phase and the result was consistent with the experimental analysis as the behavior had a ferroelectric characteristic. The difference in the specific heat between the states with and without the Berry phase suggests the occurrence of a transition at  $T = 113$  K in agreement with the experimental observations through thermostimulated and pyroelectric currents.

While the biferroic nature of the material  $\text{Bi}_{0.5}\text{R}_{0.5}\text{FeO}_3$  is associated with low temperatures, its technological relevance at room temperature is related to the coexistence of the ferromagnetic response and semiconductivity in a single crystallographic phase, which could take place for a whole family of rare earths at the R site, suggesting a new line of research in the design of devices based on spintronic technology of ceramic materials applied for the simultaneous control of the transport of electric charge carriers and spin

currents since the asymmetry in the band structure in the vicinity of the Fermi level for the spin-up and spin-down orientations gives rise to a new magnetic spin transport channel. These characteristics open the possibility of using lanthanide ferrocobaltite-type materials in technological devices based on polarized spin currents, such as spin valves and novel spin transistors, in which, besides the control of the transport of electronic carriers, the presence of low external magnetic fields favors the control of the parameters related to the transport of magnetic moments. Additionally, the biferroic character at low temperatures (113 K) creates a reflective space around the prospect of tuning the magnetoelectric transition temperature through compositional modifications or by applying hydrostatic pressures thereby increasing the number of degrees of freedom and versatility of spintronic properties in the material.

It is worth noting that the coexistence of these two physical properties (the ferromagnetic character and the semiconductor response) at room temperature opens up application possibilities for this family of materials in devices such as ferromagnetic transistors that adopt multifunctional characteristics as the writing, erasing, and reading procedures of magnetic information can be performed while simultaneously processing activities, with the particularity that the polarized spin currents guarantee a higher response speed in these spintronic processes.

## Acknowledgements

This work received partial support from the DIEB-ORI at the National University of Colombia (Hermes Code 52594) and FONCIENCIAS at *Universidad del Magdalena*.

## Author contributions

JRR proposed and directed the project, coordinated the work team, interpreted and correlated the experimental and theoretical results, analyzed the interaction mechanisms, and wrote the paper. JACF synthesized the samples and performed the structural, morphological, and electrical characterizations. CEDT performed the theoretical calculations. DALT coordinated the structural and morphological analyses. CAPV performed the magnetic characterization.

## Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interests of any kind regarding the publication of the results of our research work.

## References

- Acharya, S., Mondal, J., Ghosh, S., Roy, S.K., Chakrabarti, P.K. (2010). Multiferroic Behavior of Lanthanum Orthoferrite (LaFeO<sub>3</sub>). *Materials Letters*, 64, 415-418.
- Alarcón-Suesca, C.E., Deluque-Toro, C.E., Gil-Rebaza, A.V., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J. (2019). Ab-initio studies of electronic, structural and thermophysical properties of the Sr<sub>2</sub>TiMoO<sub>6</sub> double perovskite. *Journal of Alloys and Compounds*, 771, 1080-1089.
- Benedek, N.A. (2014). Origin of Ferroelectricity in a Family of Polar Oxides: The Dion—Jacobson Phases. *Journal Inorganic Chemistry*, 53, 3769-3777.
- Blöchl, P.E. (1994). Projector augmented-wave method. *Physical Review Journals*, 50, 17953-17979.
- Brown, I.D. (2009). Recent Developments in the Methods and Applications of the Bond Valence Model. *Journal Chemical Reviews*, 109 (12), 6858-6919
- Cuervo-Farfán, J.A., Aljure-García, D.M., Cardona, R., Arbey-Rodríguez, J., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J. (2017). Structure, Ferromagnetic, Dielectric and Electronic Features of the LaBiFe<sub>6</sub>O<sub>6</sub> Material. *Journal of Low Temperature Physics*, 186, 295-315.
- Cuervo-Farfán, J.A., Castellanos-Acuña, H.E., Landínez-Téllez, D.A., Parra-Vargas, C.A., Roa-Rojas, J. (2016). Structural, magnetic, and electrical features of the Nd<sub>2</sub>SrMn<sub>2</sub>TiO<sub>6</sub> perovskite-like compound, *Physica Status Solidi (B)*, 253, 1127-1132.
- Cuervo-Farfán, J.A., Deluque-Toro, C.E., Parra-Vargas, C.A., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J. (2020). Experimental and theoretical determination of physical properties in the Sm<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ferromagnetic semiconductor. *Journal of Materials Chemistry*, C8, 4925-14939.

- Cuervo-Farfán, J.A., Parra-Vargas, C.A., Viana D.S.F., Milton, F.P., García, D., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2018). Structural, Magnetic, Dielectric and Optical Properties of the  $\text{Eu}_2\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_{12}$  Bismuth-Based Low-Temperature Biferroic. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 20942-20951.
- Cuervo-Farfán, J.A., Benavdes-Lara, J.P., Parra-Vargas, C.A. Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2021). Structural Characteristics and Electric and Magnetic Features of the  $\text{Nd}_{2.68}\text{Sr}_{1.32}\text{Mn}_{1.2}\text{Ti}_{1.32}\text{Fe}_{1.48}\text{O}_{12}$  Ferromagnetic Semiconductor. *Journal of Low Temperature Physics*, 202, 128-144.
- Dann, S.E., Currie, D.B., Weller, M.T., Thomas, M.F., Al-Rawwas, A.D.** (1994). The Effect of Oxygen Stoichiometry on Phase Relations and Structure in the System  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$  ( $0 \leq x \leq 1, 0 \leq \delta \leq 0.5$ ). *Journal of Solid State Chemistry*, 109, 134-144.
- Dash, U., Sahoo, S., Chaudhuri, P., Parashar, S.K.S., Parashar, K.** (2014). Electrical properties of bulk and nano  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  ceramics: A comparative study. *Journal of Advanced Ceramics*, 3, 89-97.
- Deluque-Toro, C.E., Mosquera-Polo, A.S., Gil-Rebaza, A.V, Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2018a). Ab Initio Study of the Electronic Structure, Elastic Properties, Magnetic Feature and Thermodynamic Properties of the  $\text{Ba}_2\text{NiMoO}_6$  Material. *Journal of Low Temperature Physics*, 192, 265-285.
- Deluque-Toro, C.E., Mosquera-Polo, A.S., Villa-Hernández, J.I., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2018b). Thermodynamic properties, electronic and crystallographic structure, and magnetic response of the  $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$  material. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42,180-187.
- Deluque-Toro, C.E., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2018). Ab-initio analysis of magnetic, structural, electronic and thermodynamic properties of the  $\text{Ba}_2\text{TiMnO}_6$  manganite. *DYNA*, 85, 27-36.
- Ding, J.L & Zhong, Y.** (2020). A theoretical strategy for pressure-driven ferroelectric transition associated with critical behavior and magnetoelectric coupling in organic multiferroics. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22, 19120-19130.
- Dong, S., Xiang, H., Dagotto, E.** (2019). Magnetoelectricity in multiferroics: a theoretical perspective. *National Science Review*, 6, 629-641.
- Estrada-Contreras, V.R., Alarcón-Suesca, C.E., Deluque-Toro, C.E., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2021). Crystalline, ferromagnetic-semiconductor and electronic features of the terbium-based cobalt-ferrite  $\text{Tb}_2\text{FeCoO}_6$ . *Ceramics International*, 47, 14408-14417.
- Fodouop, F.K., Foulceng, G.C., Tchoffo, M., Fai, L.C., Randrianantoandro N.** (2019). Thermodynamics of metamagnetoelectric effect in multiferroics. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 474, 456-461.
- Garrido, L.C., Deluque-Toro, C.E., Díaz, I., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2021). First-principles calculations to investigate elastic, electronic and thermophysical properties of the  $\text{Dy}_2\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_{12}$  ferromagnetic semiconductor. *Semiconductor Science and Technology*, 36, 095015.
- Gil-Rebaza, A.V., Deluque-Toro, C.E., Medina-Chanduví, H.H., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2021). Thermodynamic evidence of the ferroelectric Berry phase in europium-based ferrobismuthite  $\text{Eu}_2\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_{12}$ . *Journal of Alloys and Compounds*, 884, 161114.
- Gilioli, E. & Ehm, L.** (2014). High pressure and multiferroics materials: a happy marriage. *IUCrJ*, 1, 590-603.
- Glazer, A.M.** (1975). Simple ways of determining perovskite structures. *Acta Crystallographica*, 31, 756-762.
- Goldschmidt, V.M.** (1926). Die Gesetze der Krystallochemie. *Naturwissenschaften*, 14 (21), 477-485
- Guss, P., Foster, M.E., Wong, B.M., Doty, F.P., Shah, K., Squillante, M.R., Shirwadkar, U., Hawrami, R., Tower, J., Yuan, D.** (2014). Results for aliovalent doping of  $\text{CeBr}_3$  with  $\text{Ca}^{2+}$ . *Journal of Applied Physics*, 15, 034908.
- Hazen, R.M.** (1988). Perovskites. *Scientific American*, 258, 74-81.
- Heyd, J., Scuseria, G.E., Ernzerhof, M.** (2003). Hybrid functionals based on a screened Coulomb potential. *Journal of Chemical Physics*, 118, 8207-8215.
- Jaramillo-Palacio, J.A., Barrera-Bello, E.W., Munévar-Cagigas, J.A., Arnache, O., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2017). Structure and Physical Properties of the  $\text{LaBiFe}_2\text{O}_6$  Perovskite Produced by the Modified Pechini Method. *Journal of Materials Research*, 20, 1309-1316.

- Jaramillo-Palacio, J.A., Muñoz-Pulido, K.A., Arbey-Rodríguez, J., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2021). Electric, magnetic and microstructural features of the  $\text{La}_2\text{CoFeO}_6$  lanthanide ferrocobaltite obtained by the modified Pechini route. *Journal of Advanced Dielectrics*, 11, 2140003.
- King, G. & Woodward, P.M.** (2010). Cation ordering in perovskites. *Journal of Materials Chemistry*, 20, 5785-5796.
- Koehler, W.C. & Wollan, E.O.** (1957). Neutron-diffraction study of the magnetic properties of perovskite-like compounds  $\text{LaBO}_3$ . *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2, 100-106.
- Kresse, G. & Joubert, J.** (1999). From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Physical Review B*, 59, 1758-1775.
- Landínez-Téllez, D.A., Buitrago-Martínez, D., Barrera, E.W., Roa-Rojas, J.** (2014). Crystalline structure, magnetic response and electronic properties of  $\text{RE}_2\text{MgTiO}_6$  (RE= Dy, Gd) double perovskites. *Journal of Molecular Structure*, 1067, 205-209.
- Liechtenstein, A.I., Anisimov, V.I., Zaanen, J.** (1995). Density-functional theory and strong interactions: Orbital ordering in Mott-Hubbard insulators. *Physical Review B*, 52, R5467-R5470.
- Llamasa, D.P., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2009). Magnetic and structural behavior of  $\text{Sr}_2\text{ZrMnO}_6$  double perovskite. *Journal of Physics B*, 404, 2726-2729.
- Lu, J., Günther, A., Schrettle, F., Mayr, F., Krohns, S., Lunkenheimer, P., Pimenov, A., Travkin, V.D., Mukhin, A.A., Loidl, A.** (2010). On the Room Temperature Multiferroic  $\text{BiFeO}_3$ : Magnetic, Dielectric and Thermal Properties. *European Physical Journal B*, 75, 451-460.
- Lufaso, M.W. & Woodward, P.M.** (2001). Prediction of the Crystal Structures of Perovskites Using the Software Program SPuDS. *Acta Crystallographica*, B57, 725-738.
- Lunkenheimer, P., Bobnar, V., Pronin, A.V., Ritus, A.I., Volkov, A.A., Loidl, A.** (2002). Origin of apparent colossal dielectric constants. *Journal of Physics B*, 66, 521051.
- Methfessel, M. & Paxton, A.T.** (1986). High-precision sampling for Brillouin-zone integration in metals. *Journal of Physics B*, 40, 3616-3621.
- Mishra, S.K. & Pandey, D.** (2009). Low temperature x-ray diffraction study of the phase transitions in  $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{TiO}_3$  ( $x=0.02, 0.04$ ): Evidence for ferroelectric ordering. *Applied Physics Letters*, 95, 232910.
- Monkhorst, H.J. & Pack, J.D.** (1976). Special points for Brillouin-zone integrations. *Journal of Physics B*, 13, 5188-5192.
- Murnaghan, F.D.** (1944). The Compressibility of Media under Extreme Pressures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 30, 244-247.
- Myrick, M.L., Simcock, M.N., Baranowski, M., Brooke, H., Morgan, S.L., McCutcheon, J.N.** (2011). The Kubelka-Munk Diffuse Reflectance Formula Revisited. *Applied Spectroscopy Reviews*, 46, 140-165.
- Nieto-Camacho, J.A., Cardona-Vásquez, J.A., Sarmiento-Santos, A., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2020). Study of the microstructure and the optical, electrical, and magnetic feature of the  $\text{Dy}_2\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_{12}$  ferromagnetic semiconductor. *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 10686-10697.
- Pandey, R.K., Stapleton, W.A., Sutanto, I.** (2015). Nature and Characteristics of a Voltage-Biased Varistor and its Embedded Transistor. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 3, 276-283.
- Perdew, J.P., Burke, K., Ernzerhof, M.** (1996). Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Physical Review Letters*, 77, 3865-3868.
- Phokha, S., Pinitsoontorn, S., Maensiri, S., Rujirawat, S.** (2014). Structure, optical and magnetic properties of  $\text{LaFeO}_3$  nanoparticles prepared by polymerized complex method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 71, 333-341.
- Resta, R.** (1994). Macroscopic polarization in crystalline dielectrics: the geometric phase approach. *Reviews of Modern Physics*, 66, 899-915.
- Resta, R.** (1997). Polarization as a Berry Phase. *Europhys. News*, 28, 18-20.
- Sergienko, I.A. & Dagotto, E.** (2006). Role of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction in multiferroic perovskites. *Journal of Physics B*, 73, 094434.
- Sorescu, M., Xu, T., Hannan, A.** (2011). Initial Stage Growth Mechanism of  $\text{LaFeO}_3$  Perovskite through Magnetomechanical Ball-Milling of Lanthanum and Iron Oxides. *American Journal of Materials Science*, 1, 57-66.

- 
- Spaldin, N.A.** (2020). Multiferroics beyond electric-field control of magnetism. *Proceedings of the Royal Society A*, 476, 20190542.
- Triana, C.A., Landínez-Télez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2012). Synthesis process and structural characterization of the  $\text{Sr}_2\text{EuRuO}_6$  complex perovskite. *Journal of Alloys and Compounds*, 516, 179-185.
- Vojta, A., Wen, Q., Clarke, D.R.** (1996). Influence of microstructural disorder on the current transport behavior of varistor ceramics. *Computational Materials Science*, 6, 51-62.
- Wu, J., Mao, S., Ye, Z-G., Xie, Z., Zheng, L.** (2010). Room-temperature ferromagnetic/ferroelectric  $\text{BiFeO}_3$  synthesized by a self-catalyzed fast reaction process. *Journal of Materials Chemistry A*, 20, 6512-6516.
- Xu, J.M., Wang, G.M., Wang, H.X., Ding, D.F., He, Y.** (2009). Synthesis and weak ferromagnetism of Dy-doped  $\text{BiFeO}_3$  powders. *Materials Letters*, 63, 855-857.
- Yamada, I., Takamatsu, A., Ikeno, H.** (2018). Complementary evaluation of structure stability of perovskite oxides using bond-valence and density-functional-theory calculations. *Science and Technology of Advanced Materials*, 19 (1), 101-107.

## Opinión

# Sinergia en las ciencias básicas para la solución de problemas de ingeniería

## Synergy in the basic sciences for the solution of engineering problems

 Horacio Torres-Sánchez

Universidad Nacional de Colombia; Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Artículo presentado para la celebración del Año internacional de las ciencias básicas para el desarrollo sostenible en Colombia, organizado por la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Academia Joven, con el apoyo de la Asociación Colombiana de Facultades de Ciencias

## Resumen

Aparentemente, los fenómenos de golpe de ariete, las sobretensiones electromagnéticas, la teoría de la relatividad general y la solución matemática de una onda viajera son problemas de ingeniería y teorías de las ciencias básicas sin relación entre sí. Sin embargo, un examen histórico muestra la importancia de la acción conjunta en las disciplinas de la Física y la Matemática para dar soluciones en ingeniería, en otras palabras, la sinergia de las ciencias básicas para la solución de problemas de ingeniería.

**Palabras clave:** Ondas viajeras; Fenómeno electromagnético de sobretensiones; Golpe de ariete; Teoría general de la relatividad.

## Abstract

Apparently, water hammer phenomena, electromagnetic surges, the theory of general relativity, and the mathematical solution of a traveling wave are problems of engineering and basic science theories unrelated to each other. However, a historical examination shows the importance of joint action in the physics and mathematics disciplines to offer engineering solutions, in other words, the synergy of basic sciences for the resolution of engineering problems.

**Keywords:** Traveling waves; Electromagnetic phenomenon of surges; Water hammer; General theory of relativity.

## Introducción

Desde que a principios del siglo XX se inició la transmisión de energía eléctrica en corriente alterna mediante las líneas de transmisión, estas han estado sometidas al fenómeno electromagnético de las sobretensiones debidas a las descargas eléctricas atmosféricas o rayos, las maniobras de conexión y desconexión, las fallas en la red o los fenómenos de resonancia, entre muchos otros.

La investigación en ingeniería eléctrica en el mundo se ha volcado en la búsqueda de soluciones al fenómeno electromagnético que afecta negativamente la confiabilidad de los sistemas de energía eléctrica.

### *El fenómeno electromagnético de las sobretensiones*

Los procesos físicos relacionados con la formación de los rayos, propios del campo del electromagnetismo, han sido analizados y medidos por investigadores de todo el mundo, que han desarrollado y perfeccionado diversos modelos para calcular sus parámetros más importantes (Uman, 1987; Uman, 1994; Younes, 2010), con énfasis en la variación

**Citación:** Torres-Sánchez H. Sinergia en las ciencias básicas para la solución de problemas de ingeniería. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):646-655, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1747>

**Editor:** Elizabeth Castañeda

**Correspondencia:**

Horacio Torres-Sánchez;  
htorress@unal.edu.co

**Recibido:** 11 de agosto de 2022

**Aceptado:** 25 de agosto de 2022

**Publicado en línea:** 13 de septiembre de 2022



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

espacial y temporal del rayo (Torres, 2002), y han obtenido parámetros probabilísticos para la zona tropical terrestre (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC, 2008; Torres, 2014) y para las zonas templadas (International Electro-technical Commission - IEC, 2006).

En ingeniería eléctrica una sobretensión es una onda de tensión que supera la tensión nominal de una red produciendo un gran aumento del valor eficaz de la tensión en las líneas de transmisión eléctrica durante un período muy corto, lo que por lo general produce fallas en el sistema de aislamiento de la red. En resumen, cuando un rayo impacta una línea de transmisión de energía eléctrica, se genera una onda viajera, cuya solución nos lleva a la teoría física y matemática de ondas.

Antes de presentar los métodos para el cálculo de sobretensiones es necesario tener en cuenta otros aspectos indispensables para la correcta modelación del problema en sí, entre otros, los fundamentos de la teoría de ondas viajeras, los modelos de las líneas de transmisión, los tipos de parámetros que se utilizan, y las condiciones del problema.

En este contexto, los siguientes apartes dan cuenta del desarrollo histórico de las soluciones del fenómeno electromagnético de las sobretensiones.

### *El golpe de ariete en hidráulica*

En la década de 1930 comenzaron a analizarse algunos problemas que se venían presentando en las tuberías hidráulicas, uno de los cuales recibió el nombre de golpe de ariete. El golpe de ariete o pulso de Zhukowski, llamado así en honor al ingeniero ruso Nikolái Zhukovski, es el principal causante de averías en las tuberías e instalaciones hidráulicas.

El golpe de ariete ocurre porque el fluido hidráulico es ligeramente elástico, y por ello, cuando se ve sometido a cambios súbitos –por ejemplo, el cierre de una válvula en el extremo de una tubería–, las partículas que se han detenido son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y que siguen aún en movimiento. Esto origina una sobrepresión en el fluido que se desplaza por la tubería a una velocidad que puede superar la del sonido. Esta sobrepresión comprime el fluido, reduce su volumen y dilata ligeramente la tubería.

Cuando todo el fluido hidráulico se detiene, cesa el impulso que lo comprimía y tiende a expandirse, en tanto que la tubería, que se había ensanchado ligeramente, tiende a retomar su dimensión normal. Conjuntamente, estos efectos provocan otra onda de presión en el sentido contrario y el fluido, entonces, también se desplaza en dirección contraria, pero, dado que la válvula está cerrada, se produce una depresión con respecto a la presión normal de la tubería. Al reducirse la presión, el fluido hidráulico puede pasar a estado gaseoso formando una burbuja al tiempo que la tubería se contrae. Si la onda viajera no se ve disipada, por ejemplo en un depósito a presión atmosférica, ello se evidenciará al alcanzar el otro extremo de la tubería, cuando sea mitigada progresivamente por la propia resistencia del fluido hidráulico a la compresión y la dilatación de la tubería.

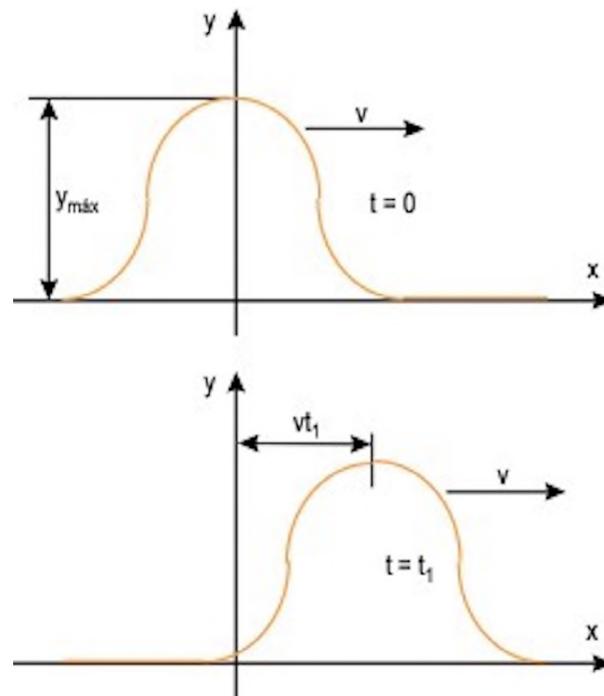
Los problemas de propagación de ondas viajeras como el golpe de ariete, se estudiaron en las décadas de 1920 y 1930, mucho antes de que estuvieran disponibles herramientas computacionales adecuadas, utilizando métodos gráficos.

Básicamente se emplearon dos técnicas: el método del diagrama de retícula propuesto por Bewley (1951) y el método de Bergeron (1949). En la técnica del diagrama de retícula se mantiene un registro de las ondas reflejadas y refractadas, y su magnitud se calcula a partir de los coeficientes de reflexión y refracción, respectivamente (Bernal, 1993).

### *Ondas viajeras*

Para realizar adecuadamente el análisis cualitativo de los efectos de las sobretensiones en sistemas eléctricos, es necesario estudiar los fundamentos de la propagación de ondas, los cuales son la base de los métodos más utilizados para el cálculo de sobretensiones.

Se considera un pulso ondulatorio que viaja hacia la derecha con una rapidez constante  $v$  sobre una cuerda larga estirada como se ve en la **figura 1**. El pulso se mueve a lo largo del eje  $x$  y el desplazamiento transversal de la cuerda se mide sobre la coordenada  $y$ . En cualquier instante la forma del pulso se puede representar por  $y = f(x)$ . Puesto que la rapidez del pulso ondulatorio es  $v$ , este recorre hacia la derecha una distancia  $vt_1$  en un tiempo  $t_1$ .



**Figura 1.** Pulso ondulatorio con rapidez constante  $v$  sobre una cuerda larga estirada

Si la forma del pulso ondulatorio no cambia con el tiempo, el desplazamiento se puede representar por medio de un sistema de referencia estacionario con el origen en 0 para todos los tiempos posteriores, es decir:

$$y = f(x \pm vt)$$

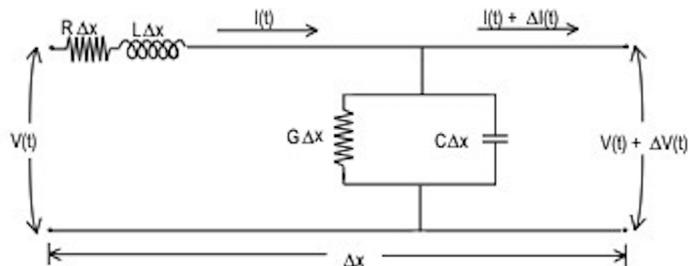
Según la dirección, el desplazamiento puede ser positivo (+) o negativo (-).

Para establecer la formulación matemática de las ondas viajeras electromagnéticas se considerará su propagación a través de un medio determinado, tal como una línea de transmisión, o en el caso hidráulico, una tubería.

Considerando una sección infinitesimal  $Dx$  del conductor, en paralelo a un plano infinito de referencia o tierra, se pueden definir los siguientes parámetros distribuidos del elemento en cuestión:

- R: resistencia por unidad de longitud del circuito conductor-tierra.
- L: inductancia por unidad de longitud del circuito conductor-tierra.
- G: conductancia por unidad de longitud del conductor a tierra.
- C: capacidad por unidad de longitud del conductor a tierra.

Con dichos parámetros, se puede obtener el circuito equivalente de la **figura 2** para la sección  $Dx$  del modelo  $\pi$  de la línea de transmisión (Stevenson, 1962; Torres, 2010):



**Figura 2.** Circuito equivalente para una sección infinitesimal  $Dx$  de un conductor paralelo a tierra

El análisis mediante las leyes de Kirchoff permite obtener las ecuaciones de estado:

$$V(t) + \Delta V(t) = V(t) - \left( R \Delta x \cdot I(t) + L \Delta x \frac{\partial I(t)}{\partial t} \right) \quad (1)$$

$$I(t) + \Delta I(t) = I(t) - \left( G \Delta x \cdot (V(t) + \Delta V(t)) + C \Delta x \frac{\partial (V(t) + \Delta V(t))}{\partial t} \right) \quad (2)$$

Al reordenar las ecuaciones (1) y (2) y llevarlas a una variación con el tiempo se tiene:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta V(t)}{\Delta x} = \frac{\partial V(t)}{\partial x} = - \left( R \cdot I(t) + L \frac{\partial I(t)}{\partial t} \right)$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta I(t)}{\Delta x} = \frac{\partial I(t)}{\partial x} = - \left( G \cdot V(t) + C \frac{\partial V(t)}{\partial t} \right)$$

La solución de estas ecuaciones diferenciales se requiere en el caso particular en el que se desprecian las pérdidas sobre la línea y la distorsión de la onda, es decir, tomando  $R = G = 0$ :

$$\frac{\partial V(t)}{\partial x} = - \left( L \frac{\partial I(t)}{\partial t} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial I(t)}{\partial x} = - \left( C \frac{\partial V(t)}{\partial t} \right) \quad (4)$$

Por lo tanto:

$$\frac{\partial^2 V(t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 I(t)}{\partial t^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 I(t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V(t)}{\partial t^2} \quad (6)$$

y se retoma la ecuación general de onda:

$$\frac{\partial^2 f(t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f(t)}{\partial t^2}, \quad (7)$$

donde  $v$  es la velocidad de la onda y  $f$  es la amplitud.

La solución a la ecuación de una onda viajera, similar a la ecuación (7), la obtuvo a mediados del siglo XVIII el matemático y filósofo francés Jean Le-Rond D'Alambert, quien planteó la solución general de la ecuación (7) como:

$$y = f(x \pm vt)$$

En consecuencia, para las ecuaciones (5) y (6), se tiene que:

$$\frac{1}{v^2} = LC \therefore v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (8)$$

La solución general de las ecuaciones (5) y (6) es del tipo:

$$V(x,t) = f_{(+)}(x - vt) + f_{(-)}(x + vt) \quad (9)$$

$$I(x,t) = g_{(+)}(x - vt) + g_{(-)}(x + vt) \quad (10)$$

El signo (+) indica desplazamiento en un sentido determinado y el signo (-) en el sentido contrario.

Para el fenómeno electromagnético, la relación punto a punto e instante a instante entre las ondas positivas y negativas de tensión y corriente determina una constante llamada impedancia característica ( $Z$ ) del medio de propagación.

$$\frac{V_{(+)}}{I_{(+)}} = Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (11)$$

$$\frac{V_{(-)}}{I_{(-)}} = -Z = -\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (12)$$

Y

$$\frac{1}{v} \times Z = \sqrt{LC} \times \sqrt{\frac{L}{C}} = L \quad (13)$$

$$\frac{1}{v} \times \frac{1}{Z} = \sqrt{LC} \times \sqrt{\frac{C}{L}} = C \quad (14)$$

### Formulación matemática del método de Bergeron

A partir de las ecuaciones (9) y (10), se planteó el método de Bergeron para ondas viajeras, el cual se presentó como método de solución para los problemas del golpe de ariete en hidráulica causados por choques de presión en tuberías.

Louis Bergeron, ingeniero electricista e hidráulico francés, fue profesor en la Ecole Centrale des Arts et Manufactures, también conocida como ECP, Centrale o Centrale Paris.

Bergeron presentó la solución de estas ecuaciones para problemas de hidráulica causados por choques de presión en tuberías en sus publicaciones de 1928 y 1929.

Al reemplazar la ecuación (13) en la (3) y la (14) en la (4), se obtiene:

$$-\frac{\partial V(t)}{\partial x} = \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial (I(t) \cdot Z)}{\partial t} \quad (15)$$

y

$$-\frac{\partial (I(t) \cdot Z)}{\partial x} = \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial V(t)}{\partial t} \quad (16)$$

Al combinar mediante adición y sustracción las ecuaciones (15) y (16), se deduce:

$$\frac{\partial (V(t) \pm I(t) \cdot Z)}{\partial x} = \frac{1}{v} \frac{\partial (V(t) \pm I(t) \cdot Z)}{\partial t},$$

cuya solución, como se dijo anteriormente, es la ecuación de una recta, de la forma:

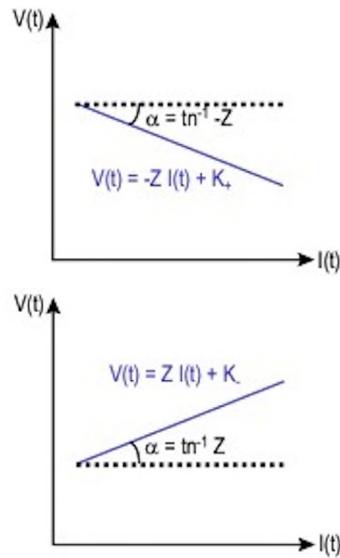
$$V(t) \pm I(t) \cdot Z = f_{\pm}(x \mp vt) = K_{\pm}, \quad (17)$$

siendo  $K_{\pm}$  una constante.

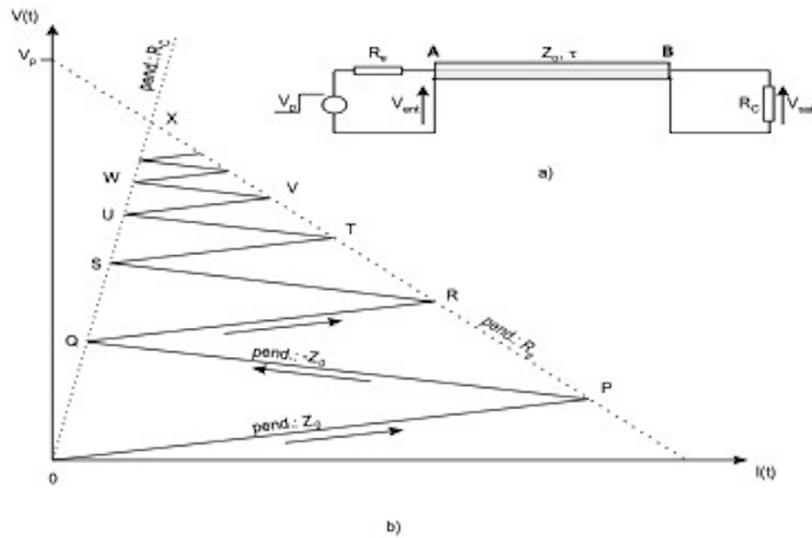
El profesor Bergeron estudió solamente la solución de problemas hidráulicos. Sin embargo, pronto reconoció su utilización universal para la investigación de fenómenos de dispersión electromagnética en conductores. Su trabajo sobre la propagación de ondas a lo largo de líneas y el método gráfico fue presentado en una reunión general de la Société Française des Electriciens y la Société des Ingenieurs Civils de France, el 23 de abril de 1937, pero solo en 1950 apareció una descripción general del método de Bergeron en forma de libro, bajo el título *Du coup de bélier en hydraulique au coup de foudre en électricité* (Del golpe de ariete en hidráulica al golpe de un rayo en electricidad) (Bergeron, 1949).

La interpretación del anterior planteamiento se hace en términos de un marco de referencia de un observador ficticio que se desplaza junto con la onda. Un análisis de este concepto en la época en que Albert Einstein presentó su teoría de la relatividad hace pensar que influyó en el método de Bergeron. Como la velocidad  $v$  de la onda permanece constante, también lo hará la expresión  $(x - vt)$ . La variación constante de posición está dada por la distancia desde el punto inicial A al punto final B del medio de propagación. El tiempo que tarda en recorrer dicha distancia es  $t$ , que define la variación constante en el tiempo. Entonces, la ecuación (17) significa que el cambio de estado de la onda en posición y tiempo se puede representar en un diagrama  $V(t)$  contra  $I(t)$  como una línea recta de pendiente  $-Z$ . Para el caso en que el desplazamiento sea de B hacia A, la pendiente de la recta es  $Z$ . La **figura 3** muestra las rectas descritas, conocidas como líneas rectas de Bergeron.

Como en el método de Bergeron el observador se desplaza a la misma velocidad que la onda, la variable tiempo está implícita, es decir, aparece en el diagrama  $V(t)$  contra  $I(t)$  como un parámetro que se define por sí solo. Para un medio de propagación como el de la **figura 4a**, por ejemplo, una línea de transmisión o una subestación, en el que incide una función de paso de amplitud  $V_p$ , la construcción de la gráfica resultante (**Figura 4b**) comienza con el trazado de las líneas rectas de tensión-corriente de los circuitos equivalentes (Langlois, 1995) a la entrada y a la salida del medio, en este caso es la línea recta que parte de  $(V_p, 0)$  con pendiente  $R_e$  y la que parte del origen con pendiente  $R_C$ .



**Figura 3.** Líneas rectas de Bergeron



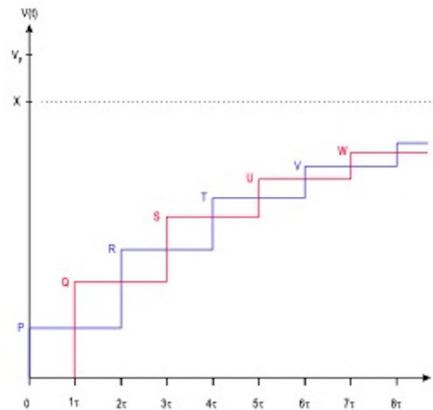
**Figura 4.** Construcción gráfica de las líneas rectas de Bergeron. **a)** Circuito equivalente general. **b)** Gráfica resultante

Como se observa, el instante de tiempo correspondiente al origen de la gráfica es  $-t$ , es decir, el análisis comienza cuando el observador ficticio parte con la onda desde el punto B. En la **figura 5** se muestran las ondas de tensión resultantes en función del tiempo en el punto de entrada A y en el de salida B.

**Aplicación digital del método de Bergeron (Torres, 2010)**

La relativa sencillez del método de Bergeron para el cálculo de sobretensiones electromagnéticas y el auge de la informática incentivaron la utilización de herramientas computacionales que facilitaron el trabajo y brindaron exactitud en los resultados.

Con base en el método de Bergeron, el profesor Dommel de la Universidad Técnica de Munich, Alemania, propuso en la década de 1960 un programa digital que denominó el programa de transitorios electromagnéticos (*Electromagnetic Transients Program*,



**Figura 5.** Ondas de tensión resultantes en función del tiempo en los puntos A y B

EMTP); posteriormente, el investigador y colega de Dommel Scott Meyer, de la Universidad de Lovaina en Bélgica, propuso un programa alternativo para los nacientes computadores personales que denominó programa de transitorios alternativo (*Alternative Transients Program, ATP*), que hoy es de acceso libre y se utiliza ampliamente en investigaciones y en diseños de ingeniería eléctrica en la mayoría de los países del mundo. Con el transcurso del tiempo los investigadores han introducido diferentes subrutinas y mejoras en este programa.

La formulación matemática para la determinación del circuito equivalente de una línea de transmisión eléctrica utilizando los postulados del método de Bergeron es la siguiente.

Se considera inicialmente la ecuación (17).

Además, se tiene en cuenta el tiempo  $\tau$  que tarda un observador ficticio en viajar a lo largo de una línea de transmisión a velocidad  $v$  desde el punto  $m$  hasta el punto  $k$ , tal como se observa en la **figura 6a**. Dicha expresión, encontrada por el observador cuando sale del nodo  $m$  en el tiempo  $(t - \tau)$ , tiene que ser la misma que cuando arriba al nodo  $k$  en el tiempo  $t$ .

Para esto se toma la primera parte de la ecuación (17):

$$v_m(t - \tau) + i_{m,k}(t - \tau) \cdot Z = v_k(t) + Z(-i_{k,m}(t)) \quad (18)$$

Al reordenarla, se obtiene:

$$i_{k,m}(t) = \frac{1}{Z} v_k(t) - \frac{1}{Z} v_m(t - \tau) - i_{m,k}(t - \tau) \quad (19)$$

Análogamente, se puede determinar la ecuación de la corriente que fluye desde el nodo  $m$  hasta el nodo  $k$  en una línea de transmisión:

$$i_{m,k}(t) = \frac{1}{Z} v_m(t) + I_m(t - \tau) \quad (20)$$

Las expresiones  $I_m(t - \tau)$  e  $I_k(t - \tau)$  se interpretan como fuentes equivalentes de corriente, las cuales se conocen en el estado de tiempo  $t$  de la historia pasada  $(t - \tau)$ , y así se puede obtener el circuito equivalente de impedancia (**Figura 6b**), el cual describe totalmente la línea de transmisión eléctrica.

El comportamiento de los elementos que almacenan energía, como la inductancia y la capacidad, obedece al siguiente tipo de ecuación:

$$f(t) = A \frac{dF(t)}{dt} \quad (21) \quad \text{o}$$

$$F(t) = \frac{1}{A} \int_{t-\Delta}^t f(t) \cdot dt \quad (22)$$

Como para cada intervalo de tiempo es necesario calcular una integral, cuyo grado de dificultad varía dependiendo de la función, una buena aproximación es resolver la ecuación por medio del método del área trapezoidal (Thomas, 1987), de manera que la ecuación (22) queda así:

$$F(t) = \frac{\Delta}{2A} \cdot (f(t - \Delta) + f(t)) \quad (23).$$

Los circuitos equivalentes para la inductancia, capacidad y resistencia se presentan en la figura 7.

Las ecuaciones nodales se pueden establecer después de haber reemplazado los circuitos originales de la red por los circuitos equivalentes, así el resultado es un sistema de ecuaciones que matricialmente tiene la forma:

$$[Y] \cdot [v(t)] = [i(t)] - [I] \quad (24),$$

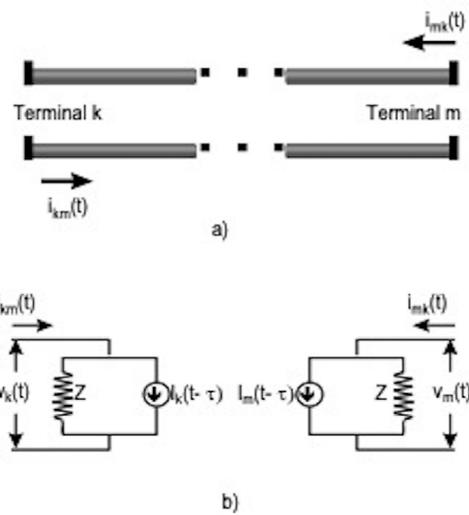


Figura 6. a) Línea de transmisión. b) Circuito equivalente de Dommel

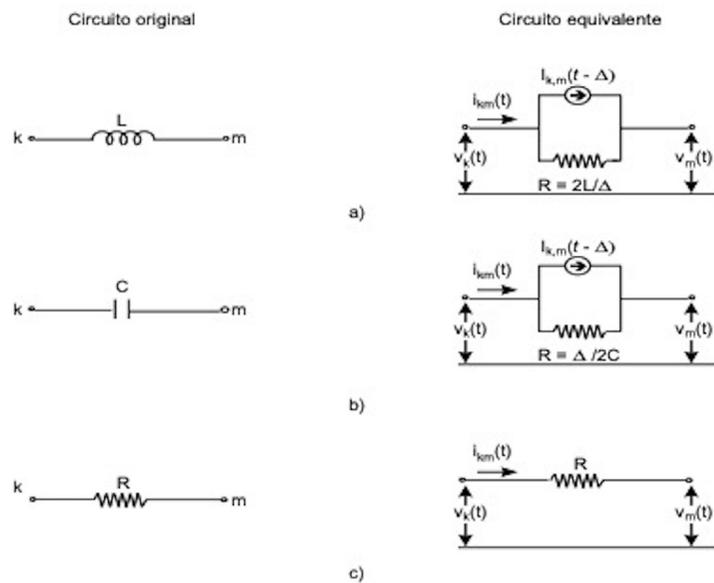


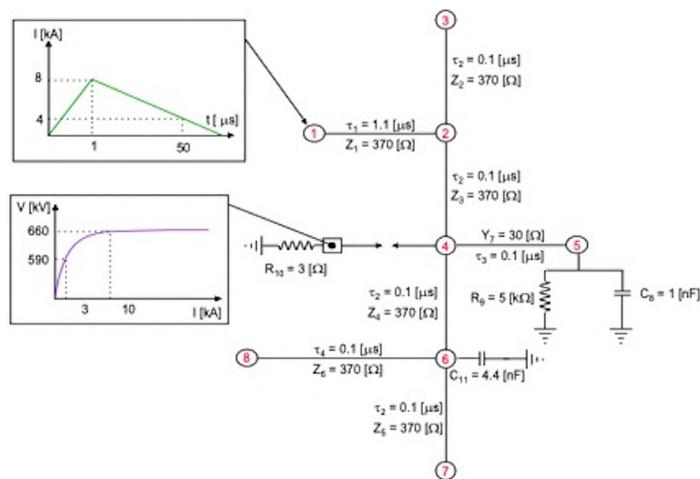
Figura 7. Circuitos equivalentes de Dommel para: a) la inductancia, b) la capacidad y c) la resistencia

donde  $[Y]$  es la matriz de admitancia construida a partir de los circuitos equivalentes,  $[V(t)]$  representa el vector columna de tensiones nodales en el tiempo  $t$ ,  $[i(t)]$  es el vector columna de corrientes nodales inyectadas en la red, e  $[I]$  es el vector columna de corrientes  $I$  construido a partir de las fuentes equivalentes.

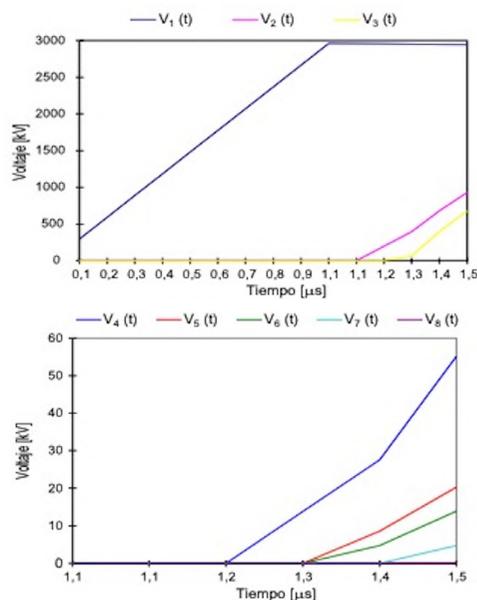
**Ejemplo de aplicación**

La **figura 8** muestra algunos elementos en una subestación eléctrica. En el nodo 1 se presenta una sobrecorriente, en el nodo 5 hay un transformador y en el nodo 4 se instala un descargador de sobretensión (DST). La figura muestra, asimismo, las características de la sobrecorriente y del DST. El método de Dommel permite determinar la tensión que se presentaría en cualquier nodo del sistema.

A manera de conclusión, se presenta una síntesis de los resultados obtenidos para las primeras 15 iteraciones, es decir para los primeros 1.5 [ms]. Es importante observar los instantes de tiempo en los que se presenta tensión en cada nodo (**Figura 9**).



**Figura 8.** Diferentes elementos en una subestación sometida a un fenómeno transitorio electromagnético



**Figura 9.** Ejemplo de aplicación del método de Dommel (tensiones nodales hasta la iteración 15)

## Conclusiones

En este artículo se analizan fenómenos de ingeniería como el golpe de ariete, así como transitorios electromagnéticos que, con la ayuda de la teoría de la relatividad y la solución matemática de una onda viajera propuesta en el siglo XVIII, demuestran cómo una acción conjunta permite una solución a problemas propios de la ingeniería, en otras palabras, la sinergia en las ciencias básicas logra la solución de problemas de ingeniería.

## Conflicto de intereses

Como autor del presente artículo declaro no tener ningún conflicto de intereses real, potencial o aparente, ni relación económica, personal o política que pueda influir en mi juicio.

## Referencias

- Bergeron, L.J.B.** (1949). Du Coup de Bélier en Hydraulique au Coup du Foudre en Électricité. Paris, Dunod. p. 250-258.
- Bernal, M. del C., Camargo, G.E.** (1993). Software para el estudio de transitorios usando ondas viajeras. Trabajo de Grado. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Bewley, L.V.** (1991). Traveling waves on transmission systems. Wiley. New York. p. 321-359.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC.** (2008). Protección contra descargas eléctricas atmosféricas, Norma Técnica Colombiana NTC4552-1,2,3. Bogotá, Colombia.
- International Electrotechnical Commission.** (2006). Standard protection against lightning. IEC 62305-1,2,3. <https://www.iec.ch/about-us>.
- Langlois, P.J.** (1995). Graphical analysis of delay line waveforms: A tutorial. *IEEE. Transactions on Education*, 38 (1), 27-32.
- Stevenson, W.D.** (1962). Elements of Power System Analysis. 2nd Edition. New York. MacGraw-Hill. p. 9339212142
- Thomas, G., Finney, R.** (1987). Cálculo con geometría analítica. Volumen I. Addison-Wesley Iberoamericana. México D. F. p. 155.
- Torres, H.** (2014). Lightning parameters in tropical region for engineering applications. Proceeding International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects, Manaus, Brazil.
- Torres, H.** (2010). Aislamientos eléctricos. Ed. Universidad Nacional-DIB, Bogotá, Colombia. p. 155.
- Torres, H.** (2002). El rayo, mito, ciencia y tecnología. Unibiblos, Bogotá. 153-166.
- Uman, M.A.** (1987). Lightning Discharge. Academic Press. San Diego, CA, 221-236.
- Uman, M.A.** (1994). Natural Lightning. *IEEE. Transactions on Industry Applications*, 30 (3), 785-790. doi: 10.1109/28.293729.
- Younes C., Torres, H.** (2010). Caracterización de los parámetros del rayo en Colombia, Editorial UN, Manizales, Colombia. p. 93-102.

Artículo original

## Exponentes críticos estáticos, efectos de anisotropía, Hall y magneto-calórico, e interacciones magnéticas en cintas de aleaciones basadas en FeCr, FeCo y MnFe

### Static critical exponents, anisotropy, Hall and magneto-caloric effects, and magnetic interactions in FeCr, FeCo, and MnFe-based alloy ribbons

Andrés Rosales-Rivera

Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Manizales, Colombia

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

## Resumen

Se presenta aquí un estudio comparativo de los exponentes críticos ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ), de la temperatura crítica  $T_c$ , la anisotropía magnética, el efecto Hall y el magneto-calórico, así como las interacciones magnéticas para las aleaciones  $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{15}\text{Nb}_4]$ ,  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ , y  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$ , preparadas mediante la técnica denominada hilado en estado de fusión (*melt-spinning*). Los anteriores parámetros críticos y el efecto magneto-calórico se determinaron a partir de mediciones de magnetización. Los valores ( $\beta$ ,  $\delta$ ,  $T_c$ ) para  $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{15}\text{Nb}_4]$  y  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  fueron  $(0,34 \pm 0,09; 4,50 \pm 0,45; 660 \pm 30 \text{ K})$ ,  $(0,52 \pm 0,04; 3,62 \pm 0,06; 481 \pm 2 \text{ K})$ , respectivamente, y para  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$  fue  $(0,51 \pm 0,03; 2,97 \pm 0,03; 318 \pm 8 \text{ K})$ . Las curvas de resistividad Hall  $V_s$ .  $H$  exhiben un campo de inflexión  $H_s$ , campo por debajo del cual se observan los efectos Hall ordinario y extraordinario. Por encima de  $H_s$ , el efecto Hall ordinario predomina, en tanto que el extraordinario no se observa más. El valor de  $H_s$  para  $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{15}\text{Nb}_4]$  y  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  fue 8 kOe y 4,42 kOe, respectivamente, y para  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$  fue 1,84 kOe. El número de portadores de carga  $n_c$  se determinó para  $H > H_s$ , y su valor para  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  y  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$  fue  $2,71 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  y  $129 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente. El cambio en la entropía magnética y la capacidad de enfriamiento relativa debido a un cambio de campo de 10 kOe se evaluaron y sus valores máximos en la proximidad de  $T_c$  para  $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{15}\text{Nb}_4]$ ,  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  y  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$  fueron  $(0,6; 0,75; 0,5) \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  y  $(57,4; 56,6; 25,1) \text{ Jkg}^{-1}$ , respectivamente. Se analizaron los posibles efectos de las interacciones de intercambio y espín-orbita en los resultados anteriores.

**Palabras clave:** Clases de universalidad; Exponentes críticos estáticos; Efecto Hall y efecto magneto-calórico; Aleaciones magnéticas.

## Abstract

This paper presents a comparative study of the critical exponents ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ), the critical temperature  $T_c$ , the magnetic anisotropy, the Hall and magneto-caloric effects, and the magnetic interactions for the alloys  $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{15}\text{Nb}_4]$ ,  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ , and  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$  prepared by using melt-spinning. The above critical parameters and the magneto-caloric effect were determined from magnetization measurements. The values ( $\beta$ ,  $\delta$ ,  $T_c$ ) for  $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{15}\text{Nb}_4]$  and  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  were  $(0.34 \pm 0.09; 4.50 \pm 0.45; 660 \pm 30 \text{ K})$  and  $(0.52 \pm 0.04; 3.62 \pm 0.06; 481 \pm 2 \text{ K})$ , respectively, and for  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$  it was  $(0.51 \pm 0.03; 2.97 \pm 0.03; 318 \pm 8 \text{ K})$ . The Hall resistivity vs.  $H$  curves exhibit an  $H_s$  inflection field below which ordinary and extraordinary Hall effects are observed. Above  $H_s$ , the ordinary Hall effect predominates and the extraordinary one is no longer seen. The  $H_s$  values for  $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{15}\text{Nb}_4]$  and  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  were 8 kOe and 4.42 kOe, respectively, and for  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$ , 1.84 kOe. The number of charge carriers,

**Citación:** Rosales-Rivera A. Exponentes críticos estáticos, efectos de anisotropía, Hall y magneto-calórico, e interacciones magnéticas en cintas de aleaciones basadas en FeCr, FeCo y MnFe. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):656-674, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1686>

**Editor:** María Elena Gómez

**Correspondencia:**

Andrés Rosales-Rivera  
arosalesr@unal.edu.co

**Recibido:** 12 de mayo de 2022

**Aceptado:** 19 de septiembre de 2022

**Publicado en línea:** 30 de septiembre de 2022



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

$n_c$ , was determined for  $H > H_{s^*}$  and its value for  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  and  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_3\text{Sn}_9$  was  $2.71 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  and  $129 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , respectively. The change in magnetic entropy and relative cooling capacity due to a field change of 10 kOe were evaluated and their maximum values close to  $T_c$  for  $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{196}\text{Nb}_4]$  and  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  were (0.6; 0.75)  $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  and (57.4; 56.6)  $\text{Jkg}^{-1}$ , respectively, and for  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_3\text{Sn}_9$ , 0.5  $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  and 25.1  $\text{Jkg}^{-1}$ , respectively. The possible effects of the exchange and spin-orbit interactions on the above results were also analyzed.

**Keywords:** Universality classes; Static critical exponents; Hall and magneto-caloric effects; Magnetic alloys.

## Introducción

Los exponentes críticos estáticos ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\alpha$ ) que caracterizan las transiciones de fase continuas o de segundo orden (TFC) comparten características comunes en materiales o sistemas de naturaleza muy diferente, lo cual les confiere un alto grado de universalidad. Esos exponentes trascienden en importancia la temperatura crítica  $T_c$ , en el sentido de que ésta depende de la naturaleza de las interacciones microscópicas, en tanto que los exponentes dependen solo de unas pocas características generales (**Wilson & Kogut**, 1974; **Kadanoff**, 1976): 1) la dimensión del espacio,  $d$ ; 2) el número de componentes (dimensión) del parámetro de orden,  $D$ , y 3) de si las interacciones son de corto o largo alcance. En la TFC en sólidos, los exponentes críticos no dependen de si el sólido tiene una estructura cristalina o no. Sin embargo, la determinación de los valores de los exponentes que caracterizan la TFC desde un estado ferromagnético a uno paramagnético (FM-PM) en materiales ferromagnéticos amorfos es un problema difícil en el magnetismo de la materia condensada y un tema de investigación que se ha revitalizado recientemente (**Franco et al.**, 2006; **Franco et al.**, 2008; **Rosales-Rivera et al.**, 2019; **Rosales-Rivera et al.**, 2021). La dificultad surge principalmente de la no homogeneidad de los materiales ferromagnéticos amorfos, lo cual causa una variación en la temperatura crítica (Curie)  $T_c$  en toda la muestra que lleva a redondear la transición de fase y, concomitantemente, oscurece mucho el comportamiento crítico magnético. En segundo lugar, los exponentes críticos tienen la posibilidad (**Franco & Conde**, 2012) de asociarse con propiedades de interés práctico como el efecto magneto-calórico (*magnetocaloric effect*, MCE) y la capacidad de enfriamiento relativa (*relative cooling power*, RCP) en materiales ferromagnéticos con TFC. El MCE está asociado con el cambio que experimenta la temperatura ( $\Delta T_{ad}$ ) de un material debido a una variación del campo magnético aplicado de manera adiabática, y la RCP refleja la cantidad de calor que se puede transferir del extremo frío al extremo caliente de un refrigerador describiendo un ciclo termodinámico.

Desde el punto de vista experimental, es conveniente asociar el MCE al cambio de entropía magnética ( $\Delta S_M$ ) debido a la variación del campo magnético en un proceso isotérmico. El MCE constituye el corazón de la tecnología de refrigeración magnética y es de especial importancia para su desarrollo en temperaturas cercanas a la temperatura ambiente (**Tishin & Spichkin**, 2003; **Gschneidner & Pecharsky**, 2000; **Brück**, 2005). Dicha tecnología ofrece diferentes beneficios comparada con las tecnologías convencionales de refrigeración, incluidas las basadas en procesos de compresión-expansión de gases, entre ellos, una mayor eficiencia de enfriamiento (los prototipos de refrigeradores magnéticos pueden lograr el 60 % de la eficiencia ideal, es decir, del ciclo de Carnot, cuando los mejores refrigeradores convencionales existentes en el mercado pueden alcanzar solo el 40 % de dicho ciclo); además, es más amigable con el medio ambiente, ya que no involucra gases asociados con el efecto invernadero o con la disminución del ozono, y, por último, permite fabricar artefactos caseros o industriales menos ruidosos y más compactos, pues el principal material de trabajo es un sólido. Asimismo, la temperatura a la cual ocurre el máximo MCE y su ancho, así como la RCP, son parámetros claves en la aplicación potencial de materiales en refrigeración magnética.

Por otro lado, en las últimas tres décadas, las aleaciones magnéticas en forma de cintas (conocidas como vidrios metálicos) compuestas de metales de transición-3d (Fe, Co, Ni), y metales y metaloides como Cu, Nb, B, Si, C, P, preparadas mediante técnicas de

solidificación rápida como la *melt-spinning*, han suscitado el interés de los investigadores en el campo de la *física de la materia condensada* y del magnetismo básico y aplicado, ya que dichos materiales presentan temperaturas de transición ferromagnética  $T_c$ , buen comportamiento magnético blando, y diferentes fenómenos interesantes en el rango de la temperatura ambiente o por encima de esta. Entre esos fenómenos se encuentran el efecto Hall positivo y el extraordinario, el efecto magneto-impedancia gigante (*giant magnetoimpedance*, GMI), y el efecto magneto-calórico.

El hecho de que dichos materiales tengan una  $T_c$  cercana o moderadamente más alta que la temperatura ambiente facilita el estudio de los procesos físicos cerca del punto crítico. El signo positivo del efecto Hall (**Prudnikova et al., 1997; Gonçalves et al., 2006**) implica que el comportamiento eléctrico de tales materiales difiere del de los metales simples descritos por el modelo de Drude, y el surgimiento del efecto Hall extraordinario indica que la interacción espín-orbita tiene un papel relevante en ellos. El efecto GMI, observado principalmente en materiales ferromagnéticos blandos, consiste básicamente en un enorme cambio de la impedancia compleja ( $Z$ ) cuando el material es sometido a la aplicación de un pequeño campo magnético externo dc ( $H$ ). En el origen de ese efecto se encuentra la interacción espín-orbita. Es interesante señalar que esa interacción es un ingrediente esencial en el surgimiento del efecto Hall extraordinario, como ya se comentó, así como del MCE. El efecto MGI ha propiciado que los vidrios metálicos magneto-impedativos se consideren promisorios en el desarrollo de sensores de alta sensibilidad (**Melnikov et al., 2022; Zou et al., 2019; Yang et al., 2019; Buznikov & Kurlyandskaya, 2019; Rosales-Rivera et al., 2007**).

Por otro lado, debido a que el MCE en vidrios metálicos está asociado con su TF ferromagnética continua, se los considera candidatos promisorios para integrarlos en la tecnología de refrigeración magnética a temperaturas moderadamente altas (**Wang et al., 2003; Luo et al., 2006**). Asimismo, dado que el efecto MCE en las aleaciones Heusler es relativamente alto, estas también son promisorias para aplicaciones de esa tecnología a temperatura ambiente según lo reportado por **Blázquez et al. (2016)**.

El objetivo principal del presente estudio fue determinar y comparar los exponentes críticos estáticos, la anisotropía magnética, el efecto Hall extraordinario, y la respuesta magneto-calórica en las aleaciones de vidrios metálicos  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  y  $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{5}]_{96}\text{Nb}_4$ , y la aleación de tipo Heusler  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$ , preparadas en el mismo equipo de *melt-spinning*. Dichas aleaciones se denominan aquí como FeCr, FeCo, MnFe, respectivamente, y se eligieron porque se ha encontrado que diferentes aleaciones del tipo de los vidrios metálicos (**Wang et al., 2003; Luo et al., 2006; Franco & Conde, 2012; Rosales-Rivera et al., 2019**), así como algunas de tipo Heusler (**Blázquez et al., 2016**), preparadas por *melt-spinning* comparten al menos las siguientes características físicas: 1) sus  $T_c$  están en el rango de la temperatura ambiente o por encima, lo cual implica que la interacción de intercambio en esos materiales es fuerte, y 2) la interacción espín-orbita es un ingrediente común en la emergencia de los efectos Hall extraordinario, GMI y MCE en dichos vidrios metálicos. Si este es el caso para las aleaciones objeto de estudio, sus exponentes críticos estáticos, anisotropía magnética, efecto Hall extraordinario y respuesta magneto-calórica, se destacan como características físicas interesantes para comparar, lo cual aún no se ha hecho.

### Aspectos teóricos

El comportamiento de las cantidades magneto-termodinámicas típicas para un sistema FM de temperaturas cercanas a la  $T_c$ , se caracteriza por los exponentes críticos ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\alpha$ ), los cuales se expresan como (**Yeomans, 1992**):

$$\beta: \text{magnetización en campo magnético cero, } M \sim (-t)^\beta, \quad (1)$$

$$\gamma: \text{susceptibilidad magnética isotérmica en campo magnético cero, } \chi_T \sim |t|^{-\gamma}, \quad (2)$$

$$\delta: \text{isoterma crítica, } H \sim |M|^\delta \text{ signo}(M), \quad (3)$$

$$\alpha: \text{calor específico en campo magnético cero, } C_H \sim |t|^{-\alpha}, \quad (4)$$

Existen diferentes métodos para determinar los valores de esos exponentes críticos y la  $T_c$ ; aquí se usan dos de ellos: el método de **Kouvel & Fisher** (1964) y el método de **Campillo et al.** (2001). El primero, que se fundamenta en la aproximación de campo medio para un sistema FM con interacciones de largo alcance, utiliza un conjunto de datos de magnetización en función del campo externo a temperatura constante y permite determinar los exponentes ( $\beta$ ,  $\gamma$ ) y la  $T_c$ . Este método estipula que la magnetización espontánea  $M_0(T)$  y la susceptibilidad inicial inversa  $\chi^{-1}(T)$  de un FM con TFC en la proximidad de la  $T_c$  son dadas, respectivamente, por:

$$M_0 (dM_0/dT)^{-1} = (T - T_c)/\beta, \quad (5)$$

$$\chi_0^{-1} (d\chi_0^{-1}/dT)^{-1} = (T - T_c)/\gamma, \quad (6)$$

$M_0(T)$  y  $\chi^{-1}(T)$  se obtienen a partir de los planos de Arrott-Kouvel (**Kouvel, 1957**),  $M^2$  Vs.  $(H/M)$ , trazados a temperaturas constantes mediante la extrapolación lineal de los datos de campos altos con el eje  $(M^2)$  para  $T < T_c$  y  $(H/M)$  para  $T > T_c$ . Así, tanto  $M_0 (dM_0/dT)^{-1}$  como  $\chi_0^{-1} (d\chi_0^{-1}/dT)^{-1}$  en función de la temperatura serán líneas rectas en la proximidad de la  $T_c$ . La intersección de esas rectas con el eje  $T$  da la  $T_c$ , en tanto que sus pendientes dan  $1/\beta$  y  $1/\gamma$ , respectivamente.

Por otro lado, el método de **Campillo et al.** (2001) incluye la heterogeneidad de sistemas FM amorfos a través de una distribución gaussiana de temperaturas críticas y permite determinar los exponentes ( $\beta$ ,  $\delta$ ), y un promedio de la temperatura crítica  $T_{c,prom}$ . Ese método supone que la magnetización en función de la temperatura  $M(T)$ , se puede expresar como una distribución de leyes de potencia centradas en temperaturas críticas específicas  $T_c$ , así:

$$M(T) = m_0 \int_{T_c} [(T_c - T)/T_c]^\beta \theta(T_c - T) [1/(2\pi)^{1/2} \Delta T_c] \exp [-(T_c - T_{c,prom})^2/2\Delta T_c^2] dT, \quad (7)$$

donde  $m_0$  es un factor proporcional a la magnetización de saturación,  $\theta(x)$  es la función de Heaviside, la que garantiza que la magnetización sea cero para  $T > T_c$  y  $T_{c,prom}$  y  $\Delta T_c$  representan la temperatura de Curie promediada sobre la muestra y la desviación estándar de la distribución de  $T_c$ , respectivamente.  $\Delta T_c$  se puede escribir como

$$\Delta T_c(H) = \Delta T_c^0 + aH^{1/\eta}, \quad (8)$$

donde  $a$  es una constante no universal que depende de la muestra,  $\Delta T_c^0$  es la contribución independiente del campo magnético a la variación de la  $T_c$  debida a las heterogeneidades presentes en el material, y  $\eta = \beta \cdot \delta$  con  $\delta$  dado por la ecuación (3).

Los exponentes críticos ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) han trascendido el ámbito de los estudios fundamentales. De hecho, **Franco et al.** (2006) mostraron su aplicabilidad para caracterizar la dependencia con el campo del MCE y la RCP y dedujeron que, para materiales con una TF ferromagnética continua que se desvían de la teoría de campo medio, el comportamiento del cambio de entropía magnética en función del campo magnético para  $T = T_c$  viene dado como,

$$(\Delta S_M)_{T=T_c} \propto H^n \quad (9)$$

$$\text{con } n = 1 + [(\beta - 1)/(\beta + \gamma)] = 1 + (1/\delta)[1 - (1/\beta)], \text{ usando } \beta \cdot \delta = \beta + \gamma \quad (10)$$

Estos autores también propusieron que para esos materiales, la RCP como función del campo puede ser expresada a través de una ley de potencia:

$$RCP \propto H^N = H^{1 + (1/\delta)} = H^{1 + (\beta/\eta)} \quad (11)$$

$$\text{con } N = 1 + (1/\delta) = 1 + (\beta/\eta), \quad (12)$$

donde  $\eta = \beta \cdot \delta$  (**Campillo et al.**, 2001).

## Materiales y métodos experimentales

Las muestras estudiadas se prepararon a partir de cintas de las aleaciones de composición nominal  $[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{1.96}]_4\text{Nb}$ ,  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ , y  $\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$ , obtenidas mediante la técnica de *melt-spinning*. Dichas cintas tuvieron 25  $\mu\text{m}$  de espesor en promedio y se cortaron configurando muestras de 8 a 10 mm de longitud y 1,7 mm de ancho. El estado estructural de cada muestra se verificó mediante difracción de rayos X (XRD) utilizando un difractor Rigaku Miniflex II con radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,541 \text{ \AA}$ ) en el rango de

$20^\circ \leq 2\theta \leq 100^\circ$  en pasos de  $0,020 \text{ s}^{-1}$ . Los patrones de difracción (no se muestran aquí) indicaron que el estado estructural de las dos primeras muestras era predominantemente amorfo, en tanto que el de la tercera muestra era policristalino.

El comportamiento magnético de las muestras se estudió mediante un magnetómetro de muestra vibrante (VSM-VersaLab™ de Quantum Design). La  $M(T)$  se midió en el rango de temperatura  $300 \leq T \leq 900 \text{ K}$  para campos magnéticos DC,  $H$ , entre  $0 < H \leq 30 \text{ kOe}$ . Se adquirieron los datos para pasos consecutivos de  $T$  estabilizándola con una precisión de  $\pm 1 \text{ mK}$  antes de cada lectura.  $H$  se aplicó en paralelo a la dirección longitudinal de las cintas para minimizar el efecto del campo de desmagnetización. La  $M(H)$  se midió en el rango de  $0 \leq H \leq 30 \text{ kOe}$  para diferentes temperaturas. También se midieron diferentes lazos de histéresis a temperatura ambiente con campo aplicado  $H$  en las direcciones paralela (magnetización axial) y perpendicular (magnetización transversal) a la longitud de las cintas para estudiar su comportamiento anisotrópico. Además, se hicieron experimentos de análisis termogravimétrico TGA en presencia de un pequeño campo magnético ( $2 \text{ Oe}$ ). Para temperaturas  $300 \leq T \leq 900 \text{ K}$ , con el fin de aproximarse a la temperatura de Curie ( $T_c$ ). En estos experimentos, la balanza del TGA mide el cambio aparente de masa de la muestra al ser atraída o repelida por el pequeño campo magnético, de tal manera que el cambio de peso total debido al cambio de la masa intrínseca de la muestra y al cambio aparente de peso puede ser registrado por la balanza del TGA al ir aumentando la temperatura de la muestra. La aplicación de esta técnica para explorar efectos magnéticos es poco usual, pero en el presente estudio se usó básicamente porque: 1) los materiales bajo estudio eran magnéticamente blandos, de tal manera que respondían rápidamente a un pequeño campo magnético que se pudo obtener fácilmente; 2) estos materiales eran térmicamente estables debido a su composición química (por lo menos en el rango de temperatura en que se desarrollaron los experimentos), así que cualquier cambio de peso en función de la temperatura podía asociarse principalmente a efectos del campo magnético aplicado, o a transformaciones estructurales que pueden llevar a cambios magnéticos, y 3) la alta sensibilidad de la balanza del TGA (Q500 TA® Instruments) usada.

El estudio del efecto Hall se realizó a temperatura ambiente en un equipo instrumentado en el laboratorio por **Melo-Quintero et al.** (2010). El voltaje Hall se midió para campos magnéticos DC,  $H$ , entre  $-10 < H < 10 \text{ kOe}$ , y varias corrientes eléctricas de corriente continua  $I_{DC}$  aplicadas a las muestras, las cuales variaron entre  $20 \leq I_{DC} \leq 100 \text{ mA}$ . Se adquirieron datos para los pasos consecutivos de  $H$ , estabilizando  $H$  antes de cada lectura. El cambio de entropía magnética  $\Delta S_M$  se evaluó usando una aproximación numérica a la siguiente ecuación para diferentes intervalos de campo magnético,

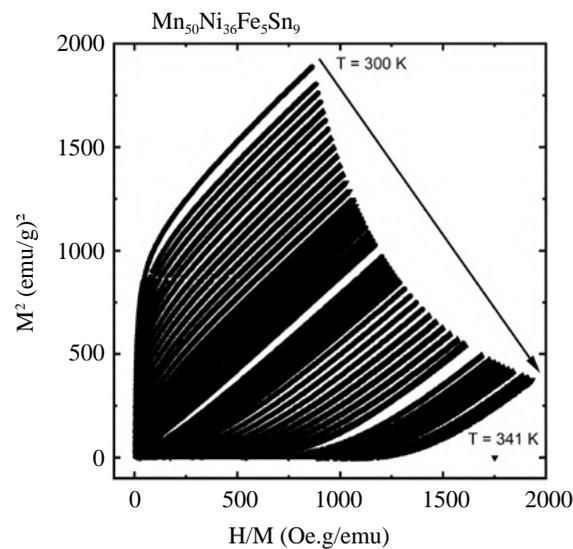
$$\Delta S_M = \int_0^H (\partial M / \partial T)_H dH \quad (13)$$

## Resultados y discusión

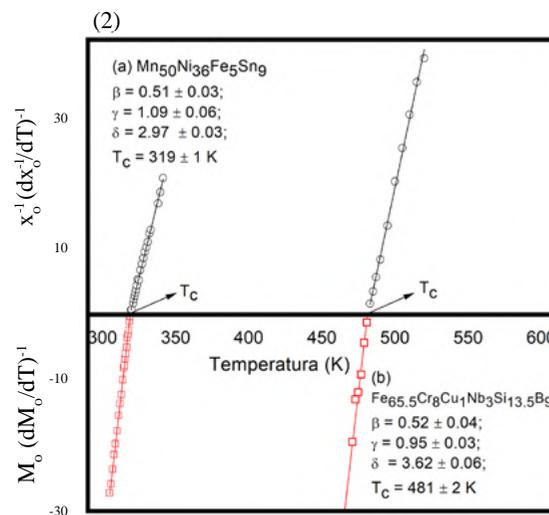
### *Determinación de los parámetros críticos ( $\beta$ , $\gamma$ , $T_c$ ) usando el método de Kouvel-Fisher*

La aplicación de este método a la muestra MnFe se ilustra a continuación. En la **figura 1** se presentan sus correspondientes planos de Arrott-Kouvel trazados a partir de un conjunto de datos (no ilustrados aquí) de isoterma de magnetización ( $M$  vs.  $H$ ) para un conjunto de 55 temperaturas diferentes incluyendo la temperatura crítica  $T_c$ . Esos planos muestran curvaturas intrínsecas, las cuales indican que esa muestra, cuyo estado estructural es policristalino, tiene algún grado de heterogeneidad. Curvaturas intrínsecas, pero más fuertes, se observan también en los planos de Arrott-Kouvel de la muestra FeCr, cuyo estado estructural es amorfo como se explicó anteriormente. Dichas curvaturas dificultan la determinación de  $T_c$  con buena precisión. A pesar de esto, en un intento por determinar los parámetros críticos ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $T_c$ ) de dichas muestras, aquí se utilizaron los datos de  $M_0(T)$  y de  $\chi^{-1}(T)$  obtenidos desde esos planos para ser tratados según el método de Kouvel-Fisher (Ecuaciones 5 y 6).

A partir de los datos  $M_0(T)$  y  $\chi^{-1}(T)$  correspondientes a ambas muestras se obtuvieron los datos de  $M_0(dM_0/dT)^{-1}$  y  $\chi_0^{-1}(d\chi_0^{-1}/dT)^{-1}$  para las diferentes temperaturas de trabajo, los cuales se grafican en la **figura 2**. Los valores de  $(\beta, \gamma, T_c)$  se determinaron a partir de un ajuste de mínimos cuadrados del conjunto de datos de la **figura 2** y se presentan en la **tabla 1**. Ese conjunto de datos se limitó al intervalo de campo  $1 < H < 10$  kOe, para el cual los planos de Arrott-Kouvel exhiben un comportamiento lineal con un factor R-cuadrado del orden de 0,99 y 0,98 para MnFe y FeCr, respectivamente. Los valores para  $(\beta, \gamma)$  de ambas muestras fueron cercanos a los de la clase de universalidad de campo medio con interacciones de largo alcance. Es oportuno comentar que existe una pequeña diferencia de temperatura entre  $T_c$ , determinada a partir de  $M_0(T)$  y de  $\chi^{-1}(T)$  en la ecuación (5), y la determinada de  $\chi^{-1}(T)$  dada por la ecuación (6), como se puede observar en la **figura 2**. Este hecho refleja la heterogeneidad de las muestras y es compatible con las curvaturas intrínsecas de las gráficas de Arrott-Kouvel.



**Figura 1.** Planos de Arrott-Kouvel,  $M^2$  Vs.  $(H/M)$  para MnFe



**Figura 2.** Parámetros críticos  $(\beta, \gamma, T_c)$  para **a)** MnFe y **b)** FeCr. Los símbolos (◻, o) corresponden a datos de  $M_0(T)$  y  $\chi^{-1}(T)$ , respectivamente.

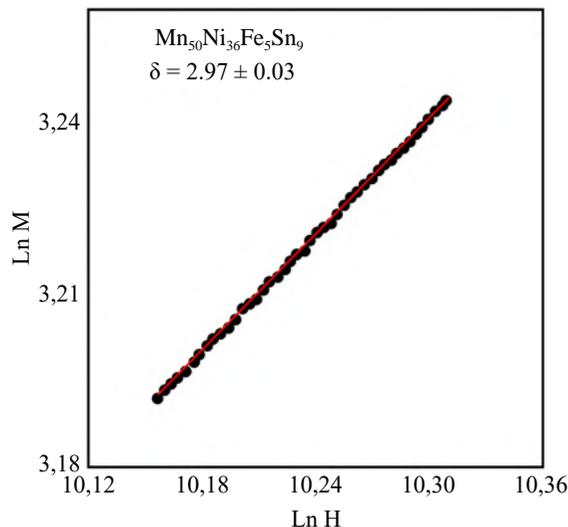
Por otro lado, el valor de  $\delta$  para cada una de las muestras se determinó utilizando una gráfica  $\ln M$  Vs.  $\ln H$  para  $T = T_c$ . Ese procedimiento se ilustra en la **figura 3** para MnFe; se observa que los datos  $\ln M$  Vs.  $\ln H$  siguen una buena relación lineal. Un comportamiento similar se observó en la muestra FeCr. El valor de  $\delta$  determinado de esta manera se presenta en la **tabla 1** para ambas muestras. Nótese que el valor de  $\delta$  se encuentra en el rango de los observados experimentalmente en sistemas FM (**Collins, 1989**). Además, es coherente con el valor obtenido independientemente al usar la relación de escala  $\delta = 1 + \gamma/\beta$  de **Widom (1965)**. Por otro lado, utilizando los valores anteriores para  $(\beta, \gamma)$  en la relación de escala  $\alpha = 2(1 - \beta) - \gamma$  de **Rushbrooke (1963)**, se obtuvo el valor del exponente  $\alpha$  (**Tabla 1**). La confiabilidad de los anteriores parámetros críticos se examinó a la luz de la hipótesis de escala sistematizada por **Griffiths (1967)**. Dicha hipótesis establece que para un sistema FM, el escalamiento de su ecuación de estado se puede expresar como,

$$M/|t|^\beta = f_{\pm}(H/|t|^{(\beta+\gamma)}), \quad (14)$$

donde  $f_{\pm}$  es una función de escala, los signos más y menos corresponden a temperaturas por encima y por debajo de  $T_c$ , respectivamente, y  $|t| = (T - T_c)/T_c$ , de tal manera que una gráfica de  $(M/|t|^\beta)$  Vs.  $(H/|t|^{(\beta+\gamma)})$  en la región crítica dará dos curvas diferentes, una para  $T > T_c$  y la otra para  $T < T_c$ . Utilizando los valores de  $(\beta, \gamma, T_c)$  para ambas muestras, se verificó dicha hipótesis de escala para varias temperaturas en el intervalo  $|t| \leq 2 \times 10^{-2}$  y  $1 \leq H \leq 10$  kOe, y se encontró que los valores de  $(\beta, \gamma)$  cumplían satisfactoriamente la hipótesis de escala. Esto se ilustra en la **figura 4** para la muestra MnFe. Allí se observa que la variable dependiente escalada  $(M/|t|^\beta)$  se expande por lo menos tres órdenes de magnitud y que los datos escalados colapsan bien en dos ramas, una para  $T > T_c$  (región paramagnética) y otra para  $T < T_c$  (región ferromagnética). En FeCr, los correspondientes datos escalados también presentaron un colapso en dos ramas, que era el esperado de acuerdo a la hipótesis de escala, e indicaba que los valores obtenidos para los exponentes críticos eran confiables dentro del error experimental.

#### **Determinación de los parámetros críticos $(\beta, \delta, T_{c_{prom}})$ usando el método de Campillo et al. (2001)**

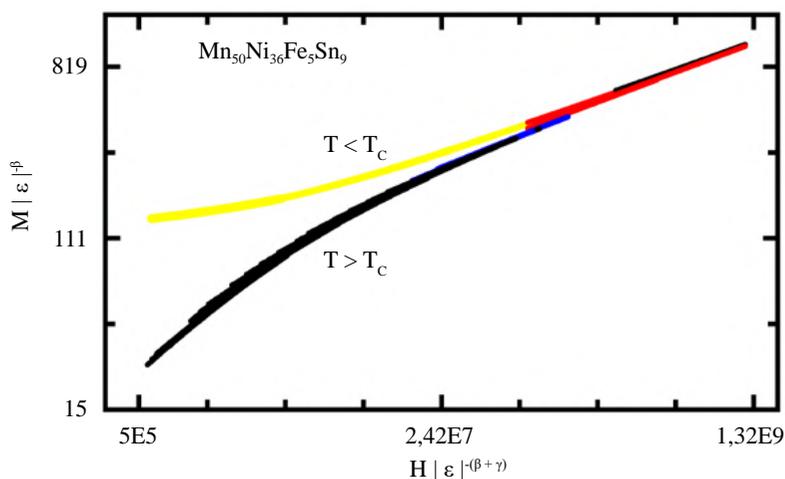
Este método se aplicó a las muestras de FeCr y FeCo. Los datos experimentales y los numéricos obtenidos a través del ajuste de los datos experimentales usando la ecuación (7) para la  $M(T)$  de la muestra FeCr, la cual corresponde a este método, se presentan en la **figura 5**, donde se observa que las curvas de magnetización disminuyen con el aumento



**Figura 3.**  $\ln M$  vs.  $\ln H$  a  $T = T_c$  para MnFe, de donde se obtuvo el valor de  $\delta$ . La línea en color rojo corresponde a un ajuste de los datos por el método de mínimos cuadrados.

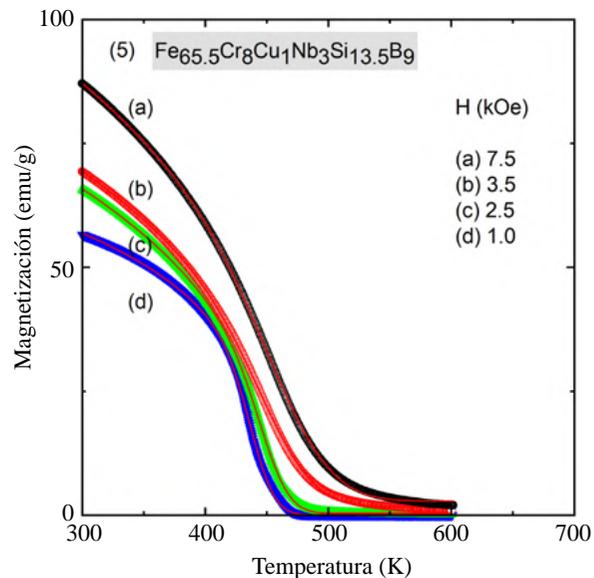
**Tabla 1.** Valores para los exponentes ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\alpha$ ), temperaturas críticas y exponentes ( $n$ ,  $N$ )

Muestra y modelos	Método de Kouvel-Fisher	Método de Campillo-Berger
$\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$	$\beta = 0,52 \pm 0,04$ ; $\gamma = 0,95 \pm 0,03$ $\delta = 3,62 \pm 0,06$ ; $\alpha = 0,01$ $T_C = 481 \pm 2 \text{ K}$ TGA: $T_C = 445 \pm 5\text{K}$ ( $n$ , $N$ ): Predicción de Franco $n = 0,74$ ; $N = 1,27$ Experimental $n = 0,55 \pm 0,08$ ; $N = 0,58 \pm 0,05$	$\beta = 0,41 \pm 0,02$ ; $\delta = 4,58 \pm 0,46$ $T_{C,\text{prom}} = 461,7 \pm 24,6 \text{ K}$ TGA: $T_C = 445 \pm 5\text{K}$ ( $n$ , $N$ ): Predicción de Franco $n = 0,67$ ; $N = 1,21$
$[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_5]_{96}\text{Nb}_4$	No hay datos disponibles	$\beta = 0,34 \pm 0,09$ ; $\delta = 4,50 \pm 0,45$ $T_{C,\text{prom}} = 660 \pm 30 \text{ K}$ TGA: $T_C = 642,8 \pm 0,9 \text{ K}$ ( $n$ , $N$ ): Predicción de Franco $n = 0,56$ ; $N = 1,22$ Experimental $n = 0,64 \pm 0,02$ ; $N = 1,15 \pm 0,09$
$\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$	$\beta = 0,51 \pm 0,03$ ; $\gamma = 1,09 \pm 0,06$ $\delta = 2,97 \pm 0,03$ ; $\alpha = -0,11$ $T_C = 318 \pm 8 \text{ K}$ TGA: $T_C = 319 \pm 1 \text{ K}$ ( $n$ , $N$ ): predicción de Franco $n = 0,68$ ; $N = 1,33$ Experimental $n = 1,1 \pm 0,1$ ; $N = 1,3 \pm 0,5$	No hay datos disponibles
3d-Ising	3d-XY	3d-Heisenberg
$\beta = 0,3258 \pm 0,0014$ ; $\gamma = 1,24$ ; $\delta = 4,82 \pm 0,01$ ; $\alpha = 0,10$ ; $n = 0,572$ ; $N = 1,21$	$\beta = 0,346 \pm 0,009$ ; $\gamma = 1,316 \pm 0,009$ $\delta = 4,81 \pm 0,08$ ; $\alpha = -0,007 \pm 0,009$ $n = 0,61$ ; $N = 1,21$	$\beta = 0,3645 \pm 0,0025$ ; $\gamma = 1,39$ $\delta = 4,80 \pm 0,04$ ; $\alpha = -0,12$ $n = 0,64$ ; $N = 1,21$
Campo medio $\beta = 0,5$ ; $\gamma = 1$ ; $\delta = 3$ ; $\alpha = 0$ $n = 0,67$ ; $N = 1,34$		

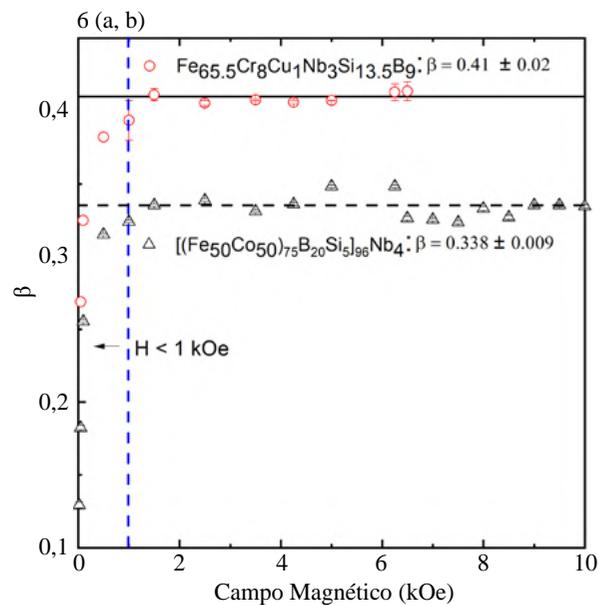


**Figura 4.** Verificación de la hipótesis de escala de la ecuación de estado magnética para ( $\beta$ ,  $\gamma$ ) para MnFe

de la temperatura y tienden a cero a través de una pequeña cola. Esa caída de tipo cola se debe tanto a la heterogeneidad magnética de la muestra como al efecto del campo magnético de destruir la transición de fase FM-PM. Resultados similares (no se muestran aquí) se obtuvieron para la muestra de FeCo. Los valores obtenidos por este método para  $\beta$  en función del campo magnético en las dos muestras se ilustran en la **figura 6a, b**, respectivamente. Nótese que  $\beta$  exhibe primero una dependencia notable del campo hasta cierto valor de campo  $H_{\text{pequeño}}$  (del orden de 1 kOe en cada muestra). Para  $H > 1$  kOe esa dependencia se vuelve muy débil, lo que resulta en un comportamiento casi constante de  $\beta$  en función del campo. En el marco de la precisión experimental, el comportamiento



**Figura 5.** Datos experimentales (símbolos) y ajustados numéricamente (líneas en color rojo) usando la ecuación (7) para  $M$  Vs.  $T$  en diferentes campos para FeCr



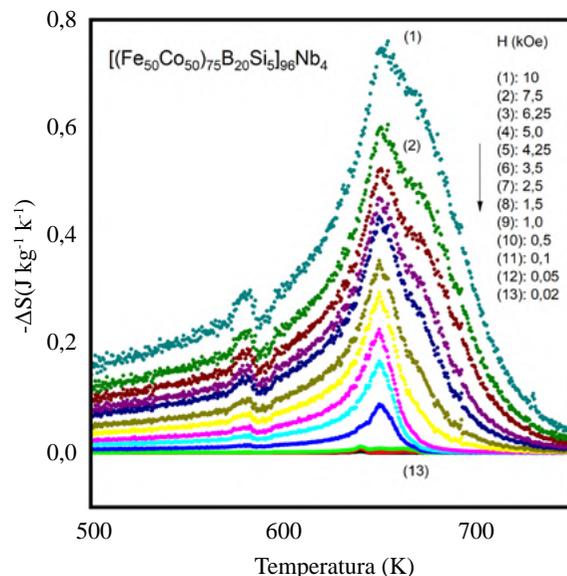
**Figura 6.**  $\beta$  Vs.  $H$  para **a)** FeCr y **b)** FeCo. Las líneas (a) continua y (b) en trazos representan el valor promedio de  $\beta$  obtenido para  $H > 1$  kOe.

de  $H > 1$  kOe es consistente con el supuesto teórico involucrado en la deducción de la ecuación (7) de que  $\beta$  no depende del campo magnético, aunque el comportamiento para  $H < 1$  kOe se desvió de ese supuesto, lo que podría estar asociado con el hecho de que cuando un sistema FM está expuesto a un campo magnético externo, sus dominios no pueden alinearse completamente a lo largo del campo si el campo aplicado es pequeño. Como lo estipuló por primera vez **Kouvel** (1957), y lo reiteró *más tarde* **Aharoni** (1986), una condición esencial para la determinación de exponentes críticos estáticos en sistemas ferromagnéticos es que todos sus dominios estén alineados con el campo magnético aplicado. Siguiendo este supuesto, el exponente  $\beta$  se determinó extrapolando las curvas  $\beta$  Vs.  $H$  desde los campos altos ( $H > 1$  kOe, región de saturación) hasta el campo cero. Los valores del exponente crítico  $\beta$  obtenidos de esta manera para las diferentes muestras se dan en la **tabla 1**, junto con los valores para  $\delta$  obtenidos utilizando la ecuación (8). Además, los valores de ( $\beta, \gamma, \delta, \alpha$ ) para Fe, Co, y los modelos de Ising, XY, Heisenberg y de campo medio, se incluyeron también en la tabla para comparación. La temperatura promedio  $T_{C, prom}$ , que en el presente caso correspondió a la temperatura de Curie  $T_C$ , es otro parámetro obtenido a partir del ajuste de las curvas de magnetización usando la ecuación (7), cuyos valores se incluyen en la **tabla 1**.

Los valores obtenidos para ( $\beta, \gamma, \delta$ ) con los dos *métodos indican que FeCo pertenece a la clase de universalidad 3d-XY con interacciones de corto alcance*, en tanto que FeCr y MnFe pertenecen a la clase de universalidad de campo medio con interacciones de largo alcance. La consistencia entre los valores determinados para ( $\beta, \gamma, \delta$ ) por ambos métodos es de especial interés debido a que indica que son confiables, lo que ya se discutió la luz de la hipótesis de escala.

**Exponentes críticos y el efecto magneto-calórico**

El efecto magneto-calórico de cada muestra se determinó mediante la cuantificación del cambio de entropía magnética isotérmica  $\Delta S_M$  debido a la aplicación del campo magnético usando la ecuación (9) para diferentes intervalos de campo magnético. En la **figura 7** se presenta un conjunto de curvas ( $-\Delta S_{max}$ ) Vs.  $T$  para la muestra de FeCo obtenido como se explicó anteriormente. Cada curva exhibió un máximo localizado en la misma temperatura  $T_{(-\Delta S_{max})}$ . Cada una de las curvas ( $-\Delta S_{max}$ ) Vs.  $T$  de las otras muestras también exhibió un máximo, el cual, como en la muestra de FeCo, se localizó a la misma temperatura  $T_{(-\Delta S_{max})}$ , la cual difirió para cada muestra. En las tres muestras, la temperatura  $T_{(-\Delta S_{max})}$  cayó



**Figura 7.** Ilustración de ( $-\Delta S_M$ ) Vs.  $T$  debido a la aplicación del campo magnético en FeCo

en el rango de su correspondiente  $T_C$ . Este hecho sugiere que el máximo en las curvas  $(-\Delta S_{max})$  Vs.  $T$  es una manifestación de la transición de fase continua FM que ocurre en la temperatura crítica  $T_C$  en esas muestras y, además, se enmarca en los argumentos teóricos de **Franco et al.** (2009). Por otro lado, la amplitud del máximo  $(-\Delta S_{max})$  evaluada en  $T_{(-\Delta S_{max})}$  para  $\Delta H = 10$  kOe en FeCo, FeCr y MnFe fue de (0,6; 0,75; 0,5)  $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ , respectivamente. Otra característica observada en las curvas  $(-\Delta S_{max})$  Vs.  $T$  fue que el máximo  $(-\Delta S_{max})$  era *más amplio en las muestras* de FeCo y FeCr que en la de MnFe. A partir de las curvas  $(-\Delta S_{max})$  Vs.  $T$  se obtuvo el valor de RCP de cada muestra, calculado según lo estipulado por **Tishin & Spichkin** (2003) como  $\text{RCP} = (-\Delta S_{max}) \times \delta T_{\text{FWHM}}$ , donde  $(-\Delta S_{max})$  es la máxima disminución de entropía con respecto a la temperatura y  $\delta T_{\text{FWHM}}$  es el ancho evaluado a la altura media del máximo de entropía. Los valores para RCP obtenidos de esta manera se presentan en la **tabla 2**: los de FeCo, FeCr y MnFe fueron (57,4; 56,6; 25,1)  $\text{Jkg}^{-1}$ , respectivamente. Las dos primeras muestras, que presentaron la mayor RCP, cumplían mejor con el compromiso entre la magnitud del cambio de entropía magnética y el ancho del máximo requerido para que un material se considere promisorio y pueda aplicarse como uno funcional en la tecnología de refrigeración magnética siguiendo los argumentos teóricos de **Wood & Potter** (1985). Sin embargo, dichos valores para RCP son menores en comparación con los de otras aleaciones como  $\text{Gd}_5\text{Ge}_2\text{Si}_2$  (200  $\text{Jkg}^{-1}$  a  $H = 5\text{T}$ ) (**Provenzano et al.**, 2004), pero del mismo orden de magnitud para las aleaciones Heusler  $\text{Co}_2\text{Ti}_{0,75}\text{Sn}_{1,25}$  (71  $\text{Jkg}^{-1}$  a  $H = 5\text{T}$ ), y  $\text{Co}_2\text{Ti}_{0,5}\text{Sn}_{1,5}$  (45,2  $\text{Jkg}^{-1}$  a  $H = 5\text{T}$ ) (**Remya et al.**, 2021),  $\text{Mn}_{39,5}\text{Fe}_{8,5}\text{Ni}_{41}\text{Sn}_{11}$  y  $\text{Mn}_{37,5}\text{Fe}_{10,5}\text{Ni}_{41}\text{Sn}_{11}$  (40,2  $\text{Jkg}^{-1}$  y 36,7  $\text{Jkg}^{-1}$  a  $H = 1,4\text{T}$ ) (**Ghosh et al.**, 2021).

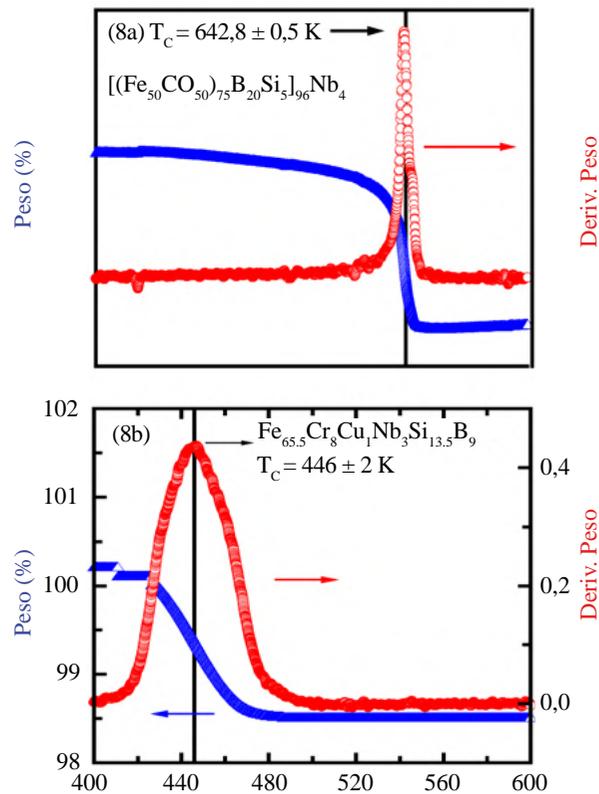
A partir de las gráficas logarítmicas de  $(-\Delta S_M)$  y la RCP en función del campo magnético (proceso de linealización no ilustrado aquí), se determinaron los valores para los exponentes  $n$  y  $N$ , respectivamente (**Tabla 2**). Es de particular interés comparar dichos valores con los de  $n$  y  $N$  previstos por las ecuaciones (10) y (12), respectivamente. Para la muestra de FeCo, la evaluación de la ecuación (12) usando sus correspondientes valores de  $(\beta, \delta)$  y los del modelo 3d-XY predijo un valor de  $n$  razonablemente comparable con el determinado experimentalmente a partir de las curvas  $(-\Delta S_M)$  Vs.  $T$ . Este no fue el caso para las otras muestras, en las que el valor de  $n$  previsto por esa ecuación se desvió considerablemente de aquel determinado experimentalmente. Por otro lado, para las muestras de FeCo y MnFe, el uso de la ecuación (12) con sus correspondientes valores de  $\delta$  predijo un valor de  $N$  muy comparable con el determinado experimentalmente a partir de las curvas RCP Vs.  $T$ , pero no así para la muestra de FeCr, en la que se registró un notable desvío entre el valor de  $N$  previsto y el determinado experimentalmente.

### **Análisis termogravimétrico TGA y temperatura crítica**

La **figura 8a, b** (curvas en color azul) ilustra los termogramas magnéticos de las muestras FeCo y FeCr, respectivamente. Estos se obtuvieron al incrementar la temperatura ambiente de las muestras hasta una alta temperatura a una velocidad de  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  en una atmósfera de gas de nitrógeno de grado analítico para un campo magnético externo fijo de  $H = 2\text{ Oe}$ . Las dos muestras presentaron una visible pérdida de peso que se extendió a través de una pequeña cola a medida que la temperatura aumentó. Ese comportamiento es similar a la disminución de tipo cola observada en las curvas de magnetización en las proximidades de

**Tabla 2.** Comparación de  $(-\Delta S_M)$  y (RCP) para las aleaciones bajo estudio

Muestra	Cambio de campo (kOe)	$-\Delta S_M$ ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	RCP ( $\text{Jkg}^{-1}$ )
$\text{Fe}_{65,5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$	10	0,57	56,6
$[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{5,96}]\text{Nb}_4$	10	0,75	57,4
$\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$	10	0,5	25,1



**Figura 8.** Termograma magnético para a) FeCo y b) FeCr

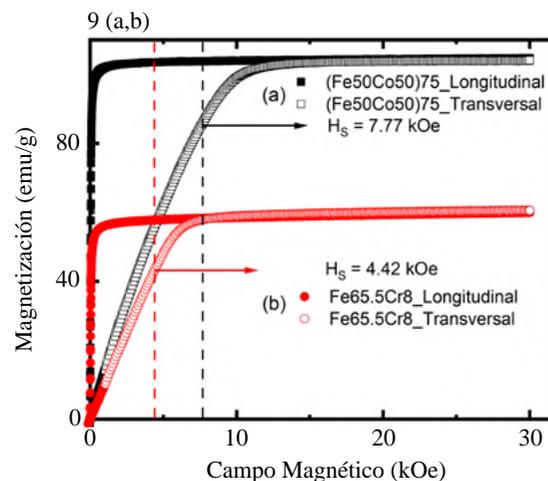
$T_c$  discutida previamente. Las curvas en color rojo de las anteriores figuras corresponden a la derivada térmica de los termogramas. Cada una de esas derivadas exhibe un máximo relativamente estrecho y bien definido en una cierta temperatura de  $T = T_{MAX-TGA}$ . En contraste con esos máximos estrechos y bien definidos, un máximo débil en  $T_{MAX-TGA}$  se encontró en la derivada térmica del termograma de la muestra de MnFe. Es interesante anotar que cada valor de  $T_{MAX-TGA}$  coincidió razonablemente bien (dentro del error experimental) con el correspondiente valor de  $T_c$  en campo cero obtenido mediante los métodos de **Kouvel & Fisher** (1964) y **Campillo et al.** (2001). Los máximos observados en esas derivadas son indicios de una transición de fase FM-PM en la proximidad de  $T_c$ , y ayudan a determinar esta temperatura. Ello se justificó al considerar la coincidencia entre  $T_{MAX-TGA}$  y  $T_c$  y porque los sensores de temperatura empleados en los experimentos de magnetización y TGA fueron previamente calibrados. Por otro lado, es factible que el debilitamiento del máximo de la derivada térmica del termograma en la muestra de MnFe no se deba completamente a la destrucción de la transición de fase FM-PM causada por el campo magnético, dado que este campo es muy pequeño, del orden de 2 Oe. Una posible explicación de este comportamiento es que el ordenamiento ferromagnético en esta muestra fue incipiente o débil, lo cual es coherente con estudios de espectroscopia Mössbauer (**Saccone, 2021**) hechos en esa aleación, que mostraron dobletes de interacción cuadrupolar y no sextetos magnéticos bien definidos, e indica que el magnetismo en esa aleación se puede asociar con un acoplamiento ferromagnético entre los elementos de Mn, Ni y Sn.

#### **Exponentes críticos y algunas interacciones magnéticas**

*Anisotropía magnética y efecto Hall extraordinario.* Como se mencionó en la introducción, un aspecto básico de los exponentes críticos es su dependencia del rango de las interacciones magnéticas, y si son de corto o largo alcance. Por ello, el conocimiento sobre la manifestación de las interacciones magnéticas es esencial para entender los valores

asumidos por los exponentes críticos. Entre las diferentes interacciones magnéticas, aquí se abordaron las de intercambio, las de espín-orbita y las de Ruderman–Kittel–Kasuya–Yosida (RKKY) mediante el análisis de los valores asumidos por la temperatura de Curie  $T_C$ , de los datos de anisotropía y del efecto Hall, respectivamente, obtenidos experimentalmente. La interacción de intercambio, que es de corto alcance, está íntimamente relacionada con la  $T_C$  y la interacción espín-orbita, también de corto alcance, está en el corazón tanto del efecto de anisotropía magnética como del efecto Hall extraordinario. La interacción RKKY, en el camino entre el mediano y el largo alcance, cumple un papel importante en el acoplamiento entre momentos localizados vía los electrones de conducción en metales; es decir, está relacionada con la densidad de los portadores de carga  $n_c$ . Con relación a la interacción de intercambio, es importante tener en cuenta que los valores altos de  $T_C$  implican interacciones de intercambio fuertes. Así, a partir de la proporcionalidad entre dicha interacción y la  $T_C$  (ver los valores de  $T_C$  en la **tabla 1**), se pudo establecer que, en el caso presente, la interacción de intercambio fue comparativamente más fuerte en FeCo que en FeCr y MnFe, siendo más débil en MnFe. La interacción espín-orbita siguió un comportamiento similar a la interacción de intercambio en dichas aleaciones, como se explica a continuación.

Los resultados para los ciclos de histéresis axial y transversal en función del campo magnético obtenidos a temperatura ambiente para FeCo y FeCr se ilustran en la **figura 9** a, b, respectivamente, para su comparación. En la **figura 10** a, b, c se presentan las curvas del efecto Hall en función del campo magnético obtenidas a temperatura ambiente para FeCo, FeCr, y MnFe. Los lazos de histéresis exhibieron una clara anisotropía magnética, pues a lo largo de la dirección longitudinal es más fácil magnetizar las muestras que en la dirección transversal. Una estimación de la anisotropía magnética se puede obtener determinando el área incluida entre las curvas de magnetización a lo largo de esas direcciones. En la **figura 9** a, b se observa que el área entre los lazos de histéresis longitudinal y transversal fue mayor en FeCo que en FeCr y, así, la anisotropía magnética fue mayor en FeCo que en FeCr. El ciclo de histéresis (no se muestra aquí) para MnFe también presentó anisotropía magnética, siendo esta levemente menor que la de  $\text{Fe}_{65.5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  y la de FeCo. Este hecho sugiere que la interacción espín-órbita fue comparativamente más fuerte en FeCo que en FeCr y MnFe. Por otro lado, tanto la magnetización transversal como las curvas de efecto Hall muestran, primero, una dependencia lineal del campo magnético y su paso por un cambio de pendiente en un cierto valor de campo,  $H_s$ , antes de alcanzar, finalmente, la región de saturación en campos magnéticos altos.  $H_s$  es el campo que marca el inicio tanto de la región de saturación magnética como de la contribución ordinaria de



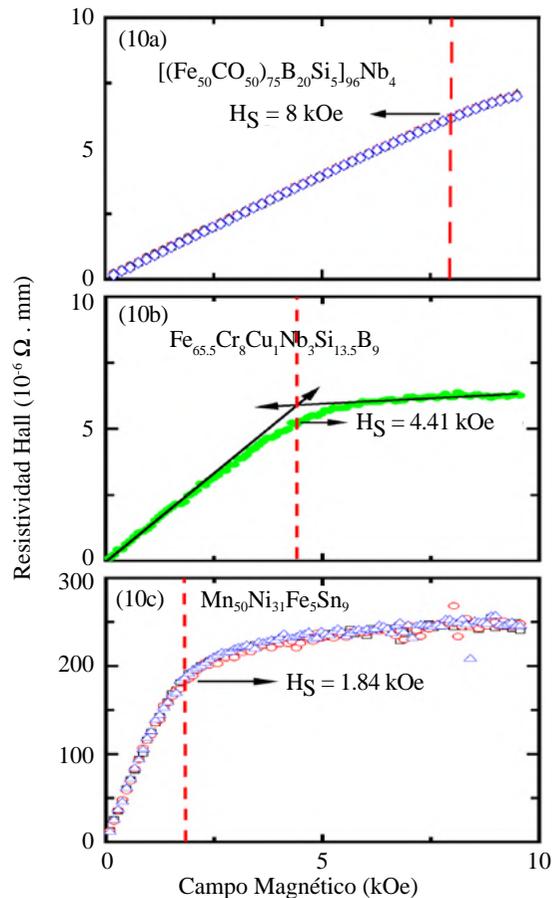
**Figura 9.** Ciclos de histéresis axial y transversal en función del campo magnético obtenidos a temperatura ambiente para **a)** FeCo y **b)** FeCr

Hall y, así, el final de la contribución extraordinaria de Hall. Este campo está dado como la intersección entre la recta tangente a la curva de efecto Hall en la región de campo pequeño y aquella de campo alto, como se ilustra en la **figura 10 b** (de la misma forma se determinó  $H_S$  a partir de las curvas de los ciclos de histéresis de magnetización transversal).

Es interesante observar que en las diferentes aleaciones de estudio, el  $H_S$  obtenido del ciclo de histéresis de la magnetización transversal coincidió bastante bien (dentro del error experimental) con el  $H_S$  obtenido de las curvas del efecto Hall. Este comportamiento era el esperado debido a que en ambos experimentos el campo magnético se aplicó en la dirección normal de la longitud de las cintas (muestras), e evidenció la gran coherencia entre estos experimentos. Las características de las curvas de efecto Hall descritas estuvieron, generalmente, en buen acuerdo con la siguiente expresión empírica para la resistividad de Hall (**Blundell, 2001**),

$$\rho_H = R_o H + R_e M, \quad (15)$$

donde  $H$  es el campo magnético,  $M$  es la magnetización, y  $R_o$  y  $R_e$  son los coeficientes Hall ordinario y extraordinario, respectivamente. Otra característica observada en la **figura 10 a, b, c** es que el cambio en la pendiente de las curvas de Hall fue más evidente en la muestra de MnFe que en las de FeCr y FeCo. El rango de campo en el que ese cambio ocurrió fue *más pequeño* en MnFe que en las otras dos muestras, lo que indica que el valor de  $H_S$  hasta donde se extiende la contribución extraordinaria de Hall fue menor en MnFe que en las otras dos muestras. Los valores de  $R_o$  y  $R_e$  obtenidos de las pendientes de las curvas de la figura 10 a, b, c en las regiones de campo alto ( $H > H_S$ ) y pequeño ( $H < H_S$ ) se presentan en la **tabla 3**. Estos evidenciaron la misma tendencia: en cada muestra,



**Figura 10.** Resistividad Hall Vs.  $H$  a temperatura ambiente para a) FeCo, b) FeCr, y c) MnFe

**Tabla 3.** Valores para  $H_s$ , coeficientes Hall ( $R_o$ ,  $R_e$ ), y densidad de portadores de carga a temperatura ambiente para las aleaciones bajo estudio

Muestra	$H_s$ (kOe)	$R_o$ ( $\Omega\text{cm/Oe}$ ) $10^{-12}$	$R_e$ ( $\Omega\text{cm/Oe}$ ) $10^{-10}$	$n_{c,ca}$ ( $\text{cm}^{-3}$ ) $10^{19}$ (campo alto)	$n_{c,cb}$ ( $\text{cm}^{-3}$ ) $10^{18}$ (campo bajo)
$[(\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50})_{75}\text{B}_{20}\text{Si}_{5,96}\text{Nb}_4]$	8	-	36	-	0,17
$\text{Fe}_{65,5}\text{Cr}_8\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$	4,42	23	5,7	2,71	1,09
$\text{Mn}_{50}\text{Ni}_{36}\text{Fe}_5\text{Sn}_9$	1,84	0,48	0,52	129	11,8

el valor de  $R_e$  fue mayor que el de  $R_o$ , lo que se esperaba debido a que en la región de campo pequeño el incremento en la pendiente de la curva se debe al incremento de  $H$  y de  $M$ , y, así, ambas contribuciones, la extraordinaria y la ordinaria, al efecto Hall están presentes. El incremento en la pendiente de la curva se debe tanto a  $R_o$  como a  $R_e$ . En la región de campo alto el sistema comenzó a saturar y, por ende, la magnetización  $M$  no aumentó más y la pendiente de la curva del efecto Hall se debió solo a la contribución de  $R_o$ . Otro hecho que se observa en la **tabla 3** es que  $R_e(\text{FeCo}) > R_e(\text{FeCr}) > R_e(\text{MnFe})$ . Los valores de  $R_o$  presentan la misma tendencia que los de  $R_e$ . El signo positivo del efecto Hall indica que los electrones de conducción se comportaron ante el campo eléctrico y magnético como partículas de carga  $+e$  y masa efectiva  $m^*$ , que ocupan orbitales cerca del máximo de la banda. Eso implica que su comportamiento magneto-eléctrico se desvió de la predicción del modelo de Drude, es decir, que el efecto Hall debería siempre ser negativo para metales simples. Los valores de  $R_e$  y  $R_o$  fueron del mismo orden de magnitud de los observados experimentalmente para aleaciones basadas en Fe (**Prudnikova et al.**, 1997). En concordancia con los valores de  $R_e$  y  $R_o$ , la densidad de los portadores  $n_{c,cb}$  y  $n_{c,ca}$  en campo pequeño y alto, presentaron el siguiente orden (**Tabla 3**):  $n_{c,cb}$  y  $n_{c,ca}$  de (MnFe)  $> n_{c,cb}$  y  $n_{c,ca}$  de (FeCr)  $> n_{c,cb}$  y  $n_{c,ca}$  de (FeCo). Los valores obtenidos para ( $H_s$ ,  $R_e$ ,  $R_o$ ) sugieren que la interacción espín-órbita fue más fuerte en FeCo que en FeCr y MnFe, lo cual es compatible con los resultados de anisotropía de esas muestras discutidos anteriormente (**Figura 9 a, b**). En contraste, la interacción RKKY fue más fuerte en MnFe que en las otras dos muestras, como lo sugiere la mayor densidad de los portadores de carga.

A la luz de estos resultados, puede considerarse que en FeCo las interacciones de intercambio y de espín-órbita fueron suficientemente fuertes como para ubicarlo en la clase de universalidad del modelo 3d-XY con predominio de interacciones de corto alcance. En contraste, en FeCr y MnFe, las interacciones de intercambio y de espín-órbita no fueron suficientemente fuertes, por lo que es razonable considerar que la interacción RKKY estaba activa y predominó en ellas. Como conclusión, puede decirse que la interacción RKKY, que es de mediano a largo alcance, puede contribuir significativamente a causar el comportamiento de campo medio de esas aleaciones.

## Conclusiones y otros comentarios

En este estudio se analizaron los exponentes críticos ( $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$ ), los efectos de anisotropía magnética y Hall, la respuesta magneto-calórica con el exponente  $n$  que la caracteriza, y las interacciones magnéticas en muestras de las aleaciones FeCo, FeCr, y MnFe. Los valores determinados para ( $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$ ) indicaron que FeCo pertenece a la clase de universalidad 3d-XY, mientras que FeCr y MnFe pertenecen a la clase de universalidad de campo medio. Las curvas de magnetización y termo-gravimétricas en presencia de un pequeño campo magnético indicaron un ordenamiento ferromagnético de largo alcance en FeCo y FeCr, y uno ferromagnético incipiente o débil en MnFe. Dicho ordenamiento magnético se acompañó, de alguna manera, por los resultados del efecto Hall, que indicaban en FeCo y FeCr un comportamiento metálico menos fuerte que en MnFe. Además, FeCo y FeCr cumplieron de mejor manera que MnFe los requerimientos de una respuesta magneto-calórica, y pueden considerarse como candidatos potenciales idóneos para emplearse en

la tecnología de refrigeración magnética a temperaturas moderadamente altas. El presente estudio plantea una ruta, indirecta pero basada en técnicas experimentales sencillas y bien establecidas (medidas de magnetización, anisotropía magnética y efecto Hall), para determinar algunas interacciones magnéticas que podrían estar activas en vidrios metálicos y aleaciones Heusler producidas por el método de *melt-spinning*, y para analizar la influencia de tales interacciones sobre los valores de  $(\beta, \gamma, \delta)$ , los cuales están relacionados con la respuesta magneto-calórica de esas aleaciones a través de los exponentes  $n$  y  $N$ . Esta ruta podría proporcionar un estímulo para que las comunidades de investigadores en materia condensada y magnetismo, especialmente en nuestro país, amplíen el estudio de la física básica de nuevas aleaciones ferromagnéticas blandas para su mejor comprensión y su aplicación en diferentes campos tecnológicos.

## Agradecimientos

Este humilde artículo es una bella oportunidad para presentar mis sinceros agradecimientos a todos los integrantes del Grupo de Magnetismo y Materiales Avanzados de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, en particular a Abilo Velásquez, Diego Gómez, Iván Cely, Jessica López, Juanita Hincapié, Jhon Melo, Juan Hernández, Nicolás Salazar y Rafael González, por su valiosa colaboración en el trabajo experimental y el ajuste numérico que le sirvieron de base, así como a los profesores y funcionarios administrativos de la Universidad. En especial, estoy muy agradecido con los profesores Adela Londoño, Álvaro Gómez, Álvaro Pulzara, Bernardo Acevedo, Carlos E. Ruiz, Carlos D. Acosta, César Arango, Constanza Montoya, Diego Chávez, Fabián Serrano, Germán A. Castaño, Edilberto Rojas, Gloria Giraldo, Héctor Barco, Héctor J. Osorio, Jesús Quintero, José H. Parra, José Doria, Neil Guerrero, Oscar Giraldo, Oscar Díaz, Posidia Pineda, Victoria Mejía, y con los funcionarios Ana Ma. Plazas, Beatriz Palacio, Carlos Gómez, Carmenza Villada, Clemencia Gómez, Constanza B. Pérez, Gabriel González, Graciela López, Luz M. Valencia, por su apoyo y colaboración en el desarrollo de mis actividades de docencia, investigación y académico-administrativas. Agradezco también a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, por la financiación para el fortalecimiento del Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados, el cual ha posibilitado el desarrollo de mis actividades de investigación y que en Manizales surja una semilla magnética con pasos magnéticos nacionales e internacionales. A los Profesores Germán Pérez (UV-Colombia), Manuel Vázquez (ICMM, Madrid, España), Fabio D. Saccone (Universidad de Buenos Aires-Argentina), Diego Muraca (Universidad Estadual de Campinas, Brasil), Daniel Salazar (Basque Center for Materials - País Vasco, España), y Dr. Andreas Berger (CIC nanoGUNE-San Sebastián, España) quienes me han colaborado de manera cálida y fructífera, donando una cantidad significativa de muestras, algunas de ellas estudiadas en el presente trabajo. Mi mayor agradecimiento es para mi familia –mi Papá Andrés (a su memoria), Mamá Teresa, Esposa Lucila, Hija Ximena- Martín mi Nieto- Alejandro (su Papá), Hijo César A.- Julieta y Olivia mis Nietas- Catalina (su Mamá)– por su comprensión, generosidad, sabiduría y solidaridad que me han estimulado para seguir los pasos magnéticos de mi formación y mis actividades de docencia, investigación y académico-administrativas.

## Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

## Referencias

- Aharoni, A. (1986). A possible interpretation of non-linear Arrots plots. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 58, 297-302. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1686>
- Arrott, A., Noakes, J.E. (1967). Approximate equation of state for nickel near its critical temperature. *Physical Review Letters*, 19, 786. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.19.786>
- Blázquez, J.S., Franco, V., Conde, A., Gottschall, T., Skokov, K.P., Gutfleisch, O. (2016). A unified approach to describe the thermal and magnetic hysteresis in Heusler alloys. *Applied Physics Letters*, 109, 122410-1. <https://doi.org/10.1063/1.4963319>

- Blundell, S.** (2001). *Magnetism in Condensed Matter*. London, Great Britain: Oxford University Press.
- Brück, E.** (2005). Developments in magnetocaloric refrigeration. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(23), R381-R391. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/23/R01>
- Buznikov, N.A., Kurlyandskaya, G. V.** (2019). Magnetoimpedance in Symmetric and Non-Symmetric Nanostructured Multilayers: A Theoretical Study. *Sensors*, 19(8), 1761. <https://doi.org/10.3390/s19081761>
- Campillo, G., Berger, A., Osorio, J., Pearson, J. E., Bader, S. D., Baca, E., Prieto, P.** (2001). Substrate dependence of magnetic properties of  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 237(1), 61-68. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)00482-6](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(01)00482-6)
- Collins, M. F.** (1989). *Magnetic Critical Scattering*. New York, USA: Oxford University Press.
- Franco, V., Conde, A.** (2012). Magnetic refrigerants with continuous phase transitions: Amorphous and nanostructured materials. *Scripta Materialia*, 67, 594-599. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.05.004>
- Franco, V., Blázquez, J.S., Conde, A.** (2006). Field dependence of the magnetocaloric effect in materials with a second order phase transition: A master curve for the magnetic entropy change. *Applied Physics Letters*, 89, 222512. <https://doi.org/10.1063/1.239936>
- Franco, V., Blázquez, J.S., Ingale, B., Conde, A.** (2012). The Magnetocaloric Effect and Magnetic Refrigeration Near Room Temperature: Materials and Models. *Annual Review of Materials Research*, 42, 305-342. <https://doi.org/10.1146/annurevmatsci-062910-100356>
- Franco, V., Conde, A., Kiss, L.F.** (2008). Magnetocaloric response of FeCrB amorphous alloys: Predicting the magnetic entropy change from the Arrott–Noakes equation of state. *Journal of Applied Physics*, 104, 033903. <https://doi.org/10.1063/1.2961310>
- Franco, V., Conde, A., Kuz'min, M.D., Romero-Enrique, J.M.** (2009). The magnetocaloric effect in materials with a second order phase transition: Are TC and Tpeak necessarily coincident?. *Journal of Applied Physics*, 105, 07A917. <https://doi.org/10.1063/1.3063666>
- Ghosh, S., Ghosh, A., Mandal, K.** (2021). Reversible magnetocaloric effect and critical exponent analysis in Mn-Fe-Ni-Sn Heusler alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.269>
- Gómez, M., Rosales-Rivera, A., Pineda-Gómez, P., Muraca, D., Sirkin, H.** (2008). Thermal, structural and magnetic characterization of Co-based alloys. *Microelectronics Journal*, 39, 1242-1244. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2008.01.088>
- Gonçalves, L.P., Soares, J., Machado, F.A., Rodrigues, A.R.** (2006). Hall and giant magnetoimpedance effects in the  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{5}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  metallic glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 3659-3662. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.03.106>
- Griffiths, R.** (1967). Thermodynamic Functions for Fluids and Ferromagnets near the Critical Point. *Physical Review*, 158(5), 176-187. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.158.176>
- Gschneidner, K.A., Pecharsky, J.K.** (2000). Magnetocaloric Materials. *Annual Review of Materials Science*, 30, 387- 429. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.30.1.387>
- Kadanoff, L. P.** (1976). Scaling, Universality and Operator Algebras. En C. Domb, & M. Green (Edits.), *Phase Transitions and Critical Phenomena*, Vol 5A, p 1 - 34). New York, USA: Academic Press Inc.
- Knobel, M., Pirota, K.R.** (2002). Giant magnetoimpedance: Concepts and recent progress. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 242-245, 33-40.
- Knobel, M., Vázquez, M., Krauss, L.** (2003). Giant magneto impedance. En *Handbook of Magnetic Materials* (Vol. 15, págs. 1- 9). Amsterdam: K. H. Buschow, Ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Kouvel, J.S.** (1957). *Methods for determining the Curie temperature of a ferromagnet*. Report No.57-RL-1799, General Electric Research Lab.
- Kouvel, J.S., Fisher, M.E.** (1964). Detailed Magnetic Behavior of Nickel Near its Curie Point. *Physical Review*, 136, A1626. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.136.A1626>
- Luo, Q., Zhao, D. Q., Pan, M.X., Wang, W.H.** (2006). Magnetocaloric effect in Gd-based bulk metallic glasses. *Applied Physics Letters*, 89, 081914:1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2338770>
- Machado, F. A., Da Silva, B. L., Montarroyos, E.** (1993). Magnetoresistance of the random anisotropic  $\text{Co}_{70.4}\text{Fe}_{4.6}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  alloy. *Journal of Applied Physics*, 73, Art. no. 6387. <https://doi.org/10.1063/1.352659>
- Machado, F.A., Martins, C.S., Rezende, S.M.** (1995). Giant magnetoimpedance in the ferromagnetic alloy  $\text{Co}_{75-x}\text{Fe}_x\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ . *Physical Review B*, 51, Art. no. 3926. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.3926>

- Makhotkin, V. E., Shurukhin, B. P., Lopatin, V. A., Marchukov, P. Y., Levin, Y. K.** (1991). Magnetic field sensors based on amorphous ribbons. *Sens. Actuators. A. Physics*, 27, 759-762. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1686>
- Melnikov, G.Y., Lepalovsky, V.N., Kurlyandskaya, G.V.** (2022). GMI-Detection of a Magnetic Composite Imitating a Blood Vessel Clot. *Russian Physics Journal*, 64, 1880-1885. <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02536-1>
- Melo-Quintero, J.J., Rosales-Rivera, A., Giraldo-Daza, H.** (2010). Hall effect and resistivity measurements in CoFe-based amorphous magnetic alloys. *Momento, Revista de Física*, 41, 37-48.
- Panina, L. V., Mohri, K., Bushida K., Noda, M.** (1994). Ultrasoft finemet thin films for magneto-impedance microsensors. *Journal of Applied Physics*, 76, Art. no. 074010.
- Phan, M.H., Peng, H.** (2008). Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications. *Progress in Material Science*, 53, 323-420. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2007.05.003>
- Provenzano, V., Shapiro, A.J., Shull, R.D.** (2004). Reduction of hysteresis losses in the magnetic refrigerant Gd<sub>5</sub>Ge<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> by the addition of iron. *Nature*, 429, 853-857. <https://doi.org/10.1038/nature02657>
- Prudnikova, M.V., Kozlova, T.M., Prudnikov, V.N., Granosky, A.B.** (1997). Hall effect and magnetoresistance in rapidly quenched FeB ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 166, 201-206. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(96\)00500-8](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(96)00500-8)
- Remya, U.D., Athul, S.R., Arun, K., Swathi, S., Dzubinska, A., Reiffers, M., Ramamoorthi, N.** (2021). Investigations on magnetic, magnetocaloric and transport properties of Co<sub>2</sub>Ti<sub>1-x</sub>Sn<sub>1+x</sub> (x = 0.25, 0.5). *National Conference on Physics and Chemistry of Materials: NCPCM2020*. 2369, pág. 020086. India: AIP Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1063/5.0061244>
- Rosales-Rivera, A., González-Sánchez, R. F., Hernández-Parra, J. C., Velásquez-Salazar, A., Saccone, F. D.** (2019). Shifting from Ising model to Heisenberg model critical behavior and the departure from these models in Fe<sub>73.5-x</sub>Cr<sub>x</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub>. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 482, 251-261. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.03.031>
- Rosales-Rivera, A., González-Sánchez, R. F., Velásquez-Salazar, A. A., López-Tabares, J., Salazar-Henao, N. A., Gómez-Montoya, D. F., Saccone, F. D.** (2021). Magnetic Critical Behavior, Hall and Magneto-Impedance Effects in Fe-Co-Based Metallic Glasses *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(2), 4400206. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2020.3013294>
- Rosales-Rivera, A., Moscoso-Londoño, O., Muraca, D.** (2012). Magnetization dynamics and magnetic hardening in amorphous FeBSi alloys. *Revista Mexicana de Física*, 58(2), 155-159.
- Rosales-Rivera, A., Valencia, V. H., Pineda-Gómez, P.** (2007). Three-peak behavior in giant magnetoimpedance effect in Fe<sub>73.5-x</sub>Cr<sub>x</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub> amorphous ribbons. *Physica B*, 398, 252-255. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.04.026>
- Rosales-Rivera, A., Valencia, V. H., Quintero, D. L., Pineda-Gómez, P., Gómez, M. M.** (2006). Thermal, magnetic, and structural properties of soft magnetic FeCrNbCuSiB alloy ribbons. *Physica B*, 384, 169-171. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2006.05.217>
- Rushbrooke, G.S.** (1963). On the Thermodynamics of the Critical Region for the Ising Problem. *The Journal of Chemical Physics*, 39(3), 842. <https://doi.org/10.1063/1.1734338>
- Saccone, F.D.** (2021). *Estudio de espectroscopia Mössbauer en aleaciones Heusler Mn50Ni41-xFexSn9 con x = 0, 5, y 10*. Escrito-correo electrónico, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires C1063ACV, Argentina, Física, Facultad de Ingeniería. Obtenido de [fsaccone@fi.uba.ar](mailto:fsaccone@fi.uba.ar)
- Tishin, A.M., Spichkin, Y.I.** (2003). *The Magnetocaloric Effect and its Applications*. Bristol, Great Britain: Institute of Physics.
- Wang, D., Peng, K., Gu, B., Han, Z., Tang, S., Qin, W., Du, Y.** (2003). Influence of annealing on the magnetic entropy changes in FeMoZrNbBCu amorphous ribbons. *Journal of Alloys and Compounds*, 358, 312-315. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00075-6)
- Widom, B.** (1965). Equation of State in the Neighborhood of the Critical Point. *The Journal of Chemical Physics*, 43(11), 3898. <https://doi.org/10.1063/1.1696618>
- Wilson, K. G. & Kogut, J.** (1974). The renormalization group and the  $\epsilon$ -expansion. *Physics Report*, 12C(2), 75-200.
- Wood, M. E. & Potter, W. H.** (1985). General analysis of magnetic refrigeration and its optimization using a new concept: maximization of refrigerant capacity. *Cryogenics*, 25(12), 667-683. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(85\)90187-0](https://doi.org/10.1016/0011-2275(85)90187-0)
- Yang, Z., Chlenova, A.A., Golubeva, E.V., Volchkov, S.O., Guo, P., Shcherbinin, S.V., Kurlyandskaya, G.V.** (2019). Magnetoimpedance Effect in the Ribbon-Based Patterned Soft Ferromagnetic Meander-Shaped Elements for Sensor Application. *Sensors*, 19(11), 2468 10.3390/s19112468. <https://doi.org/10.3390/s19112468>

- 
- Yang, Z., Lei, J., Lei, C., Zhou, Y., Wang, T.** (2014). Effect of magnetic field annealing and size on the giant magnetoimpedance in micro-patterned Co-based ribbon with a meander structure. *Applied Physics A*, 116, 1847-1851. <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8343-1>
- Yeomans, J.M.** (1992). *Statistical Mechanics of Phase Transitions*. New York, USA: Oxford University Press Inc.
- Zou, J., Chen, Y., Li, X., Song, Y., Zhao, Z.** (2019). Observation of the transition state of domain wall displacement and GMI effect of FINEMET/graphene composite ribbons. *RSC Advances*, 9 (67), 39133-39142. <https://doi.org/10.1039/c9ra07642e>

Artículo original

## Evaluación de residuos orgánicos generados en plazas de mercado para la producción de enzimas bacterianas

### Evaluation of organic waste from marketplaces to produce bacterial enzymes

● Etna Milena Sánchez-Castelblanco\*, ● Juan Pablo Heredia-Martín

SENA, Centro de Gestión Industrial, Grupo de investigación Neurona, Bogotá, Colombia

#### Resumen

Las plazas de mercado ubicadas en centros urbanos generan residuos agrícolas que pueden aprovecharse como sustratos de bajo costo para la producción de enzimas microbianas. El objetivo de este estudio fue la evaluación fisicoquímica y microbiológica de residuos orgánicos generados en plazas de mercado para la producción de enzimas bacterianas. Los residuos se recolectaron en una plaza de mercado de Bogotá, se clasificaron en seis tipos diferentes etiquetados como R1 a R6, y se cuantificó su contenido de humedad, nitrógeno, proteínas, carbono orgánico total, azúcares reductores, grasas y aceites, almidón, pectina, hemicelulosa, lignina y celulosa. En el análisis microbiológico se determinó la presencia de bacterias proteolíticas, lipolíticas, amilolíticas, celulolíticas y ligninolíticas. Se aislaron 133 morfotipos, de los cuales 55 presentaron actividad enzimática: se seleccionaron 17 cepas ligninolíticas, 14 proteolíticas, 11 celulolíticas, nueve lipolíticas y cuatro amilolíticas. Los residuos de tubérculos presentaron el mayor contenido de almidón ( $41,9 \pm 1,18\%$ ). Los ameros, vainas de leguminosas y residuos de verduras presentaron un porcentaje de celulosa entre  $33,78 \pm 0,91\%$  y  $35,29 \pm 0,77\%$ . Los residuos de plantas ornamentales y aromáticas mostraron mayor contenido de lignina ( $18,91 \pm 0,50\%$  y  $26,43 \pm 0,47\%$ ) y el de pectina fue más alto en los residuos de frutas ( $12,95 \pm 0,30\%$ ). Los residuos agrícolas generados en plazas de mercado son una fuente de microorganismos productores de enzimas y pueden valorizarse como sustratos para la obtención de amilasas, celulasas y ligninasas debido a su contenido de almidón, celulosa y lignina.

**Palabras clave:** Plazas de mercado; Residuos agrícolas; Enzimas microbianas; Caracterización fisicoquímica; Valorización de residuos.

#### Abstract

Marketplaces in urban centers generate agricultural wastes that can be used as low-cost substrates for the production of microbial enzymes. Here we evaluated the physicochemical and microbiological composition of organic waste generated in marketplaces to produce bacterial enzymes. The residues were collected in a marketplace in Bogotá and then classified into six different types from R1 to R6. Their content of humidity, nitrogen, proteins, total organic carbon, reducing sugars, fats and oils, starch, pectin, hemicellulose, lignin, and cellulose were quantified. The microbiological analysis determined the presence of proteolytic, lipolytic, amylolytic, cellulolytic, and ligninolytic bacteria. We isolated 133 morphotypes, 55 of which showed enzymatic activity, and then selected 17 ligninolytic, 14 proteolytic, 11 cellulolytic, nine lipolytic, and four amylolytic strains. The tuber residues presented the highest starch content ( $41.9 \pm 1.18\%$ ). The corn cob leaves, legume seed pods, and vegetable residues presented a percentage of cellulose between  $33.78 \pm 0.91\%$  and  $35.29 \pm 0.77\%$ . Ornamental and aromatic plant residues showed higher lignin content ( $18.91 \pm 0.50\%$  and  $26.43 \pm 0.47\%$ ) and pectin was the highest in fruit residues ( $12.95 \pm 0.30\%$ ). Agricultural residues generated in marketplaces are a source of enzyme-producing microorganisms and can be used as substrates to obtain amylases, cellulases, and ligninases due to their content of starch, cellulose, and lignin.

**Keywords:** Marketplaces; Agricultural wastes; Microbial enzymes; Physicochemical characterization; Waste valorization.

**Citación:** Sánchez-Castelblanco EM, Heredia-Martín JP. Evaluación de residuos orgánicos generados en plazas de mercado para la producción de enzimas bacterianas. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):675-684, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1652>

**Editor:** Sonia Moreno-Guáqueta

**\*Correspondencia:**

Etna Milena Sánchez-Castelblanco;  
esanchezc@sena.edu.co

**Recibido:** 15 de marzo de 2022

**Aceptado:** 21 de junio de 2022

**Publicado en línea:** 26 de julio de 2022



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

## Introducción

Anualmente se vierten en la naturaleza cerca de 1.500 millones de toneladas de biomasa residual de origen lignocelulósico (Toushik *et al.*, 2017). Parte de estos residuos se produce como resultado de prácticas agrícolas y alcanza cerca de cinco millones de toneladas métricas por año (Bharathiraja *et al.*, 2016). El tratamiento deficiente y el poco aprovechamiento de estos residuos ocasionan problemas de salud pública y medioambientales (Bigdeloo *et al.*, 2021). En los últimos años se ha visto la necesidad de buscar alternativas para valorizar estos residuos utilizándolos como materia prima para la obtención de productos de valor agregado (Bhuyan *et al.*, 2020).

Las alternativas de valorización de residuos agrícolas y agroindustriales más utilizadas son el compostaje, la producción de comida animal, la obtención de biogás (Ravindran *et al.*, 2018; Abdel Shafy & Mansour, 2018; Mengqi *et al.*, 2021) y recientemente se ha generalizado el uso de esta biomasa residual en procesos de obtención de bioetanol, previa hidrólisis enzimática (Sarkar *et al.*, 2012). La valorización de residuos agrícolas como sustratos para la producción de enzimas microbianas ha empezado a ser una práctica común debido a que reduce sus costos de producción y las hace más accesibles a nivel industrial (de Castro & Sato, 2015; Bharathiraja *et al.*, 2016).

Las plazas de mercado en Colombia son grandes generadoras de residuos agrícolas con gran potencial de aprovechamiento (Cardona-Izate *et al.*, 2004; Valderrama-López *et al.*, 2019). Estos residuos están constituidos principalmente por polímeros como la lignina y la celulosa, entre otros compuestos que pueden emplearse como sustratos en fermentaciones microbianas para la obtención de enzimas (Ravindran *et al.*, 2018).

La disminución de los costos durante la producción de enzimas microbianas implica contar con sustratos de fácil acceso y bajo costo y microorganismos con actividad enzimática capaces de hidrolizar dichos sustratos (de Castro & Sato, 2015). Es por ello que la búsqueda de nuevas cepas microbianas nativas con actividad enzimática es una investigación relevante y necesaria que favorece la oferta y la demanda de estos bioproductos de interés industrial (Kirn *et al.*, 2018). En este contexto, el propósito de nuestro estudio fue la evaluación de residuos orgánicos provenientes de las plazas de mercado mediante su caracterización fisicoquímica y microbiológica, para lo cual se determinó la presencia de microorganismos con actividad enzimática y el contenido de grasas y aceites, almidón, pectina, hemicelulosa, celulosa, lignina y proteína, sustratos fundamentales para la producción de lipasas, amilasas, pectinasas, celulasas, ligninasas y proteasas.

## Materiales y métodos

### Muestreo de los residuos

Los residuos orgánicos se recolectaron de la plaza distrital de mercado de El Restrepo (Bogotá, D.C.) utilizando el método de cuarteo (Alayón, 2020) en tres días diferentes de la semana durante junio de 2021. Los residuos se clasificaron en seis tipos diferentes: R1 (tubérculos), R2 (frutas), R3 (plantas ornamentales y flores), R4 (plantas y hortalizas aromáticas), R5 (amerros de mazorca y vainas de leguminosas) y R6 (verduras y hojas y tallos tiernos). De cada tipo de residuo se tomaron aproximadamente 500 g de muestra y se transportaron refrigerados para su pretratamiento en el laboratorio.

### Pretratamiento de los residuos

El análisis microbiológico se hizo en una muestra compuesta de 100 g de los seis tipos de residuos; posteriormente, estos se cortaron manualmente para obtener trozos de aproximadamente 10 mm y se analizaron en las primeras 24 horas posteriores al proceso de recolección.

Para el análisis fisicoquímico las muestras se lavaron con agua desionizada, se cortaron en trozos de 10 mm y se deshidrataron a 90 °C en un horno Binder FED 115 durante 15 horas, aproximadamente, hasta alcanzar un peso constante, y luego se las almacenó a -80 °C hasta su caracterización.

### **Caracterización fisicoquímica de los residuos**

A cada uno de los residuos pretratados (R1 – R6) se le determinó el porcentaje de humedad, nitrógeno, proteínas, carbono orgánico total (COT), azúcares reductores (AR), grasas y aceites (GyA), almidón, hemicelulosa, lignina y celulosa. Para cuantificar su humedad, los residuos se deshidrataron hasta alcanzar el peso constante y el cálculo se hizo por diferencia de pesos. El contenido de nitrógeno se determinó con el método Kjeldahl y el porcentaje de proteínas siguiendo a **Gavidia-Valencia et al.** (2020). El COT se evaluó mediante un método de adición estándar modificando la técnica de **Walkley- Black** (1934). Para los AR se utilizó el método del ácido 3,5 dinitroacetilsalicílico (DNS) (**Olanbiwoninu & Fasiku**, 2015). Las GyA se calcularon por diferencia de pesos después de una extracción Soxhlet (**Subramanian et al.**, 2016) seguida de una destilación.

A partir de la biomasa residual obtenida de la determinación de GyA y previamente deshidratada y tratada en autoclave con una solución de cloruro de calcio ácida, se extrajo el almidón (**Englyst et al.**, 2006) con el método espectrofotométrico y se añadió Lugol para determinar su porcentaje (**Ortiz-Sánchez et al.**, 2015). La mezcla obtenida de dicha extracción se centrifugó y al precipitado resultante se lo sometió a hidrólisis consecutivas para determinar la hemicelulosa, la lignina y la celulosa (**Kulic & Radojičić**, 2011), en tanto que al sobrenadante se le adicionó etanol al 96 % para precipitar las pectinas que luego fueron cuantificadas gravimétricamente.

### **Caracterización microbiológica de los residuos**

Para el recuento de bacterias totales se preparó agar Plate Count (PC) (Merck®), para las amilolíticas, agar almidón al 1 % (AA), para las celulolíticas, agar carboximetilcelulosa (CMC), para las ligninolíticas, agar salvado de trigo (AS), para las lipolíticas, agar Tween 80 (AT) y para las proteolíticas, agar leche (AL). Por último, se prepararon agar azure B (AZ), agar ABTS (ABTS) y agar lignina alcalina con guayacol (AG) para la selección de microorganismos ligninolíticos. Para el aislamiento de las bacterias totales, las amilolíticas, las celulolíticas, las ligninolíticas, las lipolíticas y las proteolíticas, se sembraron en superficie las diluciones  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$  en los agares PC, AA, CMC, AS, AT y AL, respectivamente, y se incubaron a 37 °C durante 48 horas.

Los microorganismos se seleccionaron a partir de colonias con diferentes características morfológicas obtenidas de los aislamientos bacterianos. Para los microorganismos amilolíticos, celulolíticos, proteolíticos y lipolíticos, se verificó la presencia de halos de hidrólisis en los agares AA, CMC, AL y AT, respectivamente. Por último, para los microorganismos ligninolíticos se hicieron siembras en los agares AZ, ABTS y AG y se verificó su crecimiento y sus zonas de aclaramiento.

Los microorganismos seleccionados se aislaron por estría y se preservaron a -80 °C para su uso potencial en procesos de obtención de enzimas bacterianas. Las diferencias significativas de los resultados fisicoquímicos se determinaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un factor con un nivel de significación de 0,05 (ver el material suplementario, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1652/3264>).

## **Resultados y discusión**

En la **tabla 1** se presentan los resultados de los 12 parámetros fisicoquímicos evaluados en los seis tipos de residuos clasificados y recolectados de la plaza distrital de mercado de El Restrepo en Bogotá. Los residuos de tubérculos (R1) registraron el mayor porcentaje de almidón, con  $41,9 \pm 1,18$  %, y diferencias significativas ( $p=0,02$ ) frente al porcentaje encontrado en los demás residuos, en los que este polímero no superó el 2,5 % del contenido total. Ello se explica porque el R1 estaba compuesto principalmente por desperdicios de papa y este tubérculo presenta un alto contenido de almidón, entre un 60 y un 80 % (**Robertson et al.**, 2018).

Los residuos de frutas (R2) presentaron el mayor contenido de pectina ( $12,95 \pm 0,30$  %), seguido por los R6 ( $4,02 \pm 0,88$  %). Aunque en los demás residuos este compuesto no superó el 3 %, no se encontraron diferencias significativas ( $p=0,12$ ) frente al R2, lo

**Tabla 1.** Caracterización fisicoquímica de residuos agrícolas generados en la plaza distrital de mercado de El Restrepo (Bogotá D.C.)

Análisis	R1 - Tubérculos	R2 - Frutas	R3 - Plantas ornamentales	R4 - Plantas aromáticas	R5 - Ameros y vainas	R6 - Verduras
Humedad (%)	64,12 ± 4,42	86,52 ± 3,36	79,19 ± 4,04	79,94 ± 6,67	77,12 ± 2,16	89,31 ± 1,65
Nitrógeno (%)	1,04 ± 0,10	1,22 ± 0,06	2,25 ± 0,07	2,87 ± 0,12	1,20 ± 0,14	1,38 ± 0,20
Proteína (%)	6,50 ± 0,57	7,61 ± 0,35	14,07 ± 0,42	13,45 ± 0,75	7,50 ± 0,78	11,49 ± 1,10
COT (%)	58,79 ± 0,47	44,98 ± 0,60	48,62 ± 0,33	65,97 ± 0,51	45,77 ± 0,17	47,90 ± 0,38
Relación C/N	57,01 ± 1,82	36,99 ± 0,92	21,61 ± 0,34	23,03 ± 0,44	38,64 ± 2,36	22,80 ± 1,44
Azúcares Reductores (%)	0,20 ± 0,04	6,11 ± 0,23	1,18 ± 0,04	1,21 ± 0,03	3,16 ± 0,09	5,04 ± 0,04
Grasas y aceites (%)	0,23 ± 0,05	0,69 ± 0,15	0,56 ± 0,16	0,72 ± 0,11	0,64 ± 0,12	1,16 ± 0,23
Almidón (%)	41,9 ± 1,18	1,44 ± 0,08	1,64 ± 0,04	1,78 ± 0,27	2,28 ± 0,24	1,99 ± 0,10
Pectina (%)	1,50 ± 0,12	12,95 ± 0,30	2,16 ± 0,63	2,69 ± 0,84	2,57 ± 0,68	4,02 ± 0,88
Hemicelulosa (%)	8,23 ± 0,73	8,59 ± 0,79	24,24 ± 2,32	26,67 ± 2,19	3,43 ± 0,27	3,20 ± 0,93
Lignina (%)	2,30 ± 0,62	8,62 ± 0,72	18,91 ± 0,50	26,43 ± 0,47	18,13 ± 0,63	8,21 ± 0,22
Celulosa (%)	3,16 ± 0,54	23,90 ± 1,44	27,11 ± 1,56	27,15 ± 0,34	35,29 ± 0,77	33,78 ± 0,91

que probablemente se debió a la variabilidad de las frutas presentes en este durante los diferentes muestreos. El contenido de pectina difirió según la clase de fruta caracterizada: por ejemplo, las cáscaras de cítricos registraron los contenidos más altos, desde un 10,6 hasta un 25 % (Müller *et al.*, 2016; Twinomuhwezi *et al.*, 2020), en tanto que en las cáscaras de banano y mango se reportaron porcentajes inferiores, entre 2,8 y 8,8 % (Panchami & Gunasekaran, 2017).

Los residuos de plantas ornamentales y aromáticas (R3 y R4) presentaron la mayor cantidad de proteína, con valores de 13,45 ± 0,75 % y 14,07 ± 0,42 %, respectivamente, aunque sin diferencias significativas (p=0,29). En estos porcentajes también podrían estar incluidos aminoácidos libres, ya que con el método utilizado para la determinación de proteína se cuantificó el nitrógeno total (Mæhre *et al.*, 2018). En este sentido, los porcentajes de proteínas reportados por Pereira *et al.* (2015) en plantas aromáticas fueron generalmente menores a los determinados en R3 y R4.

En términos generales, R3 y R4 presentaron una caracterización fisicoquímica similar: por ejemplo, el contenido de hemicelulosa estuvo entre 24,24 ± 2,32 % y 26,67 ± 2,19 %, sin diferencias significativas (p=0,63). Sin embargo, sí se evidenciaron diferencias significativas en los resultados de lignina y COT (p<0,001), siendo mayor el porcentaje en las plantas aromáticas. La concentración de estos tres parámetros en R4 fue mayor en comparación con R3 y los demás residuos evaluados (Tabla 1). El alto contenido de COT en R3 y R4 se explica por su composición de lignina, hemicelulosa y celulosa, compuestos de estructura compleja que contienen considerables cantidades de carbono (Xu, 2010; Nair *et al.*, 2017).

Los residuos de ameros de mazorca y vainas de leguminosas (R5) presentaron el mayor porcentaje de celulosa (35,29 ± 0,77 %), seguidos por los residuos de hojas y tallos tiernos de verduras (R6) (33,78 ± 0,91 %), pero sin diferencias significativas entre ellos (p=0,19). Aunque la celulosa se encuentra naturalmente en la pared celular de los vegetales, la mayor concentración de este polímero se da en hojas y tallos (Kulic & Radojičić, 2011; Kögel Knabner & Amelung, 2014), por lo que en R5 y R6 se pudieron encontrar las más altas concentraciones de celulosa, comparables con las reportadas en residuos agrícolas de origen similar, como hojas, tallos y ameros de mazorca (35,6 - 41,2 %), residuos herbáceos (29,9 - 45,3 %) y de coliflor (35,0 - 66,97 %) (Toushik *et al.*, 2017; Deshavath *et al.*, 2019).

El contenido de grasas y aceites fue menor en comparación con los otros parámetros evaluados (**Tabla 1**) y con otros residuos agrícolas como el salvado de trigo, los desperdicios de café y las cáscaras de yuca y de banano caracterizados por otros autores (**Ravindran et al., 2018**).

Según los resultados de la caracterización fisicoquímica (**Tabla 1**), los residuos de tubérculos (R1) podrían aprovecharse como sustratos en la producción de amilasas por su contenido de almidón. Otros estudios han demostrado que a partir de residuos de cáscaras de papa se pueden obtener enzimas amilolíticas (**Obi et al., 2019; Sánchez & Heredia, 2020**). Dado el porcentaje de lignina de los residuos de plantas aromáticas (R4) y ornamentales (R3), estos podrían usarse en la obtención de ligninasas, en tanto que los ameros de mazorca, las vainas de leguminosas (R5) y los residuos de verduras (R6) podrían usarse en la producción de celulasas gracias a su composición celulósica. De hecho, se han evaluado los residuos agroindustriales del maíz y de tallos de flores como sustratos para la producción de enzimas lignocelulolíticas (**Amadi et al., 2020; Heredia & Sánchez, 2021**).

Para aprovechar los residuos de frutas (R2) de las plazas de mercado, estos deben seleccionarse durante la recolección, de manera que su composición esté representada principalmente por cáscaras de cítricos, ya que tienen la mayor cantidad de este polímero. Asimismo, para producir proteasas a partir de los residuos de plazas de mercado se deberán complementar las plantas ornamentales y aromáticas con otros residuos de cereales como avena o trigo y de leguminosas como frijol, lenteja, garbanzo y arveja, ya que estos presentan mayores contenidos de proteínas que los R3 y R4 (**Mohammad & Teow, 2015; Gorissen et al., 2018**).

Los residuos recolectados en la plaza distrital de mercado de El Restrepo y evaluados en este estudio contienen porcentajes de grasas y aceites entre  $0,23 \pm 0,05$  % y  $1,16 \pm 0,23$  %, cantidades que no permitirían su aprovechamiento como sustrato en la producción de lipasas. Las semillas de mango y mamey, entre otras, podrían considerarse como posibles sustratos para la producción de lipasas, ya que presentan mayores contenidos de grasas y aceites (**Fuentes & Durán, 2005**). Sin embargo, además de las posibles dificultades en su pretratamiento para el aprovechamiento en la producción de enzimas, no se las ha encontrado en los residuos recolectados en plazas de mercado.

Aunque el uso de R1 y R6 como sustratos en la obtención de enzimas microbianas puede verse limitado porque el nitrógeno, fundamental para el crecimiento de los microorganismos (**Zhang et al., 2019**), presentó un bajo porcentaje (1,04 a 2,87 %) en estos residuos. Esto podría subsanarse suplementando los sustratos con fuentes adicionales de nitrógeno. La relación C-N de R3, R4 y R6 estuvo entre 21,61 y 23,03, lo que favorecería el crecimiento microbiano en ellos, pues una relación entre 20 y 30 facilita la disponibilidad de los nutrientes (**Brust, 2019**). Además, el bajo contenido de azúcares reductores en los residuos evaluados sería una ventaja para que los microorganismos utilicen como fuente de energía polímeros como el almidón, la celulosa y la lignina, disponibles en todos los tipos de residuos estudiados, en lugar de moléculas sencillas como la glucosa.

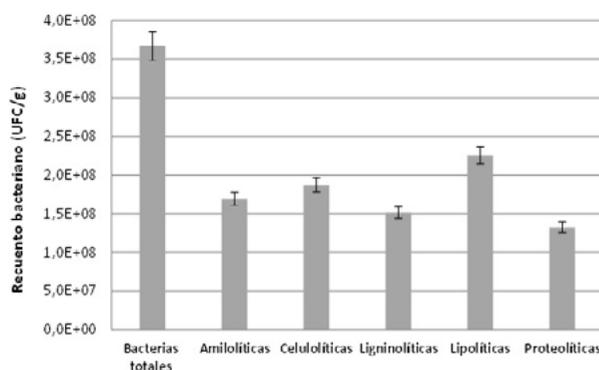
Es importante mencionar que la clasificación que se hizo para este estudio incluye seis tipos de residuos que, dependiendo del día de la semana y la época del año, podrían variar en su composición, lo cual afecta, a su vez, la reproducibilidad de los resultados de la caracterización fisicoquímica. Esto se evidencia en los resultados de la **tabla 1**: por ejemplo, en el porcentaje de humedad se presenta una variación entre  $\pm 1,65$  y  $\pm 6,67$  en las desviaciones estándar de todos los residuos. En los residuos agrícolas evaluados se encontró una población bacteriana con diversa capacidad enzimática (**Figura 1**). Los microorganismos lipolíticos se caracterizan por metabolizar grasas y aceites, por lo que generalmente se aíslan a partir de residuos con alto contenido de lípidos (**Peil et al., 2016; Furini et al., 2018; Rihani et al., 2018**). En nuestro estudio, sin embargo, las bacterias lipolíticas presentaron la mayor concentración, a pesar de que el contenido de grasas y aceites en los residuos evaluados estuvo por debajo de  $1,16 \pm 0,23$  % (**Tabla 1**). Es posible que la elevada población de bacterias lipolíticas en estos residuos haya generado

una acelerada degradación de las grasas y aceites presentes, lo que se reflejaría en los resultados determinados para estos compuestos. El recuento de bacterias lipolíticas en residuos agrícolas estuvo dentro del rango ( $7,00 \times 10^6$  a  $6,13 \times 10^8$  CFU/g) reportado para desperdicios de comida recolectados en un restaurante (Tsai *et al.*, 2007).

Las bacterias celulolíticas presentaron el segundo recuento más alto entre los residuos evaluados (Figura 1). Este resultado se debe probablemente al alto contenido de celulosa determinado en R2 a R6 (Tabla 1), lo que demuestra que los residuos agrícolas generados en plazas de mercado son una fuente importante de microorganismos y de sustratos para la producción de celulasas. Si bien es cierto que la mayoría de las celulasas obtenidas a partir de la fermentación de residuos agroindustriales se producen con sustratos como el salvado de trigo y la cascarilla de arroz (Bharti *et al.*, 2018; Soeka & Sulistiani, 2019; Navaneethapandian *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021; Beladhadi *et al.*, 2022), los residuos de frutas, plantas ornamentales y medicinales, ameros de mazorca, vainas de leguminosas y verduras serían una nueva opción de sustratos de bajo costo para la producción de celulasas debido a su contenido de celulosa.

Los residuos que aportaron una concentración considerable de almidón fueron los de tubérculos (Tabla 1), al parecer en niveles suficientes para permitir el crecimiento de bacterias amilolíticas, con un recuento de  $1,7 \times 10^8$  CFU/g, menor al reportado en lagos y suelos de plantaciones de banano (Adriano *et al.*, 2012; Ojovan *et al.*, 2021). En estos estudios las bacterias proteolíticas también fueron las de menor representación, en tanto que en los residuos evaluados aquí, los microorganismos proteolíticos presentaron una mayor cantidad (Figura 1). Las bacterias ligninolíticas, al igual que las proteolíticas, tuvieron poca representación frente a las demás poblaciones evaluadas, con un recuento de  $1,5 \times 10^8$  CFU/g, similar al reportado para otros residuos lignocelulósicos (Ventorino *et al.*, 2013; Parillo *et al.*, 2017). La lignina es un polímero más fácilmente degradable por los hongos que por las bacterias, por lo que estas la asimilan más lentamente y su recuperación en medios de cultivo puede ser limitada (Janusz *et al.*, 2017). Los residuos evaluados no estaban constituidos exclusivamente por fuentes proteicas, lo que se evidenció en el bajo porcentaje de proteína determinado (Tabla 1). Además, el método usado en nuestro estudio cuantifica el nitrógeno total sin discriminar el orgánico del inorgánico, por lo que los microorganismos podrían tomar las fuentes inorgánicas de nitrógeno o aminoácidos libres para su metabolismo sin verse obligados a producir proteasas para la obtención de nitrógeno a partir de proteínas, razón por la que posiblemente la proporción de la población proteolítica fue menor que la de las demás poblaciones microbianas determinadas.

A partir de los residuos agrícolas se lograron aislar e identificar 133 colonias bacterianas de morfología diferente que fueron evaluadas cualitativamente en cuanto a su actividad enzimática, obteniéndose un total de 55 cepas preseleccionadas: 17 ligninolíticas, 14 proteolíticas, 11 celulolíticas, 9 lipolíticas y 4 amilolíticas.



**Figura 1.** Recuento de bacterias presentes en residuos agrícolas generados en la plaza distrital de mercado de El Restrepo

A pesar de que las bacterias ligninolíticas y proteolíticas tuvieron los menores recuentos (**Figura 1**), de ellas se preseleccionó el mayor número de cepas. Esto sugiere que en estas dos poblaciones bacterianas se pudieron identificar colonias con mayor diversidad morfológica entre sí, comparadas con las bacterias amilolíticas, que, aunque con un mayor recuento ( $1,7 \times 10^8$  UFC/g), solamente registraron 24 morfotipos, de los cuales cuatro se seleccionaron por su actividad enzimática. En este caso, el porcentaje de selección de las bacterias amilolíticas fue del 16,7 %, mayor al reportado por **Saha et al.** (2019), quienes seleccionaron ocho cepas amilolíticas de 100 aisladas del suelo de vertederos de residuos de plazas de mercado.

Las 55 cepas aisladas tienen potencial para la producción de enzimas microbianas utilizando sustratos de bajo costo a partir de los residuos orgánicos generados en plazas de mercado, probablemente con mejores rendimientos debido a que estos microorganismos ya están adaptados a este medio. Sin embargo, es necesario realizar estudios adicionales de selección de cepas basados en métodos cuantitativos, así como ensayos de producción de enzimas a partir de los microorganismos con mayor actividad enzimática, y evaluar la producción de enzimas de las cepas seleccionadas en medios de cultivo elaborados a partir de esta biomasa residual.

## Conclusiones

La composición fisicoquímica de los residuos agrícolas generados en plazas de mercado permite su valorización como sustratos para la producción de amilasas, celulasas y ligninasas. El contenido de almidón en los residuos de tubérculos podría aprovecharse en la producción de enzimas amilolíticas, y el porcentaje de celulosa en ameros de mazorca, vainas de leguminosas y residuos de verduras los convierte en un sustrato viable para la obtención de celulasas. Asimismo, las plantas aromáticas y ornamentales podrían utilizarse en procesos fermentativos para producir ligninasas. Aunque los residuos evaluados no son potencialmente utilizables en la producción de lipasas, proteasas y pectinasas, sí se pudieron seleccionar cepas lipolíticas y proteolíticas en ellos. Además, se lograron aislar y seleccionar bacterias amilolíticas, celulolíticas y ligninolíticas que también pueden utilizarse en la producción de enzimas aprovechando la biomasa residual generada en las plazas de mercado.

## Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1652/3264>

## Agradecimientos

A SENNOVA, a los aprendices del semillero BioTec del grupo de investigación en Procesos Industriales, así como a los directivos y a los técnicos de laboratorio del Centro de Gestión Industrial CGI – SENA, donde se llevó a cabo este estudio. Al Instituto para la Economía Social (IPES) por conceder los permisos requeridos y por el apoyo brindado durante la recolección de residuos en la plaza distrital de mercado de El Restrepo (Bogotá D.C.).

## Contribución de los autores

Los dos autores contribuyeron de igual manera en todos los aspectos del estudio.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay ningún conflicto de intereses.

## Referencias

**Abdel Shafy, H. & Mansour, M.** (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27, 1275-1290.

- Adriano, M., Gutiérrez, F., Dendooven, L., Salvador-Figueroa, M.** (2012). Influence of compost and liquid bioferment on the chemical and biological characteristics of soil cultivated with banana (*Musa spp. L.*). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *12*, 33-43.
- Alayón, E.** (2020). Guía para la caracterización y cuantificación de residuos sólidos. *Inventum*, *15*, 76-94.
- Amadi, O., Egong, E., Nwagu, T., Okpala, G., Onwosi, C., Chukwu, G., Okolo, B., Agu, R., Moneke, A.** (2020). Process optimization for simultaneous production of cellulase, xylanase and ligninase by *Saccharomyces cerevisiae* SCPW 17 under solid state fermentation using Box-Behnken experimental design. *Heliyon*, *6*, 1-12.
- Beladhadi, R., Shankar, K., Jayalakshmi, S.** (2022). Production of Cocktail of Lignolytic, Cellulolytic and Hemicellulolytic Enzymes by the Novel Bacterium *Burkholderia* sp. SMB1 Utilizing Rice Bran and Straw: Application in the Saccharification of Untreated Agro-wastes for Bioethanol Production. *Waste and Biomass Valorization*, *13*, 1565-1577.
- Bharathiraja, S., Suriya, J., Krishnan, M., Manivasagan, P., Kim, S.** (2016). Production of Enzymes From Agricultural Wastes and Their Potential Industrial Applications. *Advances in Food and Nutrition Research*, *80*, 125-148.
- Bharti, A., Kumar, A., Dharm, D.** (2018). Wheat bran fermentation for the production of cellulase and xylanase by *Aspergillus niger* NFFCI 4113. *Research Journal of Biotechnology*, *13*, 11-18.
- Bhuyan, N., Narzari, R., Gogoi, L., Bordoloi, N., Hiloidhari, M., Palsaniya, D.R., Deb, U., Gogoi, N., Katak, R.** (2020). Valorization of agricultural wastes for multidimensional use. En: R. Katak, S. Kumar Khanal. (Ed.), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 41-78). Elsevier.
- Bigdeloo, M., Teymourian, T., Kowsari, E., Ramakrishna, S., Ehsani, A.** (2021). Sustainability and Circular Economy of Food Wastes: Waste Reduction Strategies, Higher Recycling Methods, and Improved Valorization. *Materials Circular Economy*, *3*, 1-9.
- Brust, G.** (2019). Management Strategies for Organic Vegetable Fertility. En D. Biswas y S. A. Micallef. (Ed.), *Safety and Practice for Organic Food* (pp. 193-212). Academic Press.
- Cardona, C., Sánchez, O., Ramírez, J., Alzate, L.** (2004). Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *6*, 78-89.
- de Castro, R. & Sato, H.** (2015). Enzyme Production by Solid State Fermentation: General Aspects and an Analysis of the Physicochemical Characteristics of Substrates for Agro-industrial Wastes Valorization. *Waste and Biomass Valorization*, *6*, 1085-1093.
- Deshavath, N.N., Veeranki, V.D., Goud, V.V.** (2019). Lignocellulosic feedstocks for the production of bioethanol: availability, structure, and composition. En R. Mahendra. (Ed.), *Sustainable Bioenergy: Advances and Impacts* (pp. 1-19). Elsevier.
- Englyst, K.N., Hudson, G.J., Englyst, H.N.** (2006). Starch Analysis in Food. En R. Meyers. (Ed.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory, and Instrumentation* (pp. 4246-4262). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Fuentes, J. & Durán, M.** (2005). Recovery Fats and Oils from Agro-industrial Wastes and By-Products for Use in Industrial Applications. *Journal of Applied Sciences*, *5*, 983-987.
- Furini, G., Berger, J., Campo, J., Van der San, S., Germani, J.** (2018). Production of lipolytic enzymes by bacteria isolated from biological effluent treatment systems. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, *90*, 2955-2965.
- Gavidia, J.G., Venegas, E.A., Ríos, M., Uribe, J.C., Gutiérrez, D.D., Rengifo, R.A., Martínez, J.L.** (2020). Determination of the nitrogen to protein conversion factor in eggs of *Coturnix coturnix* L. (Japanese quail). *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, *39*, 706-708.
- Gorissen, S., Crombag, J., Senden, J., Waterval, W., Bierau, J., Verdijk, L., van Loon, L.** (2018). Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. *Amino Acids*, *50*, 1685-1695.
- Heredia, J. & Sánchez, E.** (2021). Evaluation of sugarcane bagasse and flower stems as substrates for cellulase production by *Bacillus amyloliquefaciens* C18 A. *Research Journal of Biotechnology*, *16*, 144-148.
- Janusz, G., Pawlik, A., Sulej, J., Świdarska, U., Jarosz, A., Paszczyński, A.** (2017). Lignin degradation: microorganisms, enzymes involved, genomes analysis and evolution. *FEMS Microbiology Reviews*, *41*, 941-962.
- Kirn, F., Siddiq, A., Noreen, S., Khalid, A., Irshad, M.** (2018). Optimized Production of Cellulase (CMCase). *International Journal of Applied Biology and Forensics*, *2*, 194-202.
- Kögel Knabner, I. & Amelung, W.** (2014). Dynamics, Chemistry, and Preservation of Organic Matter in Soils. En H. D. Holland y K. K. Turekian. (Ed.), *Treatise on Geochemistry* (pp. 157-215). Oxford, Inglaterra: Elsevier.

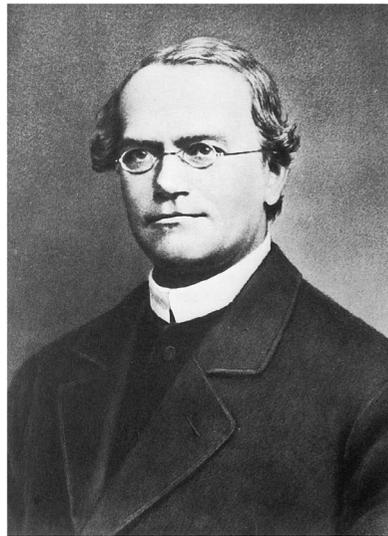
- Kulic, G. & Radojičić, V.** (2011). Analysis of cellulose content in stalks and leaves of large leaf tobacco. *Journal of Agricultural Sciences*, 56, 207-215.
- Mæhre, H., Dalheim, L., Edvinsen, G., Elvevoll, E., Jensen, I.J.** (2018). Protein Determination - Method Matters. *Foods*, 7, 1-11.
- Mengqi, Z., Shi, A., Ajmal, M., Ye, L., Awais, M.** (2021). Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11, 1-24.
- Mohammad, A. & Teow, Y.** (2016). Ultrafiltration for Food Processing. En G. Smithers.(Ed.), Reference Module in Food Science (págs. 1-6). Elsevier.
- Müller, J., Bencivenni, M., Caligiani, A., Tedeschi, T., Bruggeman, G., Bosch, M., Petrusan, J., Van Droogenbroeck, B., Elst, K., Sforza, S.** (2016). Pectin content and composition from different food waste streams. *Food Chemistry*, 201, 37-45.
- Nair, A., Ithnin, N., Sim, H., Appleton, D.** (2017). Energy Crops. En B. Thomas, B. G. Murray y D. J. Murphy. (Ed.), Encyclopedia of Applied Plant Sciences (págs. 164-176). Academic Press.
- Navaneethapandian, U., Kumar, A., Liduja, K., Jayachithra, R., Gopakumaran, N.** (2021). Biocatalyst: Cellulase Production in Solid State Fermentation (SSF) Using Rice Bran as Substrate. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11, 7689-7699.
- Obi, N., Okezie, O., Ezugwu, A.** (2019). Amylase Production by Solid State Fermentation of Agroindustrial Wastes Using Bacillus species. *European Journal of Nutrition & Food Safety*, 4, 408-414.
- Ojovan, B., Rodica, C., Neagu, S., Cojoc, R., Lucaci, A., Marutescu, L., Florescu, L., Ruginescu, R., Enache, M., Moldoveanu, M.** (2021). Metabolic Potential of Some Functional Groups of Bacteria in Aquatic Urban Systems. *Fermentation*, 7, 1-11.
- Olanbiwoninu, A. A. & Fasiku, S.** (2015). Production of bacterial amylases and cellulases using sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) peels. *African Journal of Biochemistry*, 9, 104-109.
- Ortiz-Sánchez, I.A., Álvarez-Reyna, V.d., González-Cervantes, G.V., Potisek-Talavera, M.d., Chávez-Simental, J.A.** (2015). Concentración de almidón y proteínas solubles en tubérculos de *Caladium bicolor* en diferentes etapas fenológicas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 483-494.
- Panchami, P. & Gunasekaran, S.** (2017). Extraction and Characterization of Pectin from Fruit Waste. *International Journal of Current Microbiology and Applied*, 6, 943-948.
- Parillo, R., Ventorino, V., Pepe, O., Cornejo, P., Testa, A.** (2017). Use of Compost from Chestnut Lignocellulosic Residues as Substrate for Tomato Growth. *Waste and Biomass Valorization*, 8, 2711-2720.
- Peil, G., Kuss, A., Rave, A., Villarreal, J., Hernandez, Y., Nascente, P.** (2016). Bioprospecting of lipolytic microorganisms obtained from industrial effluents. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88, 1769-1779.
- Pereira, C., Barros, L., Ferreira, I.** (2015). A Comparison of the Nutritional Contribution of Thirty-nine Aromatic Plants used as Condiments and/or Herbal Infusions. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70, 176-183.
- Ravindran, R., Hassan, S., Williams, G., Jaiswal, A.** (2018). A review on bioconversion of agro-industrial wastes to industrially important enzymes. *Bioengineering*, 5, 1-20.
- Rihani, A., Tichati, L., Soumati, B.** (2018). Isolation and identification of lipase-producing fungi from local olive oil manufacture in east of Algeria. *Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 19, 13-22.
- Robertson, T., Alzaabi, A., Robertson, M., Fielding, B.** (2018). Starchy carbohydrates in a healthy diet: The role of the humble potato. *Nutrients*, 10, 1-28.
- Saha, M. L., Islam, K. N., Akter, T., Rahman, I. A., Islam, T., Khan, T.** (2019). Isolation and identification of amylolytic bacteria from garbage and garden soil. *Bangladesh Journal of Botany*, 48, 537-545.
- Sánchez, E.M. & Heredia, J.P.** (2020). Evaluación de residuos de cáscaras de papa como sustrato para la producción de amilasas a partir de *Bacillus amyloliquefaciens* A16. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 44, 794-804.
- Santos, F., Teixeira de Carvalho, L., de Carvalho Cardoso, A., de Melo Santos, S.** (2021). Evaluation of the production of cellulases by *Penicillium* sp. FSDE15 using corncob and wheat bran as substrates. *Bioresource Technology Reports*, 14, 1-6.
- Sarkar, N., Kumar, S., Satarupa, G., Bannerjee, S., Aikat, K.** (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 37, 19-27.

- Soeka, Y. & Sulistiani.** (2019). Production and characterization of cellulase from the newly isolated *Bacillus subtilis* A8 on rice bran and corncob. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 308, 1-10.
- Subramanian, R., Subbramaniyan, P., Noorul Ameen, J., Raj, V.** (2016). Double bypasses soxhlet apparatus for extraction of piperine from *Piper nigrum*. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, 537-540.
- Toushik, S.H., Lee, K.Y., Lee, J.S., Kim, K.S.** (2017). Functional Applications of Lignocellulolytic Enzymes in the Fruit and Vegetable Processing Industries. *Journal of Food Science*, 82, 585-593.
- Tsai, S., Liu, C., Yang, S.** (2007). Microbial conversion of food wastes for biofertilizer production with thermophilic lipolytic microbes. *Renewable Energy*, 32, 904-915.
- Twinomuhwezi, H., Awuchi, C., Kahunde, D.** (2020). Extraction and Characterization of Pectin from Orange (*Citrus sinensis*), Lemon (*Citrus limon*) and Tangerine (*Citrus tangerina*). *American Journal of Physical Sciences*, 1, 17-30.
- Valderrama, C., Fernández, A., Duque, Y.** (2109). Caracterización y análisis del aprovechamiento de residuos vegetales generados en la central de abastos Merca-Neiva. *Ingeniería y región*, 22, 4-13.
- Ventorino, V., Parillo, R., Testa, A., Aliberti, A., Pepe, O.** (2013). Chestnut Biomass Biodegradation for Sustainable Agriculture. *Bioresources*, 8, 4647-4658.
- Walkley, A.J. & Black, I.A.** (1934). Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Xu, F.** (2010). Structure, Ultrastructure, and Chemical Composition. En S. Run Cang. (Ed.), *Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biomaterials and Biofuels* (pp. 9-47). Elsevier.
- Zhang, S., Zheng, Q., Noll, L., Hu, Y., Wanek, W.** (2019). Environmental effects on soil microbial nitrogen use efficiency are controlled by allocation of organic nitrogen to microbial growth and regulate gross N mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 304-315.

Ensayo

**En el bicentenario de Gregor Mendel: una conmemoración de su herencia y herederos**

**On Gregor Mendel's Bicentenary: A Commemoration of His Heritage and Heirs**



Gregor Mendel (1822-1884)

Tomado de: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gregor\\_Mendel\\_2.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gregor_Mendel_2.jpg)

**Citación:** Gómez Gutiérrez A. En el bicentenario de Gregor Mendel: una conmemoración de su herencia y herederos. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):685-689, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1732>

**Editor:** Elizabeth Castañeda

**\*Correspondencia:**

Alberto Gómez Gutiérrez;  
[agomez@javeriana.edu.co](mailto:agomez@javeriana.edu.co)

**Recibido:** 21 de julio de 2022

**Aceptado:** 21 de julio de 2022

**Publicado en línea:** 22 de julio de 2022



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

Gregor Mendel nació en Moravia, en un pequeño pueblo que se conocía como Heinzendorf en los tiempos del dominio austríaco en esa región centroeuropea, y que hoy ha recuperado su nombre checo de Hynčice. De la misma manera, deberíamos referirnos hoy a Gregor *Mendl* (no Mendel) que corresponde mejor a la etimología checa del primer apellido del precursor de la genética o, mejor, a *Johann Mendl*, que era su nombre de pila. No obstante, nos referiremos a él en este escrito con el apellido con el que se le conoce universalmente, y también con el nombre Gregor, que utilizó en vida en función de su adscripción a la comunidad religiosa agustina.

Mendel, entonces, había nacido en este pueblito checo el 22 de julio de 1822, hace 200 años, de padre jornalero (Anton Mendl) y de su esposa Rosine quien provenía, como parecería indicarlo su nombre, de una familia de jardineros. Tal vez no sea inapropiado decir que Mendel “heredó” su gusto por la horticultura. En todo caso, sus inclinaciones científicas lo llevaron a estudiar física y matemáticas, además de historia natural en la universidad de Viena. Uno de sus docentes, el austríaco Christian Johann Doppler (1803-1853), postularía en 1842 la teoría sobre el efecto que lleva su nombre y que establece que la frecuencia observada de una onda luminosa o sonora depende de la velocidad y dirección de su fuente en relación con el observador, antecediendo a Albert Einstein (1879-1955) en sus postulados de la teoría de la relatividad. El nivel de las clases de Doppler debió ser muy elevado para el joven Mendel, quien fracasó en algunas pruebas y no consiguió graduarse.

Sus calidades como docente, sin embargo, le aseguraron una posición de profesor en el monasterio de Brno, ciudad principal del cantón de Moravia. Tal vez allí desarrolló el carácter que definiría mejor su verdadero legado, tal y como lo calificó uno de los editoriales de la revista *Nature* del 21 de julio pasado: “cuidadoso, riguroso y humilde”. En este monasterio llegó a ser nombrado abad en 1868, lo cual le dejó cada vez menos tiempo para su pasatiempo de hibridador de plantas y abejas que eran moda en Europa desde finales del siglo XVIII, cuando el botánico alemán Joseph Gottlieb Koelreuter (1733-1806) había logrado sus primeros híbridos con plantas de tabaco. Uno de los discípulos de Koelreuter, Carl Friedrich von Gärtner (1772-1850) —otro jardinero de apellido—, publicó un enorme trabajo de hibridación vegetal titulado *Experimentos y observaciones sobre la hibridación en el reino de las plantas* (1849), el cual contenía más de 10.000 cruces con 700 especies de 80 géneros diferentes, obteniendo a partir de éstos 250 formas híbridas nuevas. En el siglo XIX, todos los agricultores y ganaderos que se respetaran se dedicaban pacientemente a la selección de especies domesticadas. Esta afición tenía un impacto evidente sobre la calidad de los vegetales y animales de la época, tanto que, según algunos historiadores, en 1810 un carnero con pedigrí valía 100 veces más en el mercado de Brno que uno sin su genealogía (Gómez Gutiérrez, Briceño Balcázar, Bernal Villegas, 2007). Si todo el mundo hacía cruces y buscaba los mejores híbridos, ¿cuál fue, entonces, la originalidad de Mendel?

Primero que todo debemos decir que fue una mezcla de originalidad y suerte. La afortunada elección de las arvejas (*Pisum sativum*) —que seguramente resultaba de la necesidad de cultivar una buena verdura para la alimentación de los monjes—, el que los caracteres que Mendel decidió observar a través de las generaciones no se encontraran en este género vegetal en desequilibrio de ligamiento —es decir, que no se transmitieran asociados los unos a los otros—, y que en general estos caracteres estuvieran codificados en cromosomas diferentes —cosa que él no podía saber—, le permitió cumplir con las premisas que él mismo describiría para quienes se interesaran en estudiar la transmisión de rasgos vegetales. Éstos debían: a- poseer caracteres diferenciales constantes, b- estar naturalmente protegidos durante la floración, sobre todo en el caso de los híbridos, o ser fáciles de proteger del polen exógamo, y c- no producir en los híbridos y sus descendientes ninguna alteración notable de la fertilidad a través de las generaciones. El abc de la segregación genética estable.

En segundo lugar, Mendel tuvo la fortuna de ser leído por otros investigadores, aunque todo apuntaba a que sus trabajos quedarían en el olvido pues publicó solo dos reportes en su vida sobre este tema, los cuales correspondieron a dos conferencias en la remota Sociedad de Historia Natural de Brno; estos fueron: *Investigaciones sobre los híbridos vegetales* (Mendel, 1866) y *Sobre algunos híbridos de Hieracium obtenidos por fecundación artificial* (Mendel, 1870). En el primero de ellos describe sus trabajos con las arvejas, dando lugar a los postulados que se conocerían como las leyes de Mendel, y en el segundo trabaja con plantas diferentes, pertenecientes a la familia de las compuestas. El botánico holandés Hugo M. de Vries (1848-1935) fue quien primero los sacó a la luz pública 16 años después de la muerte de Mendel en Brno en 1884, al citarlos como referencia de su trabajo sobre la segregación vegetal; aunque fueron sus colegas alemanes Carl Correns (1864-1935) y Erich von Tschermak-Seysenegg (1871-1962), quienes introdujeron en sus artículos el epónimo de leyes de Mendel para la posteridad.

En tercer lugar, además de acuñar dos conceptos esenciales de la herencia: el carácter dominante y el carácter recesivo de los rasgos heredables, Mendel logró, tal vez gracias a su temprana inclinación por las matemáticas, definir con precisión las proporciones en las que estos caracteres se presentaban a través de las generaciones. En efecto, al hacer que los híbridos se reprodujeran entre sí, determinó la conocida primera ley que estipula que las variantes dominante y recesiva de un carácter físico tienen una proporción de 3 a 1 en los descendientes de cada generación de híbridos. A esta conclusión llegó después de estudiar siete caracteres diferentes durante varias generaciones: altura de la planta (tallo alto o

bajo), color de las semillas (verde o amarillo), forma de las semillas (lisa o rugosa), color de la cubierta de la semilla (gris o blanca), forma de la vaina (entera o irregular), color de la vaina (verde o amarilla) y distribución de las flores en el tallo (laterales o apicales). El más citado de éstos es el de las semillas lisas o rugosas que fueron evaluadas en 253 híbridos que al segundo año ya habían dado 7.324 semillas (cada arveja es una semilla), entre las cuales 5.474 eran lisas y 1.850 eran rugosas. Esto resultaba en una proporción de 2,96:1 que, en promedio, reveló ser de 3:1 en cuanto a la expresión del rasgo dominante sobre el recesivo. Las dominantes, por su parte, se dividían en 2/3 que corresponderían a híbridos y 1/3 que era completamente dominante. Así, Mendel concluyó que los híbridos de cada par de caracteres diferenciales producen semillas de las cuales la mitad reproduce la forma híbrida, mientras que la otra mitad da plantas que permanecen constantes y adoptan, por partes iguales, unas el carácter dominante y las otras el carácter recesivo, confirmando que los híbridos tienen tendencia a regresar a las especies originales.

La segunda ley que Mendel postuló a través de sus trabajos es la que dice que parejas de caracteres diferentes se reparten o segregan de manera independiente los unos de los otros. Ésta, se supo después, es solamente aplicable a los caracteres que se presentan en distancias suficientemente amplias en un mismo cromosoma o que, preferiblemente, se presentan en cromosomas diferentes.

Es posible que el hecho de ser monje hubiera permitido a Mendel dedicarse con tanta paciencia —con tanto cuidado, rigor y humildad, para parafrasear al editorialista de *Nature*— a evaluar los caracteres de cada arveja, y para producir dos leyes que hoy en día siguen siendo principales en la genética: ¡siete pares diferentes en varias generaciones, uno solo de los cuales generaba 7.324 datos después de dos años! ¿Cuántos datos habrá tabulado en total? Podemos suponer, eso sí, que en el recóndito monasterio comían arvejas a voluntad. Pero veamos qué tiene que ver todo este trabajo de horticultura con los fundamentos de la ciencia moderna.

El sentido más trascendente de los experimentos y de las conclusiones de Mendel es, sin duda, el de la aplicación de las matemáticas a las leyes de la herencia. Antes de su tiempo, y mientras se descubrieron sus hallazgos, el trabajo de los hibridadores tenía que ver, como máximo, con una selección activa de las especies, y la documentación de este proceso apenas se podía asimilar a una rudimentaria genealogía. La combinación de la genealogía, la hibridación y las matemáticas produjo una nueva ciencia: la genética. Por esta razón a Mendel se le considera hoy el padre de una actividad que se dedicó desde comienzos del siglo XX a determinar la proporción y la característica de los rasgos heredables. En esta búsqueda aparecerían investigadores como el suizo Johann Friedrich Miescher (1844-1895), quien describió los ácidos nucleicos como nucleínas en su artículo *Ueber die chemische zusammensetzung der eiterzellen* (1871), o el alemán Heinrich Wilhelm Gottfried von Waldeyer-Hartz (1836-1921), quien sugirió en 1888 el término de *cromosoma* para los filamentos de cromatina que aparecían durante la división celular, tal y como lo había mostrado en 1882 Walther Flemming (1843-1905), o bien el norteamericano Thomas Hunt Morgan (1866-1945), quien en su libro *The theory of the gene* (1928) definió las unidades que servirán a la medicina como referencia para el soporte de enfermedades, utilizando para éstas el término *gen*, propuesto en 1909 por el botánico danés Wilhelm Ludvig Johannsen (1857-1927).

Morgan había notado que había más caracteres que cromosomas y que, por consiguiente, cada cromosoma debía controlar un número plural de caracteres. En particular, propuso la existencia de un lugar o *locus* (plural: *loci*) para cada carácter y el novedoso concepto de *alelo* para cada variación que se presente en los caracteres que ocupan un mismo lugar en el cromosoma. Su primer mapa del genoma, elaborado en la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*) fue el primer paso que se dio en la cartografía genética que llegaría a producir a comienzos del siglo XXI el mapa completo de los genes en el hombre o genoma humano (Morgan, 1911). Por su trabajo pionero Morgan recibiría en 1933 el premio Nobel, quedando así incluido en una larga serie de investigadores que serían exaltados

con este premio por sus trabajos en el área disciplinar inaugurada por Mendel. El genetista español Juan Ramón Lacadena-Calero, en su discurso de ingreso a la Real Academia de Farmacia en 1995 en Madrid, titulado *Historia “nobelada” de la genética (1900-2016): concepto y método*, reeditado en 2016, relata cómo, entre todos los premios Nobel desde su establecimiento en 1901 hasta el año de su disertación, se había otorgado esta distinción a 55 científicos por sus aportes al conocimiento desde las trincheras de la genética. Además de éstos, decenas de científicos construyeron a partir de Mendel las bases de la ciencia que hoy conocemos con ese nombre. Entre todos ellos se han destacado especialmente James D. Watson (1928-) y Francis H. C. Crick (1916-2004), quienes, con base en los trabajos de cristalografía de sus colegas Rosalind Franklin (1920-1958) y Maurice Wilkins (1916-2004), y en especial con base en las propuestas pioneras de Linus C. Pauling (1901-1994) y Robert B. Corey (1897-1971) sobre la posible estructura en hélice del ADN, definieron la doble hélice como modelo de la molécula de la herencia, aclarando simultáneamente el mecanismo de duplicación de la información contenida en ella.

El impacto de todos estos hallazgos en la medicina es cada vez más evidente. De una medicina que se ocupaba del individuo en un contexto global —la medicina macroscópica—, nos hemos ya adentrado a partir de antecedentes en diferentes culturas y escuelas de pensamiento en su dimensión molecular o microscópica (Gómez Gutiérrez, 2002). El haber determinado que las características físicas de un individuo, así sea vegetal, son matemáticamente heredables, y que entre estas características podemos incluir un gran número de enfermedades, demuestra la importancia de la ciencia mendeliana —desarrollada a mediados del siglo XIX en el jardín posterior de un monasterio por un checo que nació hace 200 años— sobre el quehacer médico contemporáneo.

Esta percepción es la consecuencia lógica de una cadena de eventos científicos que comenzó con la pintura rupestre y llega hoy a ofrecer la posibilidad de predecir, antes de que nazca un individuo, muchas de las enfermedades que podrá sufrir en el curso de su vida, y aún a proponer que algunos de sus defectos genéticos podrían ser extirpados o regulados a través de la cirugía molecular. Mendel fue, como se ve, un eslabón clave en esta historia.

**Alberto Gómez Gutiérrez, PhD FLS**

## Referencias

- Correns, C.** (1900). G. Mendel's Regel über das Verhalten der Nachkommenschaft der Rassenbastarde. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 18, 158-168.
- De Vries, H.** (1900). Sur la loi de disjonction des hybrides. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, 130, 845-847.
- Doppler, C. J.** (1842). Ueber das farbige licht der Doppelsterne und eininger anderer Gestirne des Himmels. *Abhandlungen der Königlich Böhmisches Gesellschaft der Wissenschaften (Prague)*, 2, 465-482.
- Editorial.** (2022). The true legacy of Gregor Mendel: careful, rigorous and humble science. *Nature*, 607(7919), 421-422.
- Flemming, W.** (1882). *Zellsubstanz, Kern und Zelltheilung*, Leipzig, Vogel, 424 p.
- Gómez Gutiérrez, A.** (2002). *Del macroscopio al microscopio: historia de la medicina científica*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana – Academia Nacional de Medicina, 435 p.
- Gómez Gutiérrez, A., I. Briceño Balcázar, J. E. Bernal Villegas.** (2007). *Hereditas, diversitas et variatio: aproximación a la historia de la genética humana en Colombia*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana – Academia Nacional de Medicina, 231 p.
- Johannsen, W.** (1909). *Elemente der exakten Erblichkeitslehre*. Jena: Fischer, 516 p.
- Koelreuter, J. G.** (1761). *Vorläufige Nachricht von einigen, das Geschlecht der Pflanzen betreffenden Versuchen*. Leipzig: Gleditschischen Handlung, 156 p.
- Lacadena-Calero, J. R.** (2016). *Historia “nobelada” de la genética (1900-2016): concepto y método*. Madrid: Real Academia Nacional de Farmacia, 199 p.
- Mendel, G.** (1866). Versuche über Pflanzenhybriden. *Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn*, t. IV (para el año 1865), 3-47.

- 
- Mendel, G.** (1870). Ueber einige aus künstlicher Befruchtung gewonnenen Hieracium-Bastarde. *Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn*, t. 8, pp. 26-31.
- Miescher, J. F.** (1871). Ueber die chemische Zusammensetzung der Eiterzellen. *Medicisch-chemische Untersuchungen*, 4, 441-460.
- Morgan, T. H.** (1911). The influence of heredity and of environment in determining the coat colors of mice. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 21, 87-117.
- Morgan, T. H.** (1928). *The theory of the gene*. New Haven: Yale University Press, 358 p.
- von Waldeyer-Hartz, H. W. G.** (1888). Über Karyokinese und ihre Beziehungen zu den Befruchtungsvorgängen. *Archiv für mikroskopische Anatomie*, 32, 1-122.
- Pauling, L. C. & Corey, R. B.** (1953). A proposed structure for the nucleic acids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 39, 84-97.
- Von Gartner, C. F.** (1849) *Versuche und Beobachtungen über die Bastarderzeugung im Pflanzenreich*. Stuttgart, Hering, 790 p.
- Von Tschermak, E.** (1900). Ueber Künstliche Kreuzung bei *Pisum sativum*. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 18, 232-239.
- Watson, J. D. & Crick, F. H. C.** (1953). The molecular structure of nucleic acids. A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature*, 171, 737-738.

Original article

## Range extension and distribution update of *Hsunnycteris cadenai* (Chiroptera: Phyllostomidae)

### Extensión del rango y mapa de distribución actualizado de *Hsunnycteris cadenai* (Chiroptera: Phyllostomidae)

Leison Palacios-Mosquera<sup>1,\*</sup>, Víctor Danilo Palacios-Mayoral<sup>1</sup>,  
Yucely del Carmen Copete-Mosquera<sup>1</sup>, Alex Mauricio Jimenez-Ortega<sup>1</sup>,  
Hugo Mantilla-Meluk<sup>2</sup>, Paúl M. Velazco<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Manejo y Gestión de la Vida Silvestre del Chocó, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Programa de Biología, Universidad Tecnológica del Chocó “Diego Luis Córdoba”, Quibdó, Colombia

<sup>2</sup> Centro de Estudios de Alta Montaña (CEAM), Colección de Mamíferos, Grupo CIDERA, Universidad del Quindío (CMUQ), Armenia, Colombia

<sup>3</sup> Department of Mammalogy, American Museum of Natural History, New York, USA

<sup>4</sup> Department of Biology, Arcadia University, Glenside, USA

## Abstract

We report the northernmost collecting locality for the nectar-feeding bat *Hsunnycteris cadenai* in the Colombian Biogeographic Chocó. This record extends the range of the species to 224 km north of the species type locality in Zabaletas river, department of Valle del Cauca, and 75 km west of Santa Cecilia, Risaralda. The specimen was collected on May 5, 2010, in a primary forest in Pacurita, Central Chocó. Our specimen of *H. cadenai* (CMCH 883) exhibits all the diagnostic characteristics of the species including the lateral projections on the postorbital region, a skull length greater than 20.0 mm, and a forearm shorter than 34.5 mm. We also present an updated distribution map for the species.

**Keywords:** Bats; Biogeographic Chocó; Lonchophyllinae; primary forest.

## Resumen

Reportamos la localidad más norte conocida para *Hsunnycteris cadenai* en el Chocó biogeográfico de Colombia. Este registro extiende el área de distribución de la especie hasta 224 km al norte de la localidad tipo en el río Zabaletas, departamento del Valle del Cauca, y 75 km al occidente de la localidad de reporte de la especie más cercana en Santa Cecilia, Risaralda. El espécimen de *H. cadenai* (CMCH 883) fue recolectado el 5 de mayo de 2010 en un bosque primario y presenta las características diagnósticas de la especie (proyecciones laterales en la región postorbital, una longitud máxima del cráneo mayor a 20,0 mm y un antebrazo menor de 34,5 mm). Se presenta, además, un mapa actualizado de la distribución de *H. cadenai*.

**Palabras claves:** bosque primario; Chocó biogeográfico; distribución; murciélagos; Lonchophyllinae.

## Introduction

*Hsunnycteris* (Parlos *et al.*, 2014) is a Neotropical genus of nectarivorous bat belonging to the subfamily Lonchophyllinae (Phyllostomidae). This genus is distributed from Panama southward into South America where it occurs in Colombia, Venezuela, Guyana, Suriname, French Guiana, Brazil, Ecuador, Perú, and Bolivia (Parlos *et al.*, 2014; Velazco *et al.*, 2017). Four species are currently recognized within the genus: *H. cadenai* (Woodman & Timm, 2006), *H. pattoni* (Woodman & Timm, 2006), *H. thomasi* (Allen, 1904), and *H. dashe* (Velazco *et al.*, 2017). Except *H. dashe*, the other three species of the genus occur in Colombia (Mantilla-Meluk *et al.*, 2010; Ramírez-Chaves & Suárez-Castro, 2014; Velazco *et al.*, 2017).

**Citation:** Palacios-Mosquera L., Palacios-Mayoral VD, Copete-Mosquera Y del C. Range extension and distribution update of *Hsunnycteris cadenai* (Chiroptera: Phyllostomidae). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):690-696, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1631>

**Editor:** Martha Patricia Ramírez Pinilla

**\*Corresponding autor:**  
Leison Palacios-Mosquera;  
lepamo8@gmail.com

**Received:** February 16, 2022

**Accepted:** June 23, 2022

**Published on line:** July 26, 2022



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

Bats of the genus *Hsunnycteris* can be distinguished from the other genera in the subfamily Lonchophyllinae (*Lionycteris*, *Lonchophylla*, *Platalina*, and *Xeronycteris*) by the following combination of morphological characteristics: small size (greatest length of skull excluding the incisors (**GLS**): 19.5–22.5 mm, mandibular tooththrow length (**MANDL**): 6.2–7.0 mm), the proximal section of the dorsal fur paler than the tips, absence of hairs on the dorsal region of the uropatagium, rostrum shorter than braincase, infraorbital foramen above the anterior root of the second upper premolar, first and second upper premolars elongated, and the central cusp of lower premolars not deflected labially (**Velazco et al.**, 2017).

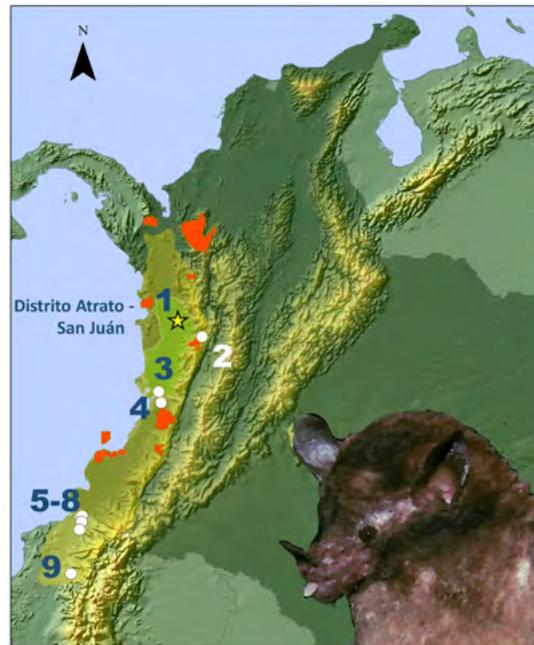
*Hsunnycteris cadenai* is known only from a few records in museum collections of specimens recovered from some localities on the Colombian Pacific Coast and foothills of the Cordillera Occidental, and from northwestern Ecuador (**Table 1**). Here, we present the northernmost collecting locality for *H. cadenai* in the hyper-humid rainforest of the Colombian Central Chocó, as well as an updated map of the species distribution.

## Materials and methods

On May 5, 2010 at 5:40 am, a male specimen of the genus *Hsunnycteris* was collected in the site Quebrada Los Puercos (5°40'04" N, 76°34'12.1" W) (**Figure 1**) within the Área de Importancia para la Conservación de Murciélagos (Area of Importance for Bat

**Table 1.** Localities where *Hsunnycteris cadenai* has been recorded

Specimens	Map	Locality	Coordinates	Reference
QCAZ 9095, 9096, 9564, 9565; TTU 85448, 85451, 85459	5	Ecuador: Esmeraldas, San Lorenzo; 53 m.	1° 15' N, 78° 46' W	<b>Tirira</b> (2012)
QCAZ 9094, 9567; TTU 102942	6	Ecuador: Esmeraldas, Estación Biológica la Chiquita; 53 m.	1° 13' N, 78° 45' W	<b>Tirira</b> (2012)
TTU 103183, 103195; QCAZ 9097, 9098	7	Ecuador: Esmeraldas, San Francisco de Bogotá; 63 m.	1° 5' N, 78° 42' W	<b>Tirira</b> (2012)
QCAZ M17030	8	Ecuador: Esmeraldas, Playa de Oro. Culo de Negra	0° 52' 16.32" N, 78° 47' 33.07" W	<b>Romero &amp; Vallejo</b> (2018)
QCAZ M16601	9	Ecuador: Pichincha, Cantón de San Miguel de los Bancos, Monterreal Rainforest Ecolodge. Coop. Ganaderos Orenses; 720 m.	0° 4' 52.45" N, 78° 59' 1.06" W	<b>Romero &amp; Vallejo</b> (2018)
ICN 12210	2	Colombia: Risaralda, Santa Cecilia, Pueblo Rico; 2430 m.	5° 14' N, 76° 2' W	<b>Mantilla-Meluk et al.</b> (2010)
USNM 338726	4	Colombia: Valle del Cauca, Bajo Calima	4° 1' N, 77° 0' W	<b>Woodman &amp; Timm</b> (2006)
ICN 9169; USNM 446481, 446482, 483359, 483363–483365	3	Colombia: Valle del Cauca, 29 km SE Buenaventura; 75 m.	3° 44' N, 76° 57' W	<b>Mantilla-Meluk et al.</b> (2010); <b>Woodman &amp; Timm</b> (2006)
CMCH 883	1	Colombia: Chocó, Pacurita, Quebrada Los Puercos; 113 m.	5° 40' 4" N, 76° 34' 12.1" W	This study



**Figure 1.** Geographical distribution of *Hsunycteris cadenai*. Previous records are represented by circles and the new report by a star. Locality and coordinates of the numbers on the map are presented in table 1.

Conservation) in Pacurita, Central Chocó (AICOM; A-CO-001), located in the Atrato-San Juan biogeographic district (**Hernández-Camacho, et al.**, 1992), in the central portion of the Tumbes-Chocó-Magdalena Priority Terrestrial Ecoregion (**Figure 1**). The specimen was collected with a 12-meter-long mist net installed 12 meters above the ground in a well-stratified primary forest. The night before the capture, the temperature was 24.7 °C and the relative humidity was 100%.

The specimen was preserved as a dry skin and a clean skull and deposited in the *Colección Mastozoológica del Chocó*, at *Universidad Tecnológica del Chocó* (CMCH 883). The fieldwork was part of the collecting efforts of the project: “Role of secondary forests (established through traditional selective logging) on bat diversity conservation at the Central Biogeographic Chocó Rainforest”.

The taxonomic determination of the specimen was based on the verification of the diagnostic characters described for the species in **Velazco, et al.** (2017). Additionally, ten measurements were taken (nine craniodental and one external) also following **Velazco et al.** (2017): greatest length of skull excluding the incisors (**GLS**); condyle incisive length (**CIL**); braincase breadth (**BB**); mastoid process width (**MPW**); maxillary tooththrow length (**MTRL**); width at M2 (**M2–M2**); greatest width of palate across labial margins of the M2s; mandibular tooththrow length (**MANDL**); dentary length (**DENL**); coronoid height (**COH**), and forearm length (**FA**). The craniodental and external measurements were taken in millimeters (mm) with a digital caliper (0.05 mm of accuracy) (**Table 2**). To develop the updated distribution map of the species, we used georeferenced records from the literature (**Woodman & Timm**, 2006; **Mantilla-Meluk et al.**, 2010; **Tirira**, 2012; **Romero & Vallejo**, 2018).

## Results

The specimen reported herein (CMCH 883) was identified as *Hsunycteris cadenai* based on the cranial, dental, and external morphological diagnostic characters of the species. Our specimen (CMCH 883) exhibits the lateral projections on the postorbital region (**Figure 2**),

as well as a maximum length of the skull greater than 20.0 mm and a forearm length less than 34.5 mm (**Table 2**). The pelage of the specimen is short between the shoulders (6.7 mm); the dermal papillae on the chin are V-shaped and appear separated by a narrow basal cleft; it exhibits small outer upper incisors; the lingual cusp is developed in the second upper premolar; it has a weakly developed parastyle in the first upper molar, large and wide lower incisors, a well-developed notch in the paracristid of the first lower molar, and a wide hypoconid in the second lower molar.

In **table 2** we present the comparisons of the external and cranial measurements of our specimen (CMCH 883). Two of the cranial measurements of our specimen fall outside the range reported for the species (braincase breadth 9.13 mm and mastoid process width 9.62 mm); all the other measurements fall within the reported range documented for the species. Other external measurements of our specimen not presented in **table 2** are total

**Table 2.** Craniodental and external measurements of *Hsunycteris cadenai*. Measurements were taken from: a) this study, b) **Woodman & Timm** (2006), c and d) **Mantilla-Meluk et al.** (2010), and e) **Tirira** (2012).

<i>H. cadenai</i>					
	CMCH 883 <sub>a</sub> male	USNM Holotype 483359 <sub>b</sub> male	ICN 12210 <sub>c</sub> male	ICN9169 <sub>d</sub> male	QCAZ <sub>e</sub> (5 male and 2 females)
GLS	21.29	21.70	21.73	21.52	21.5 (21.2–21.9)
CIL	20.43	20.00	20.14	20.00	20.4 (20.0–20.9)
BB	9.13	8.45	8.38	8.45	8.4 (8.1–8.7)
MPW	9.62	9.20	8.09	9.10	9.1 (8.9–9.3)
MTRL	6.73	6.90	6.95	6.97	6.9 (6.7–7.3)
M2–M2	5.17	5.23	5.12	5.23	5.1 (4.7–5.2)
MANDL	13.44	13.70	14.26	14.00	14.0 (13.3–14.4)
DENL	7.03	7.30	7.53	7.62	7.2 (7.0–7.4)
COH	4.07	–	–	–	4.2 (4.0–4.6)
FA	31.04	31.90	32.06	32.00	30.5 (29.7–32.3)



**Figure 2.** Dorsal and ventral views of the skull and lateral view of the skull and mandible of *Hsunycteris cadenai* (CMCH 883). The red arrow indicates the lateral projection in postorbital region, a diagnostic characteristic of the species. Scale bar = 5mm

body length (53.43 mm), tail length (6.87 mm), ear length (10.36 mm), foot length (5.07 mm), tibia length (17.72 mm), tragus length (4.45 mm); length of the third metacarpus (31.38 mm), calcaneus length (6.19 mm), wingspan (225 mm), and weight (6.9 gr).

*Hsunycteris cadenai* is only known from five localities in Ecuador and four in Colombia (**Table 1**) including Pacurita (Chocó), as reported here, which constitutes the northernmost record for the species. In Colombia, the species ranges from 50 to 2,430 m while in Ecuador it occurs at elevations below 1,000 m. The species is distributed across different types of habitats including evergreen lowland forests in northwestern Ecuador (**Tirira, 2012**), mountainous sub-Andean forests above 2,000 m (**Mantilla Meluk et al., 2010**), and tropical and hyper-humid forests in Central Chocó, Colombia. This portion of the species distribution encloses some of the rainiest areas of the Colombian Biogeographic Chocó with precipitations above 12,000 mm/yr which are considered a hot spot of biodiversity and species endemism (**Rangel et al., 2004**). Interestingly, *H. cadenai* appears to be an endemic species of the Biogeographic Chocó with all known localities for the species within this biogeographic unit (**Figure 1**).

Our specimen was captured along with the following species: *Artibeus lituratus* (Olfers, 1818); *Artibeus phaeotis* (Miller, 1902); *Artibeus watsoni* Thomas, 1901; *Carollia castanea* Allen, 1890; *Carollia perspicillata* (Linnaeus, 1758); *Carollia brevicauda* (Schinz, 1821); *Platyrrhinus helleri* (Peters, 1866); *Platyrrhinus dorsalis* (Thomas, 1900); *Rhinophylla alethina* Handley, 1966; *Uroderma convexum* Lyon, 1902; *Vampyressa thylene* Thomas, 1909, and *Vampyriscus nymphaea* (Thomas, 1909).

## Discussion

Bat nectivore forms provide important contributions to nature since they are responsible for the pollination of many unique Neotropical plant species, some of them with nocturnal flowering. In this context, the knowledge regarding pollinator agents of Chocó's vegetation, characterized by high levels of richness and endemism, is important for the design and implementation of conservation measurements. This new record of *H. cadenai* also represents an ecological extension for the species confirming its presence in the hyper-humid tropical rainforest (bp-T) of Chocó, which is characterized by precipitations above 12,000 mm/yr (**Figure 1**). The new record extends the distribution of the species to 224 km north of the type locality in Zabaletas River, Valle del Cauca (**Woodman & Timm, 2006**), and 75 km west of the nearest collecting locality in Santa Cecilia, Risaralda (**Mantilla-Meluk, et al., 2010**) (**Figure 1**).

Regarding its conservation status, the International Union for Conservation of Nature (IUCN) has classified *H. cadenai* as Data Deficient (DD) (**Solari, 2018**). Based on our intensive chiropteran sampling efforts in the region, we consider *H. cadenai* as a rare species, an observation also supported by **Tirira (2012)** for Ecuador. After more than ten years of continuous sampling in the area, here we introduce a record of the first *H. cadenai* specimen documented in the area. Given the high anthropogenic pressure in Chocó's forests in Colombia and in Ecuador forests and the apparent preference of *H. cadenai* for well-preserved primary forests, we recommend re-evaluating its conservation status. Additionally, *H. cadenai* should be considered as a focal species within the Pacurita Area of Importance for Bat Conservation (AICOM; A-CO-001), along with *Rhinophylla alethina* Handley, 1966; *Choeroniscus periosus* Handley, 1966, and *Lionycteris spurrelli* Thomas, 1913.

Although Colombia has one of the best-established systems of protected areas, its Pacific region is still underrepresented. An analysis of known museum records of *H. cadenai* in Colombia shows that only one collecting locality falls within an established protected area: the Tatamá National Natural Park, in the Atrato-San Juan biogeographic district (**Figure 1**). Biogeographic Chocó holds an extraordinary diversity of landscapes and ecosystems with an associated high environmental heterogeneity including a clinal variation of environmental variables such as temperature, relative humidity, evapotranspiration, and average annual precipitation, determining different types of vegetation covers and bat assemblages.

The AICOM Pacurita Chocó-Central is a key area for the protection of these bat species since the surrounding areas are under a high anthropogenic pressure, particularly mining and selective logging (Ramírez-Moreno & Ledezma-Rentería, 2007; Andrade-C, 2011; Valois-Cuesta & Martínez-Ruiz, 2016; UNODC, 2016; Mosquera-Andrade, 2014). However, AICOM lacks technical support under the Colombian legislation. It is urgent, therefore, to establish a protected area at the central portion of the Colombian Biogeographic Chocó. The *Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo del Chocó* (CODECHOCÓ), which is the local government institution in charge of environmental surveillance and control, has promoted the creation of a regional conservation area in Chocó's Central Rainforest, the Cabí-Ichó Biological Corridor, which includes the town of Pacurita, i.e., the collecting locality where we recorded the presence of *H. cadenai*.

## Acknowledgements

The authors would like to thank the members of the *Grupo de Investigación en Manejo y Gestión de la Vida Silvestre del Chocó* at the Technological University of Chocó, the community of Pacurita for keeping this natural laboratory of biodiversity (AICOM), and Luis Beltrán (Guachené) for his support and collaboration in the field.

## Author contributions

LPM: Manuscript writing, literature review, specimen diagnosis, measurement, metric morphological analysis of specimens, figures, georeferencing, and updated distribution map of the species; VDPM: Manuscript writing, specimen diagnosis, literature review, specimen measurement; YCCM: Revision of literature and manuscript writing; AMJO: Manuscript writing, literature review, and editorial process; HMM: Specimen diagnosis, manuscript writing, and preparation of the updated distribution map of the species; PMV: Figure preparation, specimen diagnosis, and manuscript writing

## Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Andrade-C.G. (2011). Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ciencia-política. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 35(137), 491-507.
- Hernández-Camacho, J., Hurtado, A., Ortiz, R., Walschburger, T. (1992). Unidades biogeográficas de Colombia. In: Halffter G, editor. *La Diversidad Biológica de Iberoamérica*. Xalapa: Acta Zoológica Mexicana. 105-151 p.
- Mantilla-Meluk, H., Ramírez-Chaves, H.E, Parlos, J.A., Baker, R.J. (2010). Geographic range extensions and taxonomic notes on bats of the genus *Lonchophylla* (Phyllostomidae) from Colombia. *Mastozoología Neotropical*, 17(2), 295-303.
- Mosquera-Andrade, D.H. (2014). Motores de la deforestación del bosque húmedo Tropical bh-T de la región noroccidental colombiana. *Revista de Investigación, Biodiversidad y Desarrollo*, 33(2), 96-104.
- Parlos, J.A., Timm, R.M., Swier, V.J., Zeballos, H., Baker, R.J. (2014). Evaluation of paraphyletic assemblages within Lonchophyllinae, with description of a New Tribe and Genus. *Occasional Papers Museum of Texas Tech University*, 320, 1-27.
- Ramírez-Chaves, H.E. & Suárez-Castro, A.F. (2014). Adiciones y cambios a la lista de mamíferos de Colombia: 500 especies registradas para el territorio nacional. *Mammalogy Notes*, 1(2), 31-34.
- Ramírez-Moreno, G. & Ledezma-Rentería, E. (2007). Efectos de las actividades socioeconómicas (minería y explotación maderera) sobre los bosques del departamento del Chocó. *Revista Investigación, Biodiversidad y Desarrollo*. XX (26), 58-65.
- Romero, V. & Vallejo, A.F. (2018). *Hsunycteris cadenai*. In: Brito, J., Camacho, M. A., Romero, V. Vallejo, A. F. (eds). *Mamíferos del Ecuador*. Versión 2018.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Date of entry: November, 16, 2021. Accessed on: <https://bioweb.bio/faunaweb/mammaliaweb/FichaEspecie/Hsunycteris%20cadenai>

- Solari, S. & Martínez-Arias, V.** (2014). Cambios recientes en la sistemática y taxonomía de murciélagos neotropicales (Mammalia: Chiroptera). *Therya*, 5(1), 167-196.
- Solari, S.** (2018). *Lonchophylla cadenai*. Lista Roja de especies amenazadas de la UICN 2018. Date of entry: August 12, 2021. Accessed on: <https://www.iucnredlist.org/species/88149262/88149265>
- Tirira, D.G.** (2012). Presencia confirmada de *Lonchophylla cadenai* Woodman & Timm, 2006 (Chiroptera, Phyllostomidae) para el noroccidente de Ecuador. 185-194, in: Investigación y conservación sobre murciélagos en el Ecuador (D. G. Tirira y S. F. Burneo, eds.). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Fundación Mamíferos y Conservación y Asociación Ecuatoriana de Mastozoología. Publicación especial sobre los mamíferos del Ecuador 9. Quito.
- UNODC.** (2016). Colombia explotación de oro de aluvión Evidencias a partir de percepción remota. Bogotá. Date of entry: September 21, 2021. Accessed on: [https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion\\_de\\_Oro\\_de\\_Aluvion.pdf](https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion_de_Oro_de_Aluvion.pdf)
- Valois-Cuesta, H. & Martínez-Ruíz, C.** (2016). Vulnerabilidad de los bosques naturales en el Chocó biogeográfico colombiano: actividad minera y conservación de la biodiversidad. *Bosque*, 37(2), 295-305.
- Velazco, P.M., Soto-Centeno, J.A., Fleck, D.W., Voss, R.S., Simmons, N.B.** (2017). A new species of nectar-feeding bat of the genus *Hsunycteris* (Phyllostomidae: Lonchophyllinae) from northeastern Peru. *American Museum Novitates*, 3881, 1-26.
- Woodman, N. & Timm, R.M.** (2006). Characters and phylogenetic relationships of nectar-feeding bats, with descriptions of new *Lonchophylla* from western South America (Mammalia: Chiroptera: Phyllostomidae: Lonchophyllini). *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 119 (4), 437-476.

Artículo original

## Caracterización morfológica de los estadios embrionarios de la raya dulceacuícola *Potamotrygon magdalenae* (Elasmobranchii: Potamotrygonidae)

### Morphological characterization of the embryony stages of the freshwater stingray *Potamotrygon magdalenae* (Elasmobranchii: Potamotrygonidae)

✉ Sergio Antonio Lizcano-Gutiérrez<sup>1,2,\*</sup>, ✉ Martha Patricia Ramírez-Pinilla<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, La Paz, Baja California Sur, México

<sup>2</sup> Colección Herpetológica y Laboratorio de Biología Reproductiva de Vertebrados, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

## Resumen

*Potamotrygon magdalenae*, una raya perteneciente a la familia Potamotrygonidae distribuida en la cuenca del río Magdalena, es considerada de muy alta prioridad para la investigación en el Plan de Acción Nacional para la Conservación y Manejo de Tiburones, Rayas y Quimeras de Colombia. Los estudios de desarrollo embrionario en condricthios son escasos debido a la dificultad para obtener el material biológico y son pocas las tablas de desarrollo para las especies de rayas. En este estudio se hizo la caracterización morfológica macroscópica de una serie de estadios embrionarios de *P. magdalenae*. Se obtuvieron 30 individuos entre embriones, fetos y neonatos producto de disecciones y abortos de hembras grávidas capturadas mediante pesca incidental. En términos generales, el desarrollo embrionario de esta especie sigue los patrones conocidos para los demás condricthios, aunque con pequeñas diferencias en la tasa de absorción del saco vitelino y la ausencia de filamentos branquiales sobresalientes de los espiráculos, lo que puede relacionarse con su viviparidad y matrotrofia uterina.

**Palabras claves:** Faríngrula; Embriogénesis; Embriones; Neonatos; *Potamotrygon*.

## Abstract

*Potamotrygon magdalenae* is a stingray belonging to the family Potamotrygonidae distributed in the Magdalena River basin. This species is considered of high priority for research according to the National Plan of Action for the Conservation and Management of Sharks, Rays, and Chimaeras of Colombia. The studies of embryonic development in chondrichthyans are limited due to the difficulty in obtaining the biological material and there are few developmental staging tables for ray species. Here we do a macroscopic morphological characterization of a series of developmental stages of *P. magdalenae*. Thirty individuals were studied, including embryos, fetuses, and neonates resulting from dissections and abortions of pregnant females caught by incidental fishing. It was possible to identify nine stages of development that were described, photographed, drawn, and measured. The embryonic development of this species broadly follows the patterns known for other chondrichthyans with minor differences in the rate of yolk sac absorption and the absence of protruding gill filaments from the spiracles, which may be related to its viviparity and intrauterine matrotrophy.

**Keywords:** Pharyngula; Embryogenesis; Embryos; Neonates; *Potamotrygon*.

**Citación:** Lizcano-Gutiérrez SA, Ramírez-Pinilla MP. Caracterización morfológica de los estadios embrionarios de la raya dulceacuícola *Potamotrygon magdalenae* (Elasmobranchii: Potamotrygonidae). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):697-713, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1650>

**Editor:** Arturo Acero

**\*Correspondencia:**

Sergio Antonio Lizcano-Gutiérrez;  
sergiolizcano89@gmail.com

**Recibido:** 8 de marzo de 2022

**Aceptado:** 8 de julio de 2022

**Publicado en línea:** 12 de agosto de 2022



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

## Introducción

*Potamotrygon magdalenae* (Duméril) es una raya de agua dulce categorizada globalmente por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (**Charvet-Almeida & Pinto**, 2009) y nacionalmente por el Libro Rojo de Peces Dulceacuícolas (**Mojica et al.**, 2012) como casi amenazada, aunque recientemente dicha categorización fue actualizada por la UICN como de preocupación menor (**Lasso et al.**, 2016), y se la considera de muy alta prioridad para la investigación en el Plan de Acción Nacional para la Conservación y Manejo de Tiburones, Rayas y Quimeras de Colombia (PAN -Tiburones Colombia) (**Caldas et al.**, 2010). Habita en la cuenca de los ríos Magdalena y Atrato (**Araújo et al.**, 2004; **Lasso et al.**, 2011, 2016) y tiene preferencia por las aguas turbias, de fondos arenosos y fangosos y corrientes lentas (**Dahl**, 1971; **Mejía-Falla et al.**, 2016). La mayoría de sus presas son larvas del orden Diptera, de preferencia Chironomidae (**Villa-Navarro**, 1999; **Lasso et al.**, 2011; **Mejía-Falla et al.**, 2016).

Las poblaciones de *P. magdalenae* se ven amenazadas principalmente por la captura incidental durante las faenas de pesca artesanal y pesca dirigida a la comercialización ornamental (**Ramos-Socha & Grijalba-Benedeck**, 2011; **Mejía-Falla et al.**, 2016). Aunque es una especie abundante, su extracción con fines ornamentales es muy alta comparada con otras del mismo género, lo que se añade al deterioro de su hábitat debido al vertimiento de químicos, metales pesados, y aguas negras, entre otros (**Mejía-Falla et al.**, 2016). Algunas de las acciones propuestas para su conservación incluyen el fortalecimiento del sistema de registro y seguimiento de las capturas y la explotación de la raya para generar estadísticas fiables (**Caldas et al.**, 2010).

*Potamotrygon magdalenae* es una especie vivípara aplacentada, con desarrollo de trofonemas que generan leche uterina (histótrofo), la cual complementa la nutrición proporcionada al embrión por la yema (**Thorson et al.**, 1983). El tracto reproductivo de la hembra está formado por dos ovarios funcionales (**Teshima & Takeshita**, 1992; **Pedreiros-Sierra et al.**, 2016), con un mayor desarrollo del ovario izquierdo (**Pedreiros-Sierra et al.**, 2016); su fecundidad uterina va de tres a cinco embriones (**Ramos-Socha & Grijalba-Benedeck**, 2011), aunque se han llegado a registrar hasta diez (**Lasso et al.**, 2014). Las tallas de madurez sexual registradas en *P. magdalenae* fluctúan entre 160 y 202 mm de ancho de disco (AD) en los machos (**Ramos-Socha & Grijalba-Benedeck**, 2011), con una talla mediana de madurez de 144 mm de AD y de preñez de 170,8 mm de AD en hembras (**Pedreiros-Sierra et al.**, 2016).

No se han hecho estudios para determinar y caracterizar morfológicamente los estadios de desarrollo embrionario en esta especie; sin embargo, **Ramos-Socha** (2010) describieron algunos aspectos de la morfología de los embriones en cuatro estadios de desarrollo de la especie (**Lasso et al.**, 2014). **Barbarino & Lasso** (2005), por su parte, determinaron cinco estadios embrionarios en la raya dulceacuícola *Paratrygon aiereba*, perteneciente a la misma familia. Los cinco estadios se clasificaron según el desarrollo morfológico y el contenido de vitelo en el saco de la yema (alto, medio, bajo). Otros investigadores han descrito series parciales de desarrollo en distintas especies de condriictios: en quimeras de *Callorhinchus mili* (**Didier et al.**, 1998) y en tiburones de *Heterodontus portusjacksoni* (**Rodda & Seymour**, 2008) y de *Scyliorhinus canicula* (**Ballard et al.**, 1993), siendo esta última la más completa. En las especies batoideas, **Luer & Walsh** (2007) describieron el desarrollo embrionario completo de la raya ovípara *Rostroraja eglanteria*, en tanto que **Ebert & Cowley** (2009) describieron seis estadios de desarrollo en la fase final de la gestación en la raya vivípara marina *Dasyatis chrysonota*. Sin embargo, no existen otras tablas del desarrollo embrionario de batoideos vivíparos, posiblemente debido a las dificultades para obtener el material biológico.

Aquí se describe por primera vez la morfología externa de los embriones y fetos en una serie embrionaria de *P. magdalenae* para establecer una tabla de desarrollo comparable con la de otros batoideos y condriictios.

## Materiales y métodos

### *Recolección de individuos*

Se recolectaron hembras adultas y gestantes de *P. magdalenae* mediante pesca incidental con los métodos pasivo (trasmallo) y activo (atarraya) propuestos en el libro sobre las rayas dulceacuícolas de Suramérica de **Gama et al.** (2014). La captura se hizo en tres localidades de la cuenca del río Magdalena: la ciénaga de Paredes, entre Puerto Wilches y Sabana de Torres, en el departamento de Santander (7° 27' 19,7" N, 73° 44' 47,7" W); la ciénaga Doña María, en el departamento del Cesar (8° 04' 47,6" N, 73° 41' 41,4" W), y la ciénaga de Zapatosa (9° 14' 56,9" N, 73° 48' 14,7" W). Las hembras gestantes suelen abortar casi inmediatamente después de la captura, por lo que los embriones se recolectaron en estos casos en el momento del aborto. Los embriones y fetos se colocaron en baldes con agua y roxicaina al 1 % para causarles la muerte por sobredosis de anestésico. A algunas hembras que no abortaron y a sus embriones se les aplicó la eutanasia para posteriormente fijarlas y preservarlas. Después, se les hizo la disección del tracto reproductor, se revisó el estado reproductivo y se verificó la presencia de embriones o fetos en los úteros. Los individuos recolectados se fijaron en formol al 10 % y posteriormente se almacenaron en etanol mediante el paso progresivo por un gradiente de etanol (30, 50 y finalmente 70 %). Los ejemplares adultos se incorporaron a la Colección Ictiológica del Museo de Historia Natural de Universidad Industrial de Santander.

### *Descripción morfológica*

A cada hembra grávida capturada se le tomaron los datos morfométricos de ancho de disco (AD), longitud total (LT) y longitud de disco (LD) con una cinta métrica siguiendo los parámetros descritos por **Lasso et al.** (2014) y a los embriones recolectados utilizando un calibrador Vernier (precisión de 0,02 mm). Se relacionó la talla de las hembras capturadas que fueron disecadas y que no tuvieron abortos espontáneos con la fecundidad (AD con respecto al número de embriones uterinos) mediante una regresión lineal, siguiendo a **Walker** (2005).

Se establecieron y caracterizaron los estadios embrionarios de acuerdo con el estadio de desarrollo (segmentación, gastrulación, neurulación, crecimiento fetal) y con base en observaciones morfológicas macroscópicas detalladas a partir del AD, la LT y la LD, la distancia pre-cloaca, la de boca a cloaca, la longitud de la espina caudal, la de la cola, el diámetro del ojo, el del espiráculo y la longitud del cláspere, la ausencia o presencia de filamentos branquiales, la pigmentación, los dientes, el saco vitelino y otros caracteres macroscópicos importantes descritos en la literatura especializada. Se tomaron fotografías con una cámara Canon PowerShot SX50 HS y los datos fueron tabulados; posteriormente, se hicieron representaciones gráficas resaltando los caracteres morfológicos importantes para la categorización de los estadios. La descripción de dichos estadios de desarrollo se hizo a partir de la comparación con estudios previos en condrictios (**Ballard et al.**, 1993; **Didier et al.**, 1998; **Luer & Walsh**, 2007; **Maxwell et al.**, 2008; **Rodda & Seymour**, 2008; **Ebert & Cowley**, 2009).

## Resultados

### *Estadios de desarrollo*

Se obtuvieron 30 individuos en los que se determinaron nueve estadios de desarrollo desde la formación inicial de los arcos branquiales (faríngrula) hasta los individuos neonatos que habían perdido el saco vitelino y presentaban cicatriz umbilical. El rango de la LD de los embriones y fetos fluctuó entre 43 y 105 mm y el AD entre los 40 y los 100 mm. En la **tabla 1** se presentan los datos morfométricos registrados. El embrión más pequeño se obtuvo a finales de mayo, el feto más grande a mediados de enero, el neonato más pequeño (LT: 165 mm y AD: 75 mm) se capturó a mediados de octubre.

### *Estadio 1*

Se registraron dos embriones en estadio de faríngrula, con LT de 8 y 9 mm; el primero de ellos se obtuvo mediante la disección de una hembra de 300 mm de AD y el segundo fue

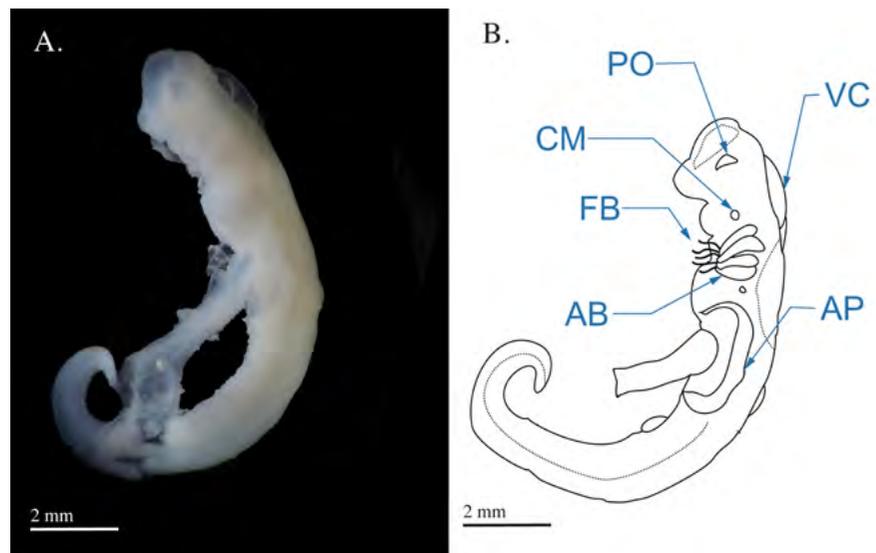
**Tabla 1.** Morfometría de los estadios de desarrollo ontogenético de *Potamotrygon magdalenae* (medidas en mm)

Estadio	N	LT	SD	LD	SD	AD	SD
1	1	8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2	1	22,98	N/A	N/A	N/A	5	N/A
3	3	112,33	2,51	46	3,60	42	1,73
4	4	135,5	4,12	50,5	1	45,25	1,5
5	5	149,8	1,09	58	0,70	53	0,70
6	6	157,33	19,96	63,5	8,66	58,66	8,40
7	3	184,66	4,50	77,33	1,15	72,33	4,04
8	2	200,5	N/A	84	N/A	79,5	N/A
9	3	236,66	43,68	98,33	11,54	91,66	14,43

LT: longitud total; LD: longitud de disco; AD: ancho de disco; SD: desviación estándar; N: número de muestras

producto del aborto de una hembra con un AD de 350 mm, las dos capturadas en mayo. El embrión obtenido mediante disección se alojaba en el útero izquierdo de la hembra, y era el único embrión presente en el tracto reproductor.

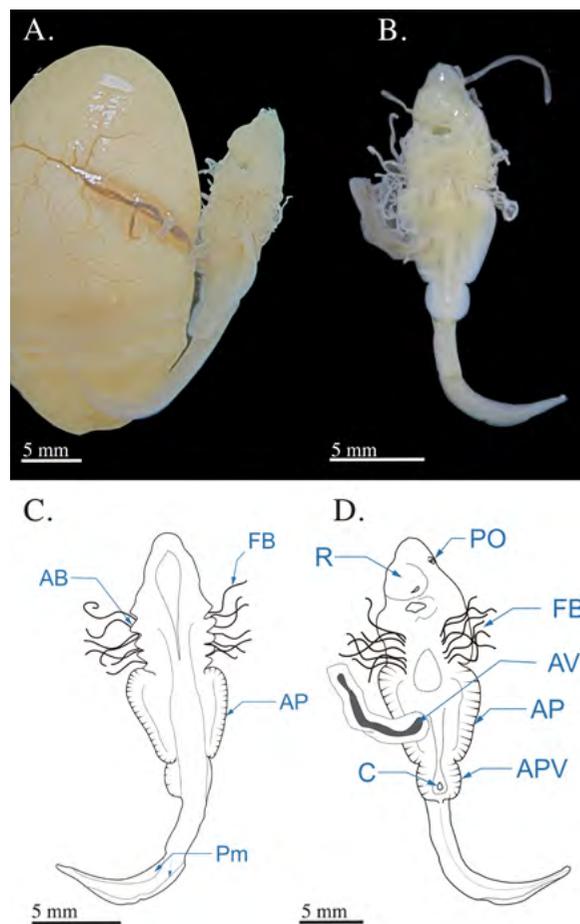
En los embriones se observó el desarrollo de los arcos branquiales desde donde emergen tempranamente los filamentos branquiales, así como el de las placas ópticas, ubicadas lateralmente y sin pigmentación. Bajo la placa óptica se observó la cavidad celómica mandibular y en el dorso anterior del embrión la cavidad translúcida asociada con la formación del cerebro (ventrículo cerebral). En la parte medial del cuerpo se observó la formación de los pliegues laterales que luego derivan en las aletas pectorales, en tanto que el tallo vitelino sobresalía ventralmente del embrión en medio de lo que después son las aletas pectorales, uniéndolo al embrión con el saco vitelino, el cual en este estadio representa casi tres veces el tamaño del embrión (**Figura 1**).



**Figura 1.** (A) Fotografía del embrión de *Potamotrygon magdalenae* en estadio 1 (farínula). Se retiró el saco de la yema para observar mejor el embrión. (B) Detalles morfológicos en el embrión en estado de farínula de *Potamotrygon magdalenae*. FB: filamentos branquiales; PO: placa óptica; CM: cavidad celómica mandibular; VC: ventrículo cerebral; AP: aleta pectoral; AB: arcos branquiales

### Estadio 2

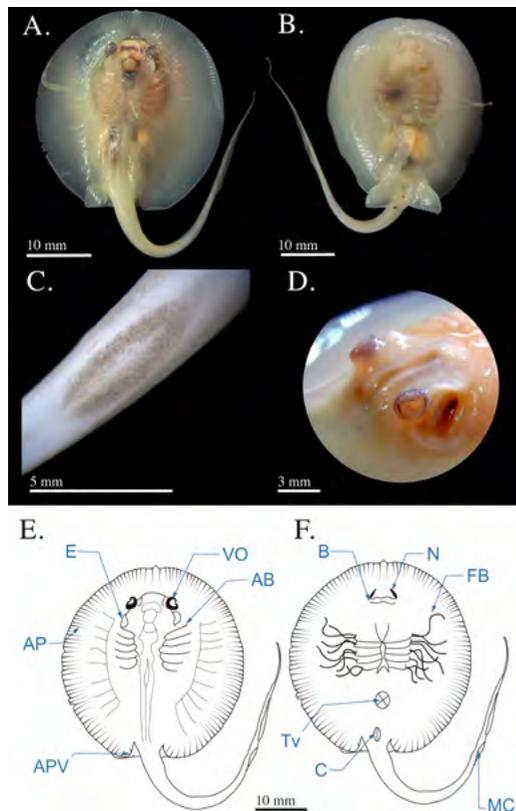
Se registró un embrión con LT de 22,98 mm en estado de organogénesis obtenido mediante la disección uterina de una hembra capturada en julio, a la cual le hacía falta la porción anterior del cuerpo, lo cual imposibilitó la toma de los datos morfométricos. La hembra tenía un único embrión en su útero derecho de una longitud pre-cloacal de 12,24 mm y una distancia de boca a cloaca de 8,21 mm (**Figura 2**). En este estadio los cinco arcos branquiales ya se encontraban completamente abiertos y exhibían una gran cantidad de filamentos branquiales de una longitud aproximada de 13 mm, es decir, un poco más de la mitad de la longitud total del cuerpo. La placa óptica comenzaba a tener pigmentación y aún se encontraba en posición lateral; eran visibles los orificios nasales ubicados en una protuberancia del rostro cercana a la apertura bucal. Las aletas pectorales se extendían lateralmente en la región media del embrión, haciendo contacto con las aperturas branquiales. En el tallo vitelino era visible la arteria vitelina, ramificada y formando una red de capilares en el saco vitelino. En este punto del desarrollo se observó claramente la formación de las aletas pélvicas, la apertura cloacal en medio de las aletas pélvicas y la formación de pliegues membranosos en la parte dorsal y ventral de la cola, la cual tenía una longitud de 10,6 mm. La línea lateral se observó en la parte dorsal del embrión y se visualizaban claramente los radios de las aletas pectorales y pélvicas.



**Figura 2.** Fotografías del embrión de *Potamotrygon magdalenae* en estadio 2 (organogénesis). (A) embrión en vista completa unido al saco vitelino altamente vascularizado; (B) vista ventral del embrión separado del saco vitelino. Esquemas de embriones de *Potamotrygon magdalenae* en el estadio 2 en (C) vista dorsal y (D) ventral. AB: arcos branquiales; PO: placa óptica; FB: filamentos braquiales; APV: aletas pélvicas; C: cloaca; R: rostrum; Pm: pliegues membranosos caudales; AV: arteria vitelina

**Estadio 3**

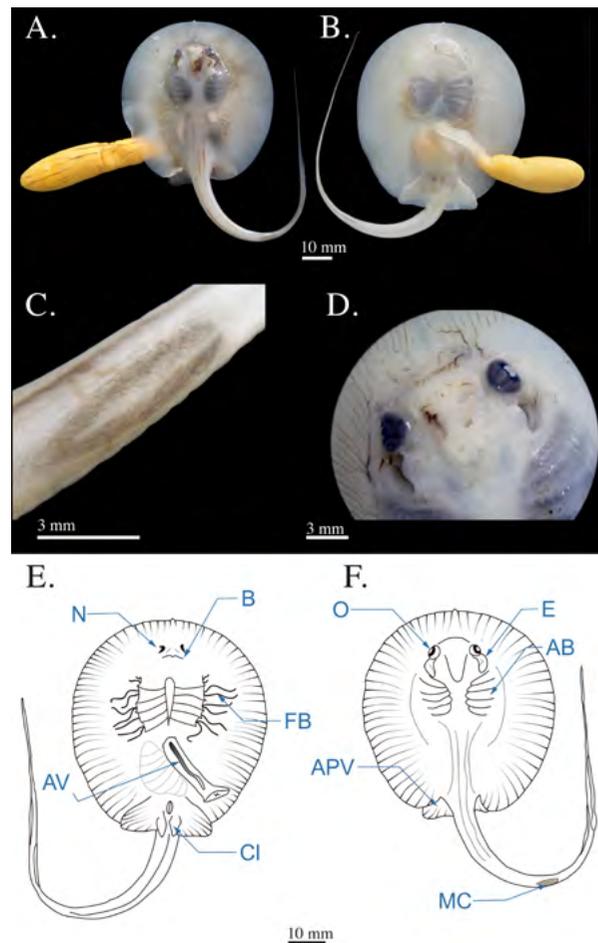
Se encontraron tres embriones en organogénesis con un AD de 42 mm ( $SD \pm 1,73$ ), que habían sido abortados en julio; no se pudo registrar el AD de la madre. Como es de rigor en este estadio, las cinco aperturas branquiales continuaban presentando filamentos branquiales con una longitud aproximada de 14 mm. Se evidenció un mayor desarrollo de las placas ópticas, las cuales después pasan a formar las vesículas ópticas, con un diámetro medio de 3 mm; estas presentaban pigmentación negra en los bordes. Como sucede en este estadio, se observó la migración de las vesículas ópticas, las cuales pasan de su posición lateral hacia la región dorsal del cuerpo. En la parte inmediatamente posterior de las vesículas ópticas se observó la formación de los espiráculos, con un diámetro de 4,4 mm, y el desarrollo temprano de la válvula espiracular como una membrana translúcida y delgada al interior de estos. Los orificios nasales ya habían migrado hacia la boca quedando estrechamente unidos con la apertura bucal y la distancia media de boca a cloaca había aumentado a 29,83 mm  $\pm 1,69$ . Las aletas pectorales se extendían y fusionaban con la región branquial y con el rostrum, completamente extendido en esta etapa, formando el disco corporal. La distancia pre-cloaca había aumentado a 37,8 mm (distancia media  $\pm 1,68$ ). El dorso del embrión continuaba sin pigmentación; las aletas pélvicas estaban completamente desarrolladas, y en los machos se observó la modificación de la aleta pélvica que determina la formación de los cláspes. Se evidenció por primera vez la presencia de una mancha caudal de color pardo en la región media de la cola, de  $4,83 \pm 0,06$  mm, zona en la que se forma la espina caudal. La longitud media de la cola era de 69,53 mm  $\pm 3,62$  (**Figura 3**).



**Figura 3.** Fotografías estadio 3 (organogénesis) de desarrollo de *Potamotrygon magdalenae*; **(A)** vista dorsal del embrión; **(B)** vista ventral; **(C)** detalle de la mancha caudal en la región media de la cola; **(D)** detalle de la vesícula óptica. Esquema de embrión de *Potamotrygon magdalenae* en estadio 3. **(E)** vista dorsal; **(F)** vista ventral. E: espiráculo; VO: vesícula óptica; FB: filamentos branquiales; AP: aleta pectoral; AB: Arcos branquiales; APV: aleta pélvica; MC: mancha caudal; C: cloaca; Tv: tallo vitelino; N: narinas; B: boca

#### Estadio 4

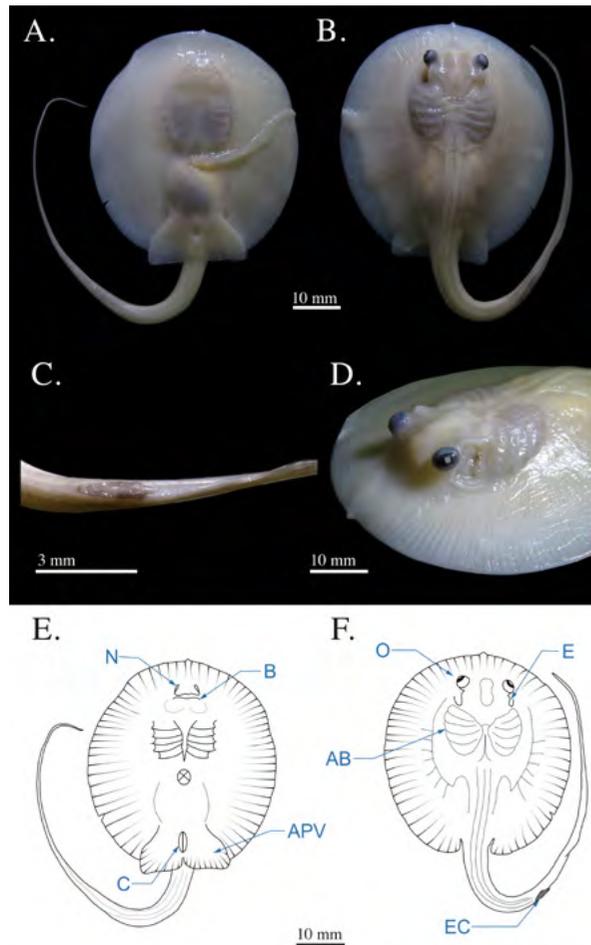
Se registraron cuatro embriones en organogénesis tardía, con un AD medio de 45 mm ( $SD \pm 1,5$ ), que habían sido abortados por una hembra con un AD de 340 mm capturada en enero. Se observó en ellos el inicio de la contracción de los filamentos branquiales propio de este estadio, así como la reducción de la longitud y la cantidad de los filamentos de la primera apertura branquial, que disminuyen casi la mitad de su longitud con respecto a los filamentos de las demás aperturas branquiales, los cuales presentaban una longitud aproximada de 16 mm. Se hizo muy evidente el desarrollo del ojo, el cual deja de ser una vesícula óptica para formar un globo ocular con mayor pigmentación y presencia del cristalino, y cuyo diámetro había aumentado hasta 3,27 mm ( $\pm 0,05$ ). Los espiráculos ya habían aumentado su diámetro a 4,85 mm ( $\pm 0,1$ ); se observó un engrosamiento de la válvula espiracular, la cual cerraba casi la totalidad del espiráculo. La distancia boca-cloaca había continuado aumentando y alcanzaba ya los 33,05 mm  $\pm 0,66$ . La longitud pre-cloaca era de 42,82 mm  $\pm 1,09$ . La mancha caudal aumentó su longitud y se evidenció una leve queratinización en su zona media indicativa de la formación de la espina caudal; la longitud de la cola había alcanzado los 89,82 mm ( $\pm 2,8$ ). El saco vitelino había reducido la cantidad de vitelo a 1/6 del tamaño corporal, aproximadamente (**Figura 4**).



**Figura 4.** Fotografías del estadio 4 (organogénesis tardía) de *Potamotrygon magdalenae*. (A) vista dorsal; (B) vista ventral; (C) detalle de leve queratinización de lo que será la espina caudal; (D) detalle del glóbulo ocular. Esquema de embrión de *Potamotrygon magdalenae* en estadio 4, (E) vista ventral, (F) vista dorsal. O: ojos; E: espiráculo; MC: mancha caudal; FB: filamentos branquiales; APV: aletas pélvicas; AB: arcos branquiales; N: narinas; B: boca; CL: cláspes; AV: arteria vitelina

**Estadio 5**

Se encontraron cinco embriones en el estadio final de organogénesis, con un AD medio de 53 mm  $\pm$  0,70, los cuales eran producto del aborto de una hembra de 280 mm de AD capturada en enero. Esta etapa se caracteriza principalmente por el retraimiento total de los filamentos branquiales en todas las aperturas branquiales, con lo que culmina la formación de las branquias. Se observó la formación completa de la válvula espiracular, lo que cierra la totalidad del espiráculo para permitir el bombeo de agua; el diámetro de los espiráculos era de 6,08 mm ( $\pm$  0,08). Los ojos continuaban aumentando su diámetro y alcanzaron los 3,7 mm ( $\pm$  0,15). En los fetos se observó el desarrollo de la espina caudal, la cual podía visualizarse fácilmente y presentaba una base ancha y un ápice agudo con una longitud media de 8,18 mm  $\pm$  0,30; la longitud de la cola llegaba a los 95,22 mm  $\pm$  2,05. Presentaban una distancia pre-cloacal de 49,32 mm  $\pm$  0,75 y de boca a cloaca de 37,58 mm  $\pm$  0,973. Se observó una ligera reducción del contenido vitelino en el saco de vitelo comparado con el estadio anterior, pero este todavía constituía aproximadamente un 6 % del tamaño del embrión. Los fetos empezaban a mostrar leves signos de pigmentación en algunas partes del dorso, junto a los radios del disco, y dos franjas a lo largo de la cola. Se observó una mayor elongación de los cláster en los individuos machos (5 mm) (**Figura 5**).

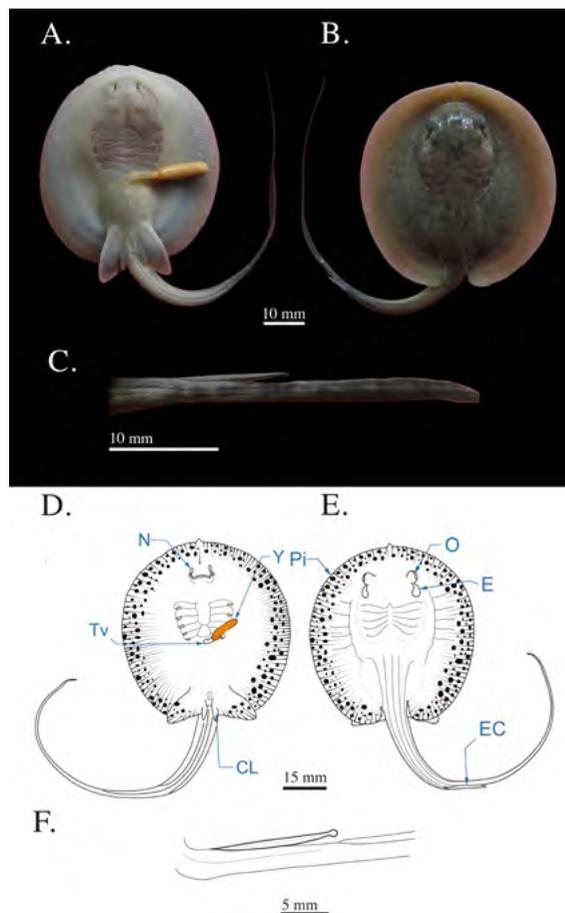


**Figura 5.** Fotografías del estadio 5 de desarrollo en *Potamotrygon magdalenae*. (A) vista ventral; (B) vista dorsal; (C) detalle del desarrollo de la espina caudal; (D) detalle del globo ocular y la válvula espiracular. Esquemas de un embrión de *Potamotrygon magdalenae* en estadio 5, vista ventral (E). APV: aleta pélvica; C: cloaca; B: boca; N: narinas. Vista dorsal (F). O: ojos; EC: espina caudal; AB: arco branquial; E: espiráculo

### Estadio 6

Se hallaron siete fetos con un AD medio de  $58,66 \text{ mm} \pm 8,40$ , provenientes de la disección de tres hembras capturadas en mayo, con un AD de 255 a 265 mm, y del aborto de una hembra con un AD de 168 mm capturada en marzo. La primera hembra contenía tres fetos (uno en el útero derecho, dos en el útero izquierdo); la segunda tenía dos fetos, uno en cada útero, y la hembra más pequeña mantenía un solo feto en su útero izquierdo.

Este estadio se caracteriza por la fuerte pigmentación en todo el cuerpo, un patrón moteado en el dorso y la cola de manchas amarillo oliva con fondo marrón oscuro y coloración ventral blanca. Eran fácilmente visibles las placas dentarias superior e inferior; el diámetro del ojo había alcanzado los  $4,14 \text{ mm} \pm 0,16$  y el diámetro de los espiráculos, los  $6,97 \text{ mm} \pm 0,48$ . La espina caudal tenía una longitud media de  $11,87 \text{ mm} (\pm 3,03)$ , presentaba bordes lisos y una pequeña esfera en la punta. En los individuos machos los cláspes llegaban a alcanzar una longitud media de  $7,1 \text{ mm} \pm 0,36$  y su tamaño corporal había aumentado: la distancia pre-cloacal llegaba a los  $52,67 \text{ mm} (\pm 5,89)$  y la de boca a cloaca, los  $38,47 \text{ mm} \pm 2,16$ ; el largo de la cola era de  $106,01 \text{ mm} (\pm 16,51)$ . En esta etapa los fetos ya habían absorbido el vitelo del saco vitelino, reduciendo su tamaño hasta 4 % del tamaño corporal aproximadamente; se pudo observar el vitelo absorbido a través de la cavidad abdominal, y su presencia en el tracto digestivo (**Figura 6**).



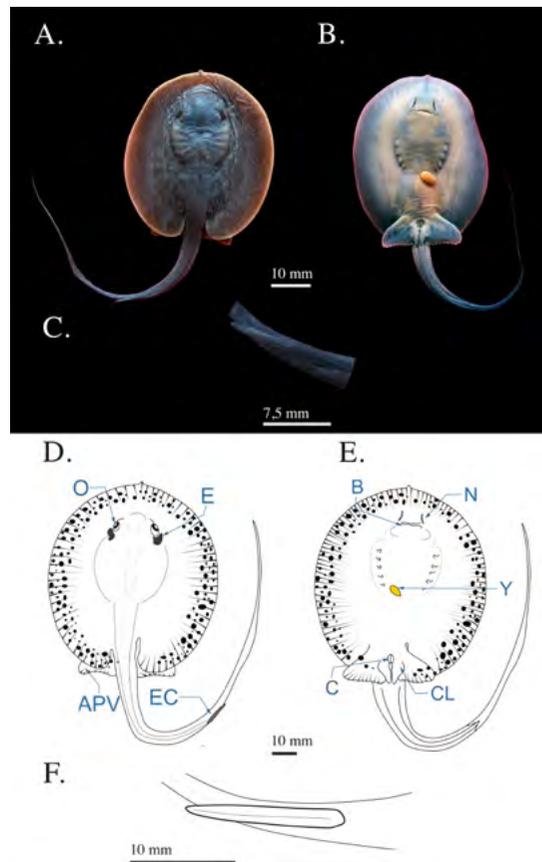
**Figura 6.** Fotografías del estadio 6 de *Potamotrygon magdalenae*. (A) Embrión vista ventral; (B) vista dorsal; (C) detalle de la espina caudal (punta redondeada). Esquema del feto en estadio 6 de *Potamotrygon magdalenae*. Vista dorsal (D); vista ventral (E); esquema del detalle de la espina caudal (F). Pi: pigmentación corporal; Y: yema; CL: cláspes; Tv: tallo vitelino; N: narinas; O: ojos; E: espiráculos

### Estadio 7

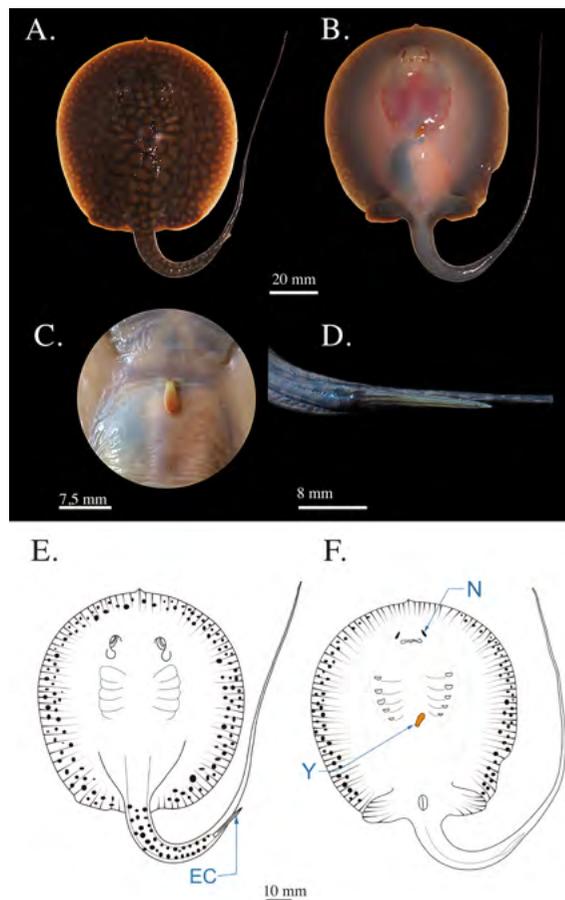
Se registraron tres fetos en estadio de pre-alumbramiento, con un AD medio de 72,33 mm  $\pm$  4,04, los cuales habían sido abortados por una hembra con un AD de 235 mm capturada en enero. En este estadio pudo constatar la pigmentación corporal ligeramente más intensa, con un tono pardo más oscuro (**Figura 7a y b**). El globo ocular tenía un diámetro de 4,3 mm  $\pm$  0,1 y los espiráculos medían 7,53  $\pm$  0,5 mm; la distancia pre-cloaca había aumentado hasta los 61,2 mm ( $\pm$  4,59) y la de boca a cloaca, 44,93 mm ( $\pm$  3,31). La longitud de la cola ya había alcanzado los 117,16 mm ( $\pm$  0,55) y la espina caudal había perdido la forma esférica en su ápice, pasando a tener un ápice agudo, sin embargo, la espina caudal mantenía sus bordes lisos (**Figura 7c**); la longitud de la espina caudal era de 15 mm ( $\pm$  0,79). En individuos machos, los cláspers ya tenían 8,4 mm de longitud. El contenido de vitelo del saco vitelino se había reducido notablemente, hasta menos del 4 % del tamaño corporal (**Figura 7**).

### Estadio 8

Se encontraron dos hembras neonatas muy similares en tamaño y forma capturadas con atarraya en octubre, con un AD medio de 79,5 mm. Este estadio corresponde a individuos neonatos recientes en los cuales se observa el rezago del saco vitelino, el cual se encuentra muy reducido, con una longitud de aproximadamente 4,5 mm incluido el tallo vitelino (**Figura 8**). La pigmentación corporal se mantiene sin presentar grandes cambios con



**Figura 7.** Fotografías de feto en estadio 7 (pre- alumbramiento) de *Potamotrygon magdalenae*. (A) vista dorsal; (B) vista ventral; (C) detalle de la espina caudal. Esquema general de feto pre-alumbramiento de *Potamotrygon magdalenae*. (D) Vista dorsal; (E) vista ventral; (F) esquema de detalle de espina caudal. Y: yema; EC: espina caudal; CL: cláspers; C: cloaca; E: espiráculos; O: ojos; APV: aletas pélvicas; B: boca; N: narinas

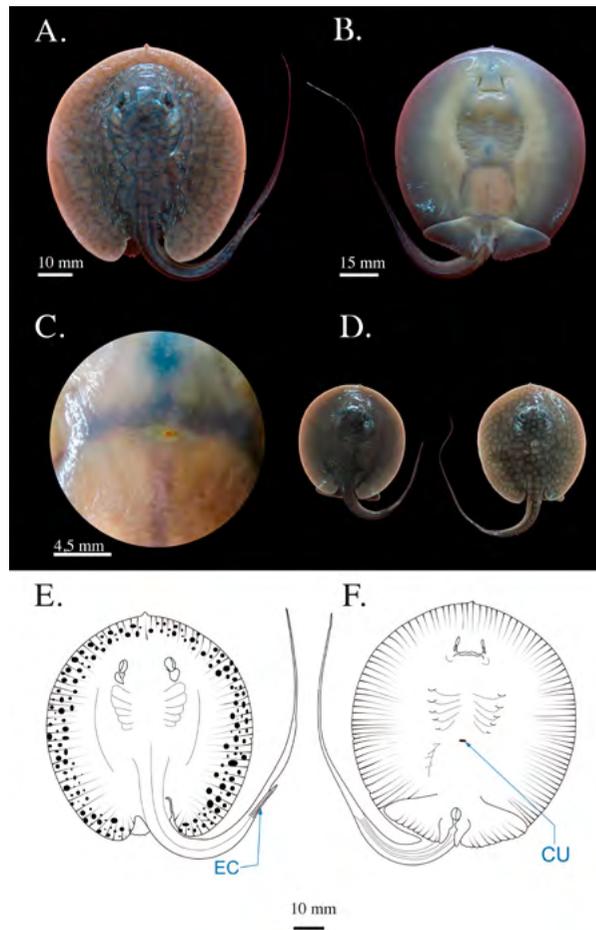


**Figura 8.** Fotografías de neonato en estadio 8 de *Potamotrygon magdalenae*. (A) Vista dorsal; (B) vista ventral (C) detalle de rezago del saco vitelino; (D) detalle de espina caudal. Esquema de un neonato de *Potamotrygon magdalenae* en estadio 8, vista dorsal (E), vista ventral (F). EC: espina caudal; N: narinas; Y: yema

respecto al estadio 7. Las neonatas tenían un diámetro medio ocular de 4,6 mm; sus espiráculos habían alcanzado un diámetro de 7,3 mm; la espina caudal había alcanzado una rigidez total y presentaba bordes ligeramente aserrados, muy similares a los de los individuos adultos; la longitud media de la espina caudal alcanzaba los 14,5 mm. La longitud media de la cola fue de 114 mm, la distancia media pre-cloaca de 66,5 mm y la distancia de boca a cloaca alcanzó una media de 57,93 mm.

### Estadio 9

Se registraron tres individuos juveniles en los que se había absorbido la totalidad del saco vitelino dejando una pequeña ranura en la región medial del disco, la cicatriz umbilical; el AD medio fue de 91,6 mm ( $\pm 14,43$ ) y la distancia pre-cloaca de 78,9 mm ( $\pm 11,73$ ). El diámetro ocular era de 4,83 mm ( $\pm 0,15$ ) y el del espiráculo de 7,43 mm ( $\pm 0,57$ ). La espina caudal tenía una longitud de 18,63 mm ( $\pm 1,85$ ) y presentaba bordes aserrados iguales a los individuos adultos. Se observaron dos morfotipos diferenciados por el patrón de coloración y la longitud de la cola: uno moteado de manchas amarillo-oliva, irregular, con diámetro superior al del diámetro ocular y de fondo marrón, con una longitud de la cola de 1,8 veces el largo del disco (LD): el otro morfotipo se caracterizaba por ser moteado con manchas de color pardo-oliva, un diámetro inferior o igual al diámetro ocular de fondo marrón oscuro y una longitud de cola de aproximadamente 1,2 veces del LD (Figura 9). La distancia media pre-cloaca y de boca a cloaca fue de 78,9 ( $\pm 11,73$ ) y 59,93 mm ( $\pm 8,35$ ), respectivamente.



**Figura 9.** Fotografías del estadio 9 (juveniles) de *Potamotrygon magdalena*. (A) vista dorsal; (B) vista ventral; (C) detalle de la cicatriz umbilical; (D) fotografía de los dos patrones de coloración encontrados. Esquema de individuo juvenil de *Potamotrygon magdalena* en vista dorsal (E), vista ventral (F). CU: cicatriz umbilical, EC: espina caudal

### Fecundidad

Se capturaron nueve hembras grávidas; la más pequeña se encontró en abril (168 mm de AD y 410 mm de LT) y la más grande en mayo (350 mm de AD y 690 mm de LT); la fecundidad máxima fue de 5 embriones y la fecundidad media de 2,34 ( $\pm 1,5$ ). El tamaño de las hembras no se relacionó de manera significativa con el número de embriones uterinos ( $r^2=0,06$ ,  $p=0,51$ ).

### Discusión

En este estudio se describe por primera vez el desarrollo embrionario de una raya vivípara aplacentaria perteneciente a la familia Potamotrygonidae. El número de embriones estudiados fue superior a la cantidad de los empleados en un estudio de desarrollo embrionario de batoideos vivíparos en *Rhinobatos hynnicephalus* (Zheng & Qui, 1993), el cual contó solo con cinco embriones, y similar al número usado en *D. chrysonata* (27 embriones) (Ebert & Cowley, 2009), lo que evidencia las dificultades para la obtención de embriones de batoideos vivíparos.

Los cuatro estadios de desarrollo de *P. magdalena* descritos por Ramos-Socha (2010) y Lasso *et al.* (2014) serían equivalentes a varios de los estadios descritos aquí. Así, el estadio 1 descrito por Ramos-Socha, en el que el embrión tenía un AD de 30 mm y un

cuerpo traslúcido con gran contenido de vitelo y sin desarrollo de dientes ni espina caudal, podría corresponder al estadio 3 aquí descrito. Asimismo, el estadio 2 descrito por Ramos-Socha incluyó caracteres como el cuerpo pigmentado de color café, la presencia del saco vitelino e indicios de la espina caudal, lo que correspondería al estadio 5 en nuestro estudio. El estadio 3 descrito por Ramos-Socha se caracteriza por un cuerpo con manchas circulares notables en la región dorsal, presencia de saco vitelino y una espina caudal más desarrollada, lo que se asemejaría al estadio 6 descrito aquí; por último, el estadio 4 descrito por Ramos-Socha, caracterizado por cuerpo y cola rígidos, color oscuro y manchas diferenciadas, dientes, espina caudal y ausencia de saco vitelino, correspondería al estadio 7 en nuestro estudio, es decir, fetos listos para el nacimiento. Sin embargo, el trabajo de **Ramos-Socha (2010)** no tenía como objetivo la descripción de la tabla de desarrollo embrionario y, por lo tanto, la precisión relativa de la descripción de los caracteres y la morfometría no permite una mejor comparación y equivalencia entre los estadios de los dos estudios.

En general, el desarrollo embrionario temprano de los condriictios es muy similar (**Brant, 2006**). Sin embargo, varios aspectos de su plan morfológico corporal (aplanamiento dorso-ventral en las rayas) difieren en el desarrollo de las rayas y los tiburones. Una de las diferencias se refiere a la migración de las vesículas ópticas desde la posición lateral hacia la región dorsal, que en *P. magdalanae* ocurre entre el estadio 2 y el 3, al igual que el cambio de la posición de los arcos branquiales de su posición lateral hacia la región ventral del embrión. Estas son características generales del desarrollo embrionario en todos los batoideos, así como la reubicación mandibular, la cual está asociada con la depresión corporal y la fusión de las aletas pectorales con el cuerpo propias de la morfología particular de las rayas (**Maxwell et al., 2008**) y constituyen la principal diferencia en el desarrollo de batoideos y selacios (**McEachran & Carvalho, 2002**).

En cuanto al desarrollo de las aletas pélvicas en *P. magdalanae*, estas se hacen visibles por primera vez en el estadio 2 y se mantienen acordes con el desarrollo de otros batoideos, como *Leucoraja ocellata* (**Maxwell et al., 2008**), especie en la que éstas se forman después del inicio del desarrollo de las aletas pectorales y se hacen completamente visibles en la organogénesis temprana. De la misma manera ocurre en los tiburones, no así en los holocéfalos, en los que sucede un poco después de la aparición de las aletas pectorales (**Didier et al., 1998**). También se encuentran diferencias en el desarrollo de las membranas caudales de *P. magdalanae* comparado con el de los batoideos ovíparos; en la raya ovípara *L. ocellata* se presenta un desarrollo temprano de esta estructura con un tamaño relativamente mayor que el de *P. magdalanae*. Esto no es motivo de sorpresa, ya que en *L. ocellata* el embrión usa la membrana caudal como mecanismo primario para contribuir con la recirculación de agua al interior del huevo y el intercambio gaseoso (**Thomason et al., 1996; Maxwell et al., 2008**); en situaciones de anoxia estos movimientos caudales aumentan, lo que permite que al interior del huevo las condiciones de oxígeno mejoren considerablemente, como se ha visto en *Leucoraja erinacea* (**Di Santo et al., 2016**).

Por otra parte, en *P. magdalanae* los filamentos branquiales sobresalen de todas las aperturas branquiales; no obstante, no se observó la presencia de filamentos sobresalientes de los espiráculos, lo cual concuerda con lo observado en *Rostroraja eglanteria* (**Luer & Walsh, 2007**) y *Sympterygia acuta* (**Brant, 2006**); sin embargo, en el tiburón *Heterodontus portusjacksoni* (**Rodda & Seymour, 2008**) sí se observan filamentos branquiales sobresalientes de los espiráculos. En cuanto al rostrum, en *P. magdalanae* se observa su extensión en el estadio 3, lo que ocurre de manera simultánea con la fusión de las aletas pectorales y la formación del disco corporal; estos resultados son similares al desarrollo de los demás batoideos vivíparos y ovíparos, como el caso de *R. eglanteria* (**Luer & Walsh, 2007**) y *D. chrysonota* (**Brant, 2006**), pero difiere del desarrollo del tiburón *S. canicula* (**Ballard, 1993**) en el que la extensión del rostrum ocurre en etapas más tardías debido a las claras diferencias del plan corporal entre rayas y tiburones.

Como en otras especies de rayas (*L. ocellata*) (**Maxwell et al., 2008**) y *R. eglanteria* (**Luer & Walsh, 2007**), la pigmentación corporal inicia con pequeños puntos aislados y, simultáneamente, los filamentos branquiales llegan a su máxima longitud y la pigmentación

se completa en el dorso del feto después de la retracción total de los filamentos branquiales. El desarrollo de la espina caudal inicia en el estadio 3, apareciendo como una mancha en la sección media de la cola, la cual posteriormente aumenta su grado de queratinización y longitud; en el estadio 6 aparece una punta esférica, denominada bulbo terminal en Myliobatiformes (Wyffels, 2009), lo que sugiere que esta modificación evita las perforaciones del útero mientras el feto culmina su formación. En el estadio 7 (pre-parto) la punta de la espina adquiere un ángulo agudo, lo que se asocia con la adquisición de un mecanismo de defensa desde el nacimiento.

Existen diferencias en la absorción del vitelo del saco de la yema, pues ocurre de manera más acelerada en los estadios posteriores a la organogénesis en *P. magdalenae* que en los condriictios ovíparos, los cuales conservan un mayor volumen de vitelo externo. Esta diferencia se explica por la viviparidad matrotrofica de esta especie, evidenciada por la presencia de trofonemata en el útero de las hembras grávidas, y después de la gestación (Pedreros-Sierra *et al.*, 2016). Este modo reproductivo es característico de los potamotrygónidos (Lasso *et al.*, 2010), en los que la producción de un histótrofo a nivel uterino complementa la nutrición embrionaria, por lo que una buena parte del saco vitelino es absorbido y almacenado tempranamente en el hígado (McMillan, 2007). En la familia Myliobatidae, como en *Myliobatis goodei* (Colonello *et al.*, 2013), los trofonemata ingresan por la boca liberando histótrofo para completar la nutrición embrionaria, como se ha registrado en otros estudios (Babel, 1967; Smith & Merriner, 1986), al igual que a través de los espiráculos (White *et al.*, 2001). En la especie estudiada no se logró, sin embargo, determinar el sitio de ingreso de los trofonemata en el embrión debido a la facilidad con la cual las hembras de *P. magdalenae* desprenden sus embriones y abortan, lo que imposibilitó una observación detallada de la disposición y relación de los trofonemata con los embriones en desarrollo.

En *P. magdalenae* se ha registrado una talla de nacimiento entre 87 y 100 mm de AD (Tashima & Takeshita, 1992; Ramos-Socha & Grijalba-Benedeck, 2011). Sin embargo, en nuestro estudio se registraron individuos neonatos de menor talla, con 75 mm en el más pequeño y de 77 mm AD en el más grande.

*Potamotrygon magdalenae* presentó una fecundidad uterina en este estudio entre 1 y 5 embriones, lo cual concuerda con lo registrado por Ramos-Socha & Grijalba-Benedeck (2011); aun así, otros estudios han encontrado fecundidades más altas, de hasta 10 embriones intrauterinos (Lasso *et al.*, 2014; Pedreros-Sierra *et al.*, 2016). La baja fecundidad en esta especie es similar a las características generales de las rayas y de los demás condriictios, en especial los vivíparos matrotrofos, lo que los hace más susceptibles a los efectos de la sobrepesca y dificulta los esfuerzos de conservación (Bonfil, 1994).

No se encontró una relación significativa entre la talla de las hembras grávidas (AD) y la cantidad de embriones intrauterinos. Sin embargo, el número de hembras obtenidas fue pequeño, así como el rango de tamaños de las hembras madres, por lo que no se obtuvo un espectro de tamaño corporal poblacional amplio, como sí lo obtuvieron Pedreros-Sierra *et al.* (2016) en una población en una de las localidades en las que trabajamos. Para esta población de *P. magdalenae* se encontró una relación positiva de la talla de las hembras con la fecundidad uterina; asimismo, se han encontrado correlaciones positivas para otros batoideos, como en las rayas guitarra *Pseudobatos leucorhynchus* (Payán *et al.*, 2011) y *R. hynnicephalus* (Kume *et al.*, 2009), tendencia que es común en el grupo.

Dado que los embriones y fetos de *P. magdalenae* en los diferentes estadios de desarrollo se obtuvieron en distintos meses del año, sin que se aprecie claramente una secuencia de desarrollo a través de los meses, se puede sugerir que la actividad reproductiva en esta especie es continua. Esta continuidad reproductiva ya se había señalado previamente en las hembras de una de nuestras poblaciones en el estudio de Pedreros-Sierra *et al.* (2016), así como para machos (Pedreros-Sierra & Ramírez-Pinilla, 2015).

La viviparidad aplacentaria, la no estacionalidad en la reproducción y el desarrollo embrionario característico de esta especie imposibilitaron la comparación con tablas temporales para registrar el momento de cada evento o aparición de una característica, dada la dificultad para conocer el tiempo del inicio y el desarrollo de la gestación en las hembras.

Este limitante se ha encontrado en la mayoría de los estudios de desarrollo embrionario en condrictios vivíparos. Aun con esta limitación, los estadios embrionarios permiten establecer estadios de desarrollo equivalentes con otros batoideos y condrictios en general, y demostrar la secuencia de cambios en la morfología externa durante el desarrollo embrionario en *P. magdalenae*. Cabe resaltar que los fetos avanzados y neonatos se utilizaron aquí para estudiar el desarrollo de la glándula del cláspere (Anaya-López & Ramírez-Pinilla, 2017), por lo que a partir de estas series de desarrollo se puede obtener material importante para otros estudios de la biología de esta especie endémica.

## Conclusiones

Se describieron nueve estadios de desarrollo embrionario de *Potamotrygon magdalenae* a partir de las características macroscópicas desde la etapa de faríngrula hasta el de neonato; se presentaron, además, los cambios morfológicos entre neonatos e individuos juveniles. El desarrollo de *P. magdalenae* mantiene la secuencia general de desarrollo de los batoideos y condrictios, con algunas diferencias en la tasa y el momento de absorción del vitelo y la ausencia de filamentos branquiales sobresalientes de los espiráculos, características estas relacionadas con su viviparidad matrotrofica.

## Agradecimientos

Para algunos de los ejemplares recolectados la licencia de pesca de investigación se obtuvo en el Instituto Colombiano de Desarrollo Rural (INCODER), para los más recientes se contó con el permiso de recolección de especímenes silvestres de diversidad biológica para la investigación científica no comercial (Resolución 47 del 22 de enero de 2015 de la Autoridad Nacional Ambiental) otorgado a la Universidad Industrial de Santander. Agradecemos al Laboratorio de Biología Reproductiva de Vertebrados de la Universidad Industrial de Santander donde se realizó este estudio, a los biólogos E. Cárcamo, J. Gómez y M. Calsada por su colaboración en la recolección de especímenes, a S. Plata por su colaboración en la edición de las figuras, y a toda la comunidad de pescadores que fueron partícipes de este proyecto.

## Contribución de los autores

La escritura y redacción del documento se hizo de manera conjunta, en tanto que las fotografías y los esquemas fueron elaborados por S.A. Lizcano-Gutiérrez.

## Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no existe conflicto de intereses.

## Referencias

- Anaya-López, P., Ramírez-Pinilla, M. P. (2017). Clasper gland morphology and development in *Potamotrygon magdalenae* (Elasmobranchii: Potamotrygonidae). *Journal of Morphology* 278(3), 369-379. <https://doi.org/10.1002/jmor.20647>
- Araújo, M. L. G., Charvet-Almeida, P., Pinto de Almeida, M., Pereira, H. (2004). Freshwater stingrays (Potamotrygonidae): status, conservation, and management challenges. Information document presented to CITES Animals Committee, AC 20, Inf. 8: 1-6.
- Babel, J. S. (1967). Reproduction, life history, and ecology of the round stingray *Urolophus halleri* Cooper. *California Fish and Game* 137, 1-104.
- Ballard, W. W., Mellinger, J., Lechenault, H. (1993). A series of normal stages for development of *Scyliorhinus canicula*, the lesser spotted dogfish (Chondrichthyes: Scyliorhinidae). *Journal of Experimental Zoology*, 267(3), 318-336.
- Barbarino, A., Lasso, C. (2005). Pesquería y aspectos biológicos de la raya manta *Paratrygon aiereba* (Müller y Henle, 1841) (Myliobatiformes, Potamotrygonidae), en el río Apure (Venezuela). *Memorias de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales*, 163, 93-108.
- Bonfil, R. (1994). Overview of world elasmobranch fisheries. FAO Fisheries Technical Paper No. 341. 119 p.

- Brant, F. C.** (2006). Morfología e biometría do desenvolvimento embrionário da raia *Sympterygia acuta* Garman, 1877 (Elasmobranchii; Rajidae) (Doctoral dissertation, Fundação Universidade Federal do Rio Grande), <http://repositorio.furg.br/handle/1/4194>.
- Caldas, J. P., Castro-González, E., Puentes, V., Rueda, M., Lasso, C., Duarte, L. O., Grijalba-Bendeck, M., Gómez, F., Navia, A. F., Mejía-Falla, P. A., Bessudo, S., Díaz-Granados, M. C., Zapata-Padilla, L. A.** (2010). Plan de Acción Nacional para la Conservación y Manejo de Tiburones, Rayas y Quimeras de Colombia (PAN-Tiburones Colombia). 70 p.
- Charvet-Almeida, P., Pinto de Almeida, M.** (2009). *Potamotrygon magdalenae*. The IUCN Red List of Threatened Species 2009: e.T161385A5412045. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2009-2.RLTS.T161385A5412045.en>
- Colonello, J. H., Christiansen, H. E., Cousseau, M. B., Macchi, G. J.** (2013). Uterine dynamics of the Southern eagle ray *Myliobatis goodei* (Chondrichthyes: Myliobatidae) from the Southwest Atlantic Ocean. *Italian Journal of Zoology*, 80, 187-194. <https://doi.org/10.1080/11250003.2012.742146>
- Dahl, G.** (1971). Los peces del norte de Colombia. Bogotá: Instituto de Desarrollo de los Recursos Naturales Renovables. i-xvii, 1-391 p.
- Di Santo, V., Tran, A. H., Svendsen, J. C.** (2016). Progressive hypoxia decouples activity and aerobic performance of skate embryos. *Conservation Physiology*, 4(1), cov067.
- Didier, D. A., LeClair, E. E., Vanbuskirk, D. R.** (1998). Embryonic staging and external features of development of the chimaeroid fish, *Callorhynchus mili* (Holocephali, Callorhynchidae). *Journal of Morphology*, 236(1), 25-47.
- Ebert, D. A., Cowley, P. D.** (2009). Reproduction and embryonic development of the blue stingray, *Dasyatis chrysonota*, in Southern African waters. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 89(04), 809-815.
- Gama, C. S., Goés de Araújo, M. L., Lasso, C. A., Morales-Betancourt, M. A., Sánchez-Duarte, P., Guzmán, A.** (2014). Métodos para la captura y análisis de datos bioecológicos de las rayas de agua dulce (Potamotrygonidae). En: Lasso, C. A., Rosa, R. S., Sánchez-Duarte, P., Morales-Betancourt, M. A., Agudelo-Córdoba, E. (eds.) IX. Rayas de agua dulce (Potamotrygonidae) de Suramérica. Parte I. Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, Brasil, Guyana, Surinam y Guayana Francesa: diversidad, bioecología, uso y conservación. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C. 368 p.
- Kume, G., Furumitsu, K., Tanaka, S., Yamaguchi, A.** (2009). Reproductive biology of the guitarfish *Rhinobatos hymnacephalus* (Batoidea: Rhinobatidae) in Araiike Bay, Japan. *Environmental Biology of Fishes*, 85(4), 289-298.
- Lasso, C. A., Ramos-Socha, H. B., Rivas-Lara, T. S., Rincón-López, C. E.** (2011). *Potamotrygon magdalenae*. pp. 136-137. En: Lasso, C. A., Agudelo Córdoba, E., Jiménez-Segura, L. F., Ramírez-Gil, H., Morales-Betancourt, M. A., Ajiaco-Martínez, R. E., Gutiérrez, F. de P., Usma, J. S., Muñoz Torres, S. E., & Sanabria Ochoa, A. I. (Eds.). I. Catálogo de los recursos pesqueros continentales de Colombia. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C., Colombia.
- Lasso, C. A., Rosa, R. S., Sánchez-Duarte, P., Morales-Betancourt, M. A., Agudelo-Córdoba, E.** (2014). IX. Rayas de agua dulce (Potamotrygonidae) de Suramérica. Parte I. Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, Brasil, Guyana, Surinam y Guayana Francesa: diversidad, bioecología, uso y conservación. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C. 368 p.
- Lasso, C. A., Rosa, R. S., Morales-Betancourt, M. A., Garrone-Neto, D., Carvalho, M.** (2016). XV. Rayas de agua dulce (Potamotrygonidae) de Suramérica. Parte II: Colombia, Brasil, Perú, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Argentina. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C., Colombia. 435 pp.
- Lasso, C., Mesa-Salazar, L., Sánchez-Duarte, P., Usma, S., Villa-Navarro, F.** (2016). *Potamotrygon magdalenae*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T161385A61472512. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-1.RLTS.T161385A61472512.en>
- Luer, C. A., Walsh, C. J., Bodine, A. B., Wyffels, J. T.** (2007). Normal embryonic development in the clearnose skate, *Raja eglanteria*, with experimental observations on artificial insemination. *Environmental Biology of Fishes*, 80(2-3), 239.
- Maxwell, E. E., Fröbisch, N. B., Heppleston, A. C.** (2008). Variability and conservation in late chondrichthyan development: ontogeny of the winter skate (*Leucoraja ocellata*). *The Anatomical Record*, 291(9), 1079-1087.

- McEachran, J., Carvalho, M. R.** (2002). Batoid fishes. *The living marine resources of the Western Central Atlantic. 1*, 507-599.
- McMillan, D.B.** (2007). Oviducts and Oviparity. In: McMillan, D.B. (eds) Fish Histology. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5715-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5715-1_5)
- Mejía-Falla, P. A., Pérez-Rojas, J. G., Gómez-Martínez, D., Muñoz-Osorio, L. A., Galindo, E., López-García, J., Pedreros, T. M., Fernández G., Navia, A. F.** (2016). Avances en el conocimiento de *Potamotrygon magdalenae* (Duméril 1865), raya dulceacuícola endémica de Colombia. En: Lasso, C. A., Rosa, R. S., Morales-Betancourt, M. A., Garrone-Neto, D., & Carvalho, M. (Eds.). XV. Rayas de agua dulce (Potamotrygonidae) de Suramérica. Parte II: Colombia, Brasil, Perú, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Argentina. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D. C. 435 p.
- Mojica, J. I., Usma, J. S., Álvarez-León, R., Lasso, C. A.** (2012). Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Bogotá. 164 pp.
- Payán, L. F., Navia, A. F., Rubio, E. A., Mejía-Falla, P. A.** (2011). Biología de la raya guitarra *Rhinobatos leucorhynchus* (Günther, 1867) (Rajiformes: Rhinobatidae) en el Pacífico colombiano. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 39(2), 286-296.
- Pedreros-Sierra, T., Ramírez-Pinilla, M. P.** (2015). Morphology of the reproductive tract and acquisition of sexual maturity in males of *Potamotrygon magdalenae* (Elasmobranchii: Potamotrygonidae). *Journal of Morphology*, 276(3), 273-289. <https://doi.org/10.1002/jmor.20337>
- Pedreros-Sierra, T., Arrieta, D., Mejía, P.** (2016). Reproductive system of females of Magdalena River endemic stingray *Potamotrygon magdalenae*: Anatomical and functional aspects. *Journal of Morphology*, 277(5), 680-697. <https://doi.org/10.1002/jmor.20527>
- Ramos-Socha, H.** (2010). Algunos aspectos biológicos de la raya de agua dulce *Potamotrygon magdalenae* (Duméril, 1865) (Chondrichthyes: Myliobatiformes) en la Ciénaga de Sabayo, Guaimaral, Magdalena-Colombia. Trabajo de Grado, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 80 p.
- Ramos-Socha, H. B., Grijalba-Bendeck, M.** (2011). Bioecology of the freshwater stingray *Potamotrygon magdalenae* (Duméril, 1865) (Myliobatiformes) from the Ciénaga de Sabayo, Guaimaral, Colombia. *Revista UDCA. Actualidad & Divulgación Científica*, 14(2), 109-118.
- Rodda, K. R., Seymour, R. S.** (2008). Functional morphology of embryonic development in the Port Jackson shark *Heterodontus portusjacksoni* (Meyer). *Journal of Fish Biology*, 72(4), 961-984.
- Rosa, R., Charvet-Almeida, P., Diban, C.** (2010). Biology of the South American Potamotrygonid Stingrays, pp. 241-281. En: Carrier, J., Musick, J., & Heithaus, M., (eds.). *Sharks and their Relatives II: Biodiversity, Adaptive Physiology, and Conservation* New York: CRC Press.
- Smith, J. W., Merriner, J. V.** (1986). Observations on the reproductive biology of the cownose ray, *Rhinoptera bonasus*, in Chesapeake Bay. *Fishery Bulletin*, 84, 871-877.
- Teshima, K., Takeshita, K.** (1992). Reproduction of the freshwater stingray, *Potamotrygon magdalenae* taken from the Magdalena River system in Colombia, South America. *Bulletin Seikai National Fisheries Research Institute*, 70, 11-27.
- Thomason, J. C., Davenport, J., Le Comte, E.** (1996). Ventilatory mechanisms and the effect of hypoxia and temperature on the embryonic lesser spotted dogfish. *Journal of Fish Biology*, 49(5), 965-972.
- Thorson, T. B., Langhamer, J. K., Oetinger, M. I.** (1983). Reproduction and development of the South American freshwater stingrays, *Potamotrygon circularis* and *P. motoro*. *Environmental Biology of Fishes*, 9(1), 3-24.
- Villa-Navarro, F. A.** (1999) Estudio biológico pesquero de la represa de Prado, para la determinación de especies promisorias en acuicultura. Universidad del Tolima, CORTOLIMA, INPA, Gobernación del Tolima y Comité Departamental de Cafeteros del Tolima. Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia. 105 p. + 2 anexos.
- Walker, T.** (2005). Reproduction in fisheries science; pp. 81-128. En Hamlett, W.C., (ed.). *Reproductive Biology and Phylogeny of Chondrichthyes: Sharks, Batoids, and Chimaeras*. Enfield (NH): Science Publishers.
- White, W.T., Platell, M. E., Potter, I. C.** (2001). Relationship between reproductive biology and age composition and growth in *Urolophus lobatus* (Batoidea: Urolophidae). *Marine Biology*, 138, 135-147.
- Wyffels, J. T.** (2009). Embryonic development of Chondrichthyan fishes-A review. *Development of Non-Teleost Fishes*. Enfield: Science Publishers, p 1-103.
- Zheng, W., Qiu, S.** (1993). Reproductive biology of the guitarfish, *Rhinobatos hynnicephalus*. *Environmental Biology of Fishes* 38, 81-93. <https://doi.org/10.1007/BF00842906>

Artículo original

## Reacción y rendimiento de microinjertos de tomate (*Solanum* spp.) inoculados con *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen causante del marchitamiento vascular

### Reaction and yield of tomato micrografts (*Solanum* spp.) inoculated with vascular wilt-causing *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen

✉ Dora Janeth García-Jaramillo<sup>1</sup>, ✉ Silvia Patricia López-Zapata<sup>2,\*</sup>,  
Santiago Bustamante-Granada<sup>1</sup>, ✉ Walter Ricardo López<sup>3</sup>, ✉ Jairo Castaño-Zapata<sup>4</sup>,  
✉ Nelson Ceballos-Aguirre<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Agrícolas, Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal, Unisarc, Santa Rosa de Cabal, Colombia

<sup>3</sup>Departamento de Física y Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Colombia

<sup>4</sup>Programa de Maestría en Fitopatología, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

**Citación:** García-Jaramillo DJ, López-Zapata SP, Bustamante-Granada S, et al. Reacción y rendimiento de microinjertos de tomate (*Solanum* spp.) inoculados con *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen causante del marchitamiento vascular. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):714-729, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1688>

**Editor:** Elizabeth Castañeda

**\*Correspondencia:**

Silvia Patricia López-Zapata;  
[silvia.lopez@unisarc.edu.co](mailto:silvia.lopez@unisarc.edu.co)

**Recibido:** 13 de mayo de 2022

**Aceptado:** 29 de agosto de 2022

**Publicado en línea:** 19 de septiembre de 2022

## Resumen

El marchitamiento vascular del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) causado por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol), cuyo hábitat es el suelo, es una enfermedad devastadora que puede causar pérdidas hasta del 100 % de la producción de frutos. Entre las alternativas de manejo de la enfermedad está el injerto. En nuestro estudio la reacción a la enfermedad se determinó mediante la medición del porcentaje de la incidencia y el rendimiento de los microinjertos con el empleo de tres patrones del tipo Cherry, el IAC412, el IAC426 y el IAC391, y copas de las variedades comerciales Calima y Carguero inoculadas con un aislamiento de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*, raza 2. Los resultados indicaron que las combinaciones de los heteroinjertos IAC391/CAR e IAC412/CAR inoculados con el hongo fueron las más promisorias en términos de peso promedio del fruto, con 59 y 79 g, y un rendimiento de 14,9 y 21,3 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. El peso promedio del fruto de la variedad comercial Carguero fue de 102 g y un rendimiento de 13,9 t.ha<sup>-1</sup>, lo que indica que, por efecto del microinjerto y la presencia del hongo, el peso promedio del fruto en los heteroinjertos se redujo, pero el rendimiento se incrementó, lo cual permite concluir que el microinjerto es una alternativa para la selección de patrones tolerantes a *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* que, al ser injertados con materiales comerciales, incrementan el rendimiento del tomate.

**Palabras clave:** Hongo; Suelo; Solanácea; Marchitez; Microinjerto; Producción.

## Abstract

Vascular wilt in tomato crops (*Solanum lycopersicum*) caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol), whose habitat is the soil, is a devastating disease that can cause fruit production losses of up to 100%. Grafting is among the management alternatives for the disease. In our study, the reaction to the disease was determined by the incidence expressed as a percentage and the yield of the micrografts was determined by using three Cherry-type rootstocks, IAC412, IAC426, and IAC391 and scions of the commercial varieties, Calima and Carguero inoculated with an isolate of



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

*F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* race 2. The results indicated that the combinations of the IAC391/CAR and IAC412/CAR heterografts inoculated with the fungus were the most promising in terms of average fruit weight with 59 and 79 g and a yield of 14.9 and 21.3 t.ha<sup>-1</sup>, respectively. The commercial variety Carguero had a fruit average weight of 102 g and a yield of 13.9 t.ha<sup>-1</sup> indicating that the effect of micrografting and the presence of the fungus reduced the average weight of the fruit in the heterografts but increased the yield, which indicates that it is an alternative for the selection of rootstocks tolerant to *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* and that grafting with commercial materials increases tomato yield.

**Keywords:** Fungus; Soil; Solanaceae; Wilt; Micrograft; Production.

## Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta dicotiledónea perteneciente a la familia Solanaceae (Ceballos *et al.*, 2017) que se cultiva en todo el mundo (Srinivas *et al.*, 2019) y es considerado uno de los cultivos más importantes en términos de consumo, uso comercial, área cultivada, producción y rendimiento (Hernández-Martínez *et al.*, 2014; Tampoare *et al.*, 2013). En Colombia la producción de tomates frescos en el 2020 fue de 576.733 toneladas (t) en un área aproximada de 8.783 ha y un rendimiento de 65,66 t.ha<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2022). Por otra parte, se han registrado más de 200 enfermedades que atacan el cultivo de tomate (Djidonou *et al.*, 2016), entre las que se encuentra el marchitamiento vascular causado por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen (Singh *et al.*, 2017), el cual es responsable de pérdidas que pueden llegar hasta el 100 % (Agrios, 2005). Debido a su hábitat parasítico en el suelo, es muy difícil de controlar, por consiguiente, la utilización de genotipos resistentes o tolerantes se ha convertido en una opción para combatir el patógeno cuando este ha colonizado el suelo.

Una alternativa biotecnológica para enfrentar el problema que representa el manejo de los patógenos habitantes del suelo es el injerto, técnica centenaria que consiste en la unión física de partes de dos plantas de la misma especie o de especies diferentes que luego crecen como una sola planta (Rouphael *et al.*, 2010; Bletsos & Olympios, 2009). En muchos casos los patrones son materiales vegetales silvestres que históricamente han evolucionado conjuntamente con los patógenos y en los que se han identificado características genotípicas y fenotípicas deseables.

Considerando la importancia que tiene el tomate a nivel nacional, y ante la ausencia de medidas efectivas para el control del hongo, el objetivo del presente estudio fue evaluar la reacción de microinjertos de tomate a la raza 2 de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol) y su efecto en el rendimiento en condiciones de campo, usando como patrones tres genotipos silvestres del tipo Cherry provenientes del banco de germoplasma de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, y dos copas comerciales.

## Materiales y métodos

### *Cultivo in vitro y microinjerto*

Los genotipos de tomate se establecieron *in vitro* y se micropropagaron bajo las condiciones descritas por García *et al.* (2018). Las plántulas micropropagadas de 30 días de edad se emplearon como fuente para la producción de los patrones y las copas. Como patrones se seleccionaron segmentos internodales de 1,5 a 2,0 cm de longitud y 0,2 a 0,3 cm de diámetro, en promedio. Como copas se emplearon meristemos apicales y axilares con una longitud de 0,5 a 1,0 cm. Los microinjertos se hicieron mediante corte en púa terminal y luego se cultivaron en el medio basal de Murashige & Skoog (1962) suplementado con vitaminas B5 sin reguladores de crecimiento.

Los genotipos promisorios de tomate usados como patrones fueron las accesiones IAC426, IAC391 e IAC412, facilitadas por la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, las cuales se consideran tolerantes a *F. oxysporum* f.sp. *lycopersici* debido a que

el hongo expresa un retardo en el periodo de incubación y el marchitamiento vascular se desarrolla más lentamente (**Cardona-Piedrahita *et al.*, 2021**); el portainjeto comercial denominado Volt (Sakata Seeds®) (PAT) se empleó como control resistente (**SAKATA, 2022**). Según la ficha técnica comercial, las copas resistentes fueron las variedades de tomate Calima (BHN Seed®) (CAL) y Carguero (Top Seeds®) (CAR); como control susceptible se empleó la variedad de tomate Santa Clara (Saenz Fety®) (SC) (**Forero-Reyes *et al.*, 2018**). Con estos materiales se realizaron seis combinaciones de microinjertos (tres patrones por dos copas) en el laboratorio de cultivo de tejidos de la Universidad de Caldas, de las cuales se obtuvieron cuatro heteroinjertos y cinco autoinjertos, uno de los cuales correspondió al control resistente (PAT/PAT) y el otro al control susceptible con la variedad Santa Clara (SC/SC). Todos los genotipos empleados se obtuvieron a partir de semilla para un total de 32 tratamientos que incluyeron 18 autoinjertos y heteroinjertos, además de 14 genotipos sin injertar. En cada una de los tratamientos se hizo la inoculación con *Fol* con sus respectivos testigos (**Tabla 1**).

Inicialmente, los microinjertos se pasaron a bandejas estériles que contenían turba Sphagnum grado 3 estéril y luego se cubrieron con domos transparentes (cámaras de aclimatación) para mantener la humedad; gradualmente, se les incrementó el intercambio gaseoso mediante el retiro del domo, proceso que se efectuó en el Jardín Botánico de la Universidad de Caldas, desde donde se los trasladó a la granja Montelindo de la misma Universidad y se los mantuvo bajo condiciones de invernadero durante dos semanas para fortalecer su desarrollo antes de trasplantarlos al sitio definitivo en el campo. Esta granja está localizada en la vereda Santágueda, municipio de Palestina (Caldas), a 1.050 m s.n.m., y tiene una temperatura promedio anual de 22,5 °C, una humedad relativa de 76 % y una precipitación anual de 2.100 mm.

La siembra se hizo completamente al azar con seis repeticiones por tratamiento y una planta como unidad experimental; la distancia de siembra fue de 1,50 m entre surcos y 0,50 m entre plantas, y se usó una estructura de semitecho y una canal recubierta con plástico negro sobre la cual se depositó el suelo previamente desinfectado con dazomet (Basamid® GR) en dosis de 35 g.m<sup>-2</sup> para evitar la posible presencia de *Fol* en el suelo y su interferencia con los resultados. Durante la fase de campo se hizo el manejo agronómico y se aplicaron las prácticas culturales propias del cultivo para garantizar un óptimo desarrollo de las plantas (**Jaramillo-Noreña *et al.*, 2013**).

#### ***Características del aislamiento de Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici***

El aislamiento de *Fol* denominado COMBIA, obtenido por **Marín-Serna *et al.* (2014)** y caracterizado molecularmente como raza 2 por **Carmona *et al.* (2020)**, se obtuvo del laboratorio de fitopatología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Caldas. Antes de iniciar la investigación se verificaron las características morfológicas macroscópicas y microscópicas del hongo; además, mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) se observó en detalle la formación de esclerocios del fitopatógeno (**Figura 1**). Para la multiplicación y el mantenimiento de *Fol* se utilizó agar papa dextrosa (PDA, Oxoid®) mezclando 0,3 g de macerado de plántulas de tomate sanas obtenidas de cultivo *in vitro* en cada 100 mL de medio.

#### ***Preparación del inóculo e inoculación en el campo***

El inóculo de *Fol* usado se preparó siguiendo la metodología descrita por **Mandal *et al.* (2009)** con algunas modificaciones; el hongo se cultivó y se mantuvo durante dos semanas en medio de cultivo PDA y macerado de plántulas de tomate a una temperatura de 28 °C en una incubadora marca Binder®, tras lo cual las cajas de Petri fueron inundadas con agua destilada estéril; con la ayuda de un asa se removió el hongo y se pasó por una gasa doble previamente esterilizada; después se contaron las esporas en un hemacitómetro y se ajustó la concentración a 1x10<sup>6</sup> conidios.mL<sup>-1</sup> de agua destilada estéril. Pasados 15 días de aclimatación, se depositaron en la base del tallo de cada una de las plántulas microinjertadas 75 mL de la suspensión conidial en la concentración indicada.

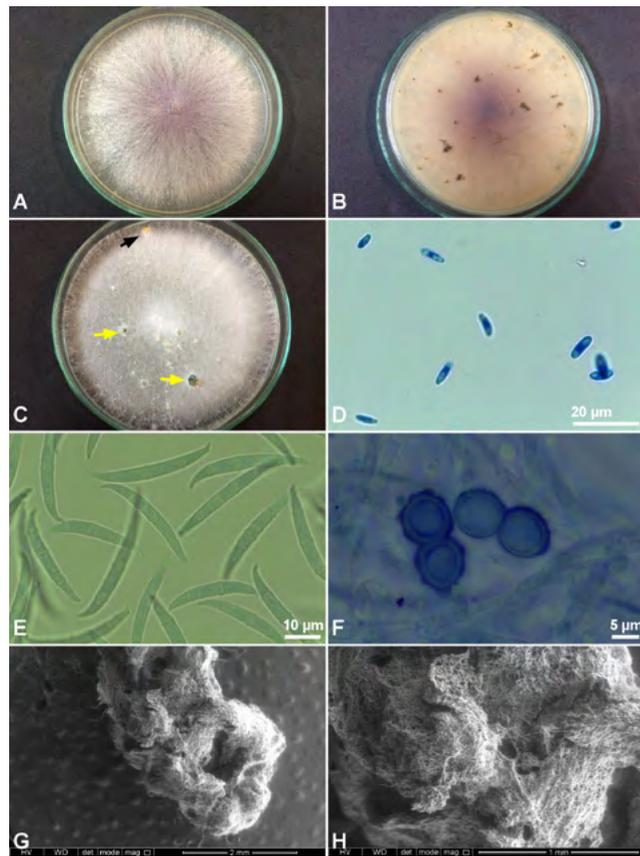
Para determinar la reacción de los microinjertos a *Fol*, a partir del momento de la inoculación y durante 14 semanas se evaluó la incidencia de la enfermedad expresada en síntomas como el amarillamiento, el marchitamiento y la muerte de las plantas. Para determinar la incidencia de la enfermedad se usó la siguiente fórmula:

$$\text{Incidencia (\%)} = \frac{\text{Número de plantas afectadas}}{\text{Total de plantas}} * 100 \text{ (Castaño-Zapata, 2016)}$$

**Tabla 1.** Descripción de los tratamientos de tomate evaluados en la granja Montelindo de la Universidad de Caldas bajo condiciones semicontroladas

<b>No injertados</b>				
Tratamiento No.	Material	Descripción	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i>	
1	CAR (+)*	Carguero, comercial resistente	Inoculado	
2	CAR (-)		No inoculado	
3	CAL (+)	Calima, comercial resistente	Inoculado	
4	CAL (-)		No inoculado	
5	SC (+)	Santa Clara, comercial-susceptible	Inoculado	
6	SC (-)		No inoculado	
7	PAT (+)	Portainjerto japonés resistente	Inoculado	
8	PAT (-)		No inoculado	
9	IAC391 (+)	Cherry promisorios	Inoculado	
10	IAC391 (-)		No inoculado	
11	IAC426 (+)		Inoculado	
12	IAC426 (-)		No inoculado	
13	IAC412 (+)		Inoculado	
14	IAC412 (-)		No inoculado	
<b>Autoinjertos</b>				
15	SC/SC (+)	Santa Clara, comercial susceptible	Inoculado	
16	SC/SC (-)		Inoculado	
17	IAC426/IAC426 (+)	Cherry promisorios	Inoculado	
18	IAC426/IAC426 (-)		Inoculado	
19	IAC391/IAC391 (+)		Inoculado	
20	IAC391/IAC391 (-)		Inoculado	
21	IAC412/IAC412 (+)		Inoculado	
22	IAC412/IAC412 (-)		Inoculado	
23	PAT/PAT (+)	Portainjerto japonés resistente	Inoculado	
24	PAT/PAT (-)		Inoculado	
<b>Heteroinjertos</b>				
Tratamiento No.	Material	Patrones	Copas	<i>Fol</i>
25	IAC412/CAR (+)	Cherry promisorios	Carguero, comercial resistente	Inoculado
26	IAC391/CAR (+)			
27	IAC412/CAR (-)			No inoculado
28	IAC391/CAR (-)			
29	IAC412/CAL (+)		Calima, comercial resistente	Inoculado
30	IAC426/CAL (+)			
31	IAC412/CAL (-)			No inoculado
32	IAC426/CAL (-)			

\* CAR: Carguero, CAL: Calima, SC: Santa Clara, (+): inoculado con *Fol*, (-): no inoculado



**Figura 1.** Características macroscópicas y microscópicas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* raza 2 **A.** Anverso de la colonia en PDA. **B.** Reverso de la colonia en PDA. **C.** Formación de esporodocio (flecha negra) y esclerocios (flechas amarillas) sobre PDA. **D.** Microconidios. **E.** Macroconidios. **F.** Clamidosporas. **G, H.** Detalle de la estructura de un esclerocio visualizado a través de ESEM

A partir de los 35 días del trasplante y la inoculación, cuando aparecieron las primeras flores, se comenzó la medición semanal de los caracteres de rendimiento y calidad del fruto utilizando la metodología sugerida por el **International Plant Genetic Resources Institute - IPGRI** (1996). Los frutos se observaron en el segundo y tercer racimo de cada planta en la etapa de plena madurez. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza para determinar las diferencias significativas entre los tratamientos. Se analizaron tanto las interacciones entre los factores como estos tomados individualmente, es decir, se hicieron los respectivos análisis por genotipo inoculado y no inoculado, con el fin de reducir la influencia de los componentes. Posteriormente, las medias de los tratamientos con diferencias significativas en el análisis de varianza, se compararon con la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ) para diferenciar el comportamiento de cada uno de los tratamientos según la variable evaluada y seleccionar el mejor. Se utilizó el procedimiento GLM del *Statistical Analysis System* (SAS Institute, 2010).

## Resultados y discusión

### Desarrollo de síntomas

A los 98 días de la inoculación (DDI) con *Fol*, las plantas no injertadas de la variedad susceptible Santa Clara y de la resistente Calima eran las únicas con síntomas de amarillamiento, marchitamiento y deterioro vascular, con una incidencia de 70 y 65 %, respectivamente (**Figura 2**) (**Tabla 2**). En los genotipos silvestres promisorios IAC 391,



**Figura 2.** Efecto de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* sobre la variedad Santa Clara susceptible y el genotipo Calima tolerante. **SANTA CLARA.** **A.** Plantas con síntomas de Marchitamiento vascular. **B.** Haces vasculares necrosados. **C.** Raíces necrosadas. **D, E, F.** Aspecto de dos plantas de Santa Clara no inoculadas, haces vasculares y raíces, respectivamente. **CALIMA.** **G.** Síntomas de ligero marchitamiento vascular y amarillamiento del follaje del tercio bajo del tallo. **H.** Deterioro vascular. **I, J.** Aspecto de plantas de Calima no inoculadas y haces vasculares, respectivamente

IAC412 e IAC 426 no se observaron síntomas externos, como tampoco en los haces vasculares. En general, se observó una disminución en la cantidad de follaje y raíces en los materiales inoculados en comparación con sus respectivos controles (**Figura 3**). Estos resultados difieren de los de estudios en que las plantas adultas de tomate enfermas presentaron epinastia, enanismo, amarillamiento de las hojas del tercio bajo de la planta, defoliación, necrosis marginal, marchitamiento y, por último, la muerte (**Agrios, 2005; Joshi, 2018**). Es importante señalar que la información proviene de estudios realizados bajo condiciones controladas y no en campo, como fue nuestro caso, donde las condiciones propias del ambiente no controlado ejercen un impacto diferencial en la interacción planta-patógeno que puede afectar la resistencia (**Moore, 1994**).

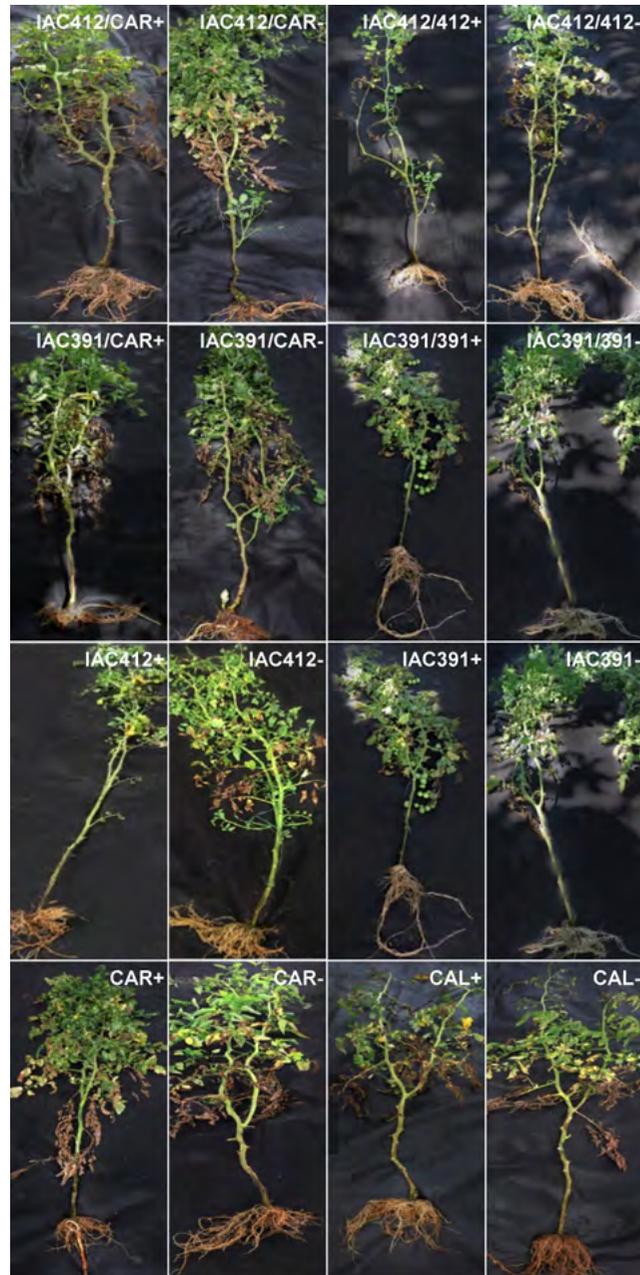
**Tabla 2.** Incidencia del marchitamiento vascular, disminución del follaje y promedio de las variables de producción y rendimiento de materiales de tomate inoculados (+) y no inoculados (-) con *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*

Genotipo	Tratamiento	Incidencia (%)	Disminución de follaje	Número de frutos cosechados (NFC) 98 DDI **	Peso promedio del fruto (PPF) (g)**	Producción por planta (PPP) (Kg)**	Rendimiento (t/ha)**	
<b>PAT</b>	PAT (-)	0	No	8,4 bcdefgh*	24,66 hij	0,4 fg	5,5 fg	
	PAT (+)	0	Sí	7,3 bcdefgh	22,88 hij	0,5 defg	6,9 defg	
	PAT/PAT (-)	0	No	17,3 b	24,38 hij	0,6 cdefg	12,1 abcdefg	
	PAT/PAT (+)	0	Sí	11,3 bcdefgh	17,47 ij	0,4 fg	7,5 cdefg	
<b>IAC391</b>	IAC391 (-)	0	No	16,3 bc	21,75 hij	0,9 abcdefg	10,2 abcdefg	
	IAC391 (+)	0	Sí	12,2 bcdefg	21,54 hij	1,1 abcde	11,7 abcdefg	
	IAC391/IAC391 (-)	0	No	14,8 bcd	24,05 hij	0,9 abcdefg	19,2 abc	
	IAC391/IAC391 (+)	0	Sí	14,3 bcde	20,16 ij	1 abcdef	14 abcdefg	
	<b>IAC 391/CAR (-)</b>	<b>0</b>	<b>No</b>	<b>6,0 cdefgh</b>	<b>83,13 bcdef</b>	<b>0,8 abcdefg</b>	<b>20,9 ab</b>	
	<b>IAC 391/CAR (+)</b>	<b>0</b>	<b>Sí</b>	<b>8,6 bcdefgh</b>	<b>58,59 efgh</b>	<b>1 abcdef</b>	<b>14,9 abcdefg</b>	
	<b>IAC412</b>	IAC412 (-)	0	No	14,1 bcdef	17,56 ij	1,4 abc	8,1 cdefg
	IAC412 (+)	0	Sí	9,1 bcdefgh	15,92 ij	1,5 ab	6,3 fg	
IAC412/IAC412 (-)	0	No	11,3 bcdefg	13,07 ij	1,2 abcd	9,5 bcdefg		
IAC412/IAC412 (+)	0	Sí	14 bcdef	14,33 ij	1,6 a	9,8 abcdefg		
<b>IAC412/CAR (-)</b>	<b>0</b>	<b>No</b>	<b>8,0 bcdefgh</b>	<b>81,21 bcdef</b>	<b>1,1 abcde</b>	<b>22 a</b>		
<b>IAC 412/CAR (+)</b>	<b>0</b>	<b>Sí</b>	<b>8,4 bcdefgh</b>	<b>79,41 bcdef</b>	<b>1,6 a</b>	<b>21,3 ab</b>		
IAC 412/CAL (-)	00	No	5,2 defgh	66,32 cdef	1,1 abcde	14,2 abcdefg		
IAC 412/CAL (+)		Sí	8,2 bcdefgh	50,37 fghi	1,3 abcd	1,3 g		
<b>Santa Clara</b>	SC (-)	0	No	1,8 gh	60,87 cdef	0,7 bcdefg	6,7 fg	
	SC (+)	<b>70</b>	Sí	2 gh	84,71 bcde	0,8 abcdefg	2,8 fg	
	SC/SC (-)	0	No	1,5 gh	76 bcdef	0,8 abcdefg	10,2 abcdefg	
	SC/SC (+)	<b>70</b>	Sí	0,5 h	113,25 a	0,7 bcdefg	5,8 fg	
<b>IAC426</b>	IAC 426 (-)	0	No	14 bcdef	19,92 ij	0,7 bcdefg	17,5 abcde	
	IAC 426 (+)	0	Sí	8,8 bcdefgh	15,24 ij	0,8 abcdefg	19 abcd	
	IAC 426/426 (-)	0	No	4,0 defgh	24,66 hij	0,2 g	3,4 fg	
	IAC 426/426 (+)	0	Sí	14 bcdf	27,91 ghij	0,3 fg	6,2 fg	
	IAC 426/CAL (+)	0	Sí	3,3 fgh	58,6 defg	0,2 g	2,3 fg	
<b>Carguero</b>	<b>CAR (-)</b>	<b>0</b>	<b>No</b>	<b>4,6 defgh</b>	<b>97,61 abc</b>	<b>0,5 defg</b>	<b>16,2 abcdef</b>	
	<b>CAR (+)</b>	<b>0</b>	<b>Sí</b>	<b>4,0 defgh</b>	<b>101,71 ab</b>	<b>0,5 defg</b>	<b>13,9 abcdefg</b>	
<b>Calima</b>	CAL (-)	0	No	4,3 defgh	71,21 cdef	0,6 cdefg	10,3 abcdefg	
	CAL (+)	<b>65</b>	Sí	3,6 efgh	92,58 abcd	0,6 cdefg	9,9 abcdefg	

\* Letras diferentes indican diferencia estadística según la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ). \*\* Diferencias estadísticas altamente significativas  
Los datos en negrillas indican los mejores injertos o tratamientos del estudio

Asimismo, se ha señalado que los portainjertos de tomate con características de resistencia o tolerancia a patógenos pueden suprimir los síntomas característicos de una enfermedad; por ejemplo, los patrones Vigostar, Aloha y RT-160961 inhiben totalmente la expresión de los síntomas de *Fol* hasta cinco meses después de la siembra y reducen la incidencia de la marchitez vascular hasta en un 94 % y, al igual que los híbridos injertados sobre Multifort, no manifiestan daño externo ni en las raíces hasta el final del ciclo (**Baéz-**

Valdez *et al.*, 2010). En este sentido, Botero *et al.* (2018), reportan que los síntomas externos de la planta hospedante no siempre son detectables y esta puede permanecer asintomática durante todo el ciclo de desarrollo y actuar como reservorio del patógeno, siendo necesario que el grado de afectación sea alto para que se detecte exclusivamente con base en los síntomas visibles. Los autores mencionan, además, que la resistencia de ciertas variedades de tomate imposibilita la manifestación de síntomas. Asimismo, se ha documentado que la expresión de síntomas varía de acuerdo con el tipo de resistencia que la planta posee; por ejemplo, según Gao *et al.* (1995), en plantas de tomate con



**Figura 3.** Cambios en el follaje y densidad de las raíces de los autoinjertos, heteroinjertos y genotipos de tomate no injertados, inoculados con *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* y sus respectivos controles no inoculados 98 días después de la inoculación. Obsérvese el aspecto de los injertos inoculados y no inoculados de IAC391 e IAC412 con CAR

resistencia poligénica a *Fol* raza 1, la enfermedad se desarrolla en paralelo con el grado de colonización del patógeno, por lo que los síntomas son visibles en los peciolos. Sin embargo, en otras plantas aparentemente sanas el xilema lateral puede estar infectado y el central estar libre de infección. También, en el caso específico de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* causante de la marchitez vascular en el garbanzo (*Cicer arietinum* L.), se ha comprobado que no todas las plantas presentan el típico marchitamiento e, incluso, la muerte puede darse después de periodos prolongados dependiendo de las razas del patógeno (Jiménez-Fernández *et al.*, 2013).

Otro hecho que puede explicar la ausencia de síntomas visibles son las interacciones incompatibles entre el patógeno y el hospedante, pues usualmente la invasión vascular no se presenta por el tipo de resistencia del genotipo y, aunque se inocule con razas virulentas del patógeno, la colonización puede llegar a ser limitada o incluso nula, pero en ambos casos sin que se desarrollen síntomas visibles, como se ha demostrado con el genotipo WR315 de garbanzo al ser inoculado con la raza 0 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* (Jiménez-Fernández *et al.*, 2013). En el mismo sentido, se ha determinado que también el grado de colonización se ve afectado por la resistencia de los materiales en los que se inocula el patógeno. En el caso particular de *Fusarium oxysporum* f. sp. *Fragarie*, se impidió la germinación de las esporas del hongo y este permaneció en las células epidermales de las raíces de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) (Fang *et al.*, 2012), en tanto que *F. oxysporum* f. sp. *pisi* se mantuvo en los vasos radicales (Tessier *et al.*, 1990) y con *F. oxysporum* f. sp. *ciceris* se reportó la ausencia de síntomas incluso en presencia de daño vascular extendido (Jiménez-Fernández *et al.*, 2013).

En genotipos resistentes se ha demostrado que aún en las etapas prevasculares de la infección se evidencian bajas tasas de colonización, incluso en el xilema, reduciéndose así el movimiento del patógeno (Zvirin *et al.*, 2010); estos resultados explicarían la respuesta del genotipo comercial Calima, el cual tiene la capacidad de reducir cuantitativamente el proceso de colonización patogénica estimada con base en la disminución del crecimiento micelial y la proporción de vasos infectados (Gao *et al.*, 1995), esto desemboca finalmente en una expresión reducida de los síntomas visibles, tal como se observó en nuestro estudio, en el que las plantas mostraron síntomas de ligero marchitamiento vascular y amarillamiento del follaje en el tercio bajo de la planta (Figura 2).

En respuesta a la presencia del patógeno, también se observó en los materiales de tomate PAT, CAL, CAR, IAC391, IAC412 y IAC426 inoculados la disminución del follaje (Figura 3) (Tabla 2), lo que concuerda con el reporte de Garcés *et al.* (1999), quienes indican que, aparte de una eventual coloración de los haces vasculares, que puede ir de blanquecina a marrón, el diagnóstico de la marchitez vascular causada por *Fusarium* puede basarse también en la disminución del crecimiento general de la planta y el enanismo de los brotes, comportamiento que también ha sido observado en el banano (*Musa* spp.) con *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*), el cual provoca la reducción, el arrugamiento y la distorsión de la lámina foliar, así como el crecimiento lento de las plantas (Pérez *et al.*, 2014). Por otra parte, en el garbanzo *F. oxysporum* f. sp. *pisi* (*Fop*) produce la reducción de la biomasa de las raíces y un follaje clorótico, menos vigoroso y con menor peso fresco (Steinkellner *et al.*, 2008; Curtis *et al.*, 2014), similar a lo observado en nuestro estudio.

### **Componentes de rendimiento**

La cosecha de los frutos se inició a los 70 DDI y se evaluó hasta los 98 días. Se encontraron diferencias muy significativas en la variable del número de frutos cosechados por planta (NFC) a partir de los 77 DDI; esta variable y el peso promedio del fruto (PPF) fueron dependientes de los genotipos evaluados.

A los 98 DDI el mayor NFC se registró en el autoinjerto PAT/PAT no inoculado (-), con 17 frutos, lo que se redujo a 11,3 frutos por efecto de la inoculación con *Fol*, y, aunque el número siguió siendo superior al NFC en los materiales sin injertar, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre estos últimos y el autoinjerto inoculado.

El genotipo IAC391 (-) fue el segundo material con el mayor NFC a los 98 DDI (16,3 frutos), registrándose una reducción superior a 50 % cuando se injertó con CAR y se inoculó con *Fol*; la menor reducción en esta variable se presentó en los autoinjertos, con 14,8 frutos en promedio en IAC391/IAC391(-) y 14,3 en IAC391/IAC391 (+), valores superiores a los registrados en el testigo comercial, de 4,0 en el CAR (+) y 4,6 en el CAR (-) (**Tabla 2**).

El material silvestre IAC412 (-) produjo en promedio 14,1 frutos.planta<sup>-1</sup>, siendo superior a todas las demás combinaciones realizadas con el genotipo; cuando se lo empleó como patrón de las copas CAL (IAC412/CAL) y CAR(IAC412/CAR) y se inoculó, no se observaron diferencias estadísticas significativas entre estos heteroinjertos, con un promedio de 8,2 y 8,4 frutos, respectivamente.

Al igual que con el IAC391, los heteroinjertos cuyo patrón era el IAC412 aumentaron el NFC en comparación con los materiales del tipo Chonto no injertados, y en el caso específico de IAC412/CAR el aumento fue cercano a 100 %.

No se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre IAC426 (-) y el autoinjerto inoculado IAC426/ IAC426 (+), con 14 frutos para cada material, y tampoco difirieron estadísticamente de los promedios obtenidos en IAC412 (-) e IAC412/IAC412 (+); la máxima reducción de frutos se observó en el heteroinjerto IAC426/CAL (+), con 3,3 frutos.planta<sup>-1</sup>. El testigo susceptible SC y sus combinaciones registraron el menor NFC a los 98 DDI y no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre SC (+), SC (-), SC/SC (-), y SC/SC (+). Sin embargo, se evidenció una tendencia diferencial en los componentes del rendimiento entre los autoinjertos no inoculados (-) y los inoculados (+), pasando de un rendimiento de 10,2 t/ha a 5,8 t/ha, respectivamente, lo que significa una reducción del 43,1 % en el rendimiento por efecto de la enfermedad (**Tabla 2**). Esto concuerda con otros estrudios en los que se han registrado hasta un 100 % de pérdidas en la producción (**Agrios**, 2005). En este sentido, y con miras a entender la diferencia en la respuesta genética de los genotipos evaluados, en el estudio de **López et al.** (2021), se reporta una respuesta transcripcional diferenciada de la interacción entre tomate y *Fol* asociada con la defensa, lo que puede afectar la producción de tomate.

En cuanto al PPF, el mayor peso se obtuvo al emplear CAR, CAL e IAC426 como copas, con 83,13 g.fruto<sup>-1</sup> en IAC391/CAR (-), 66,32 g en IAC412/CAL (-) y 27,91 g en IAC426/IAC426 (+); la combinación de IAC391/CAR (-) no presentó diferencias estadísticas significativas frente a IAC412/CAR (+), IAC412/CAR (-) y SC (+). Los autoinjertos PAT/PAT e IAC391/IAC391 no presentaron diferencias estadísticamente significativas por efecto del autoinjerto, únicamente se observó una variación debida a la inoculación con *Fol*, que redujo el peso del fruto a 17,47g en PAT/PAT (+) y a 20,16 g en IAC391/IAC391 (+) (**Tabla 2**). No obstante, el autoinjerto no inoculado de PAT/PAT produjo un promedio de 17,3 frutos con un peso promedio de 24,38 g, lo que no fue estadísticamente diferente de los demás materiales que incluían el testigo resistente. Asimismo, el PPF de los autoinjertos de IAC412/IAC412 no presentó diferencias estadísticas significativas en comparación con los autoinjertos no inoculados; sin embargo, cuando este genotipo sirvió como patrón de CAL y CAR se obtuvieron pesos promedios de 66,32 g para IAC412/CAL (-) y de 81,21 g para IAC412/CAR (-) (**Tabla 2**).

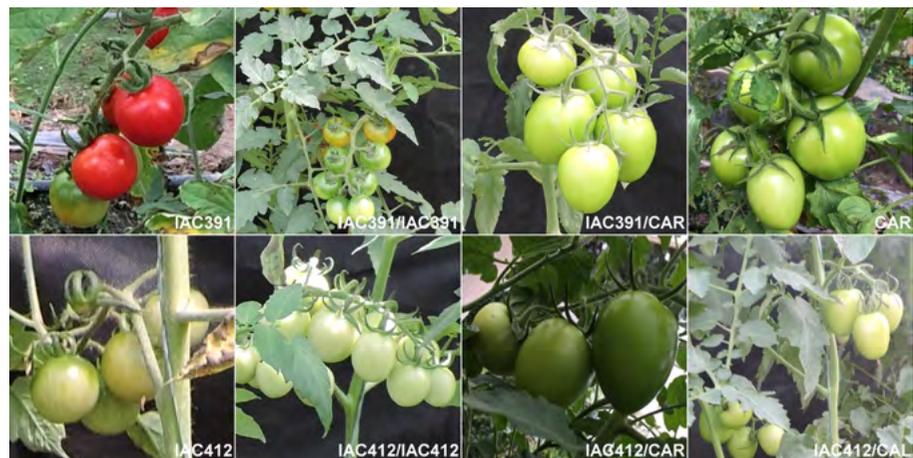
El autoinjerto IAC426/IAC426 (+) produjo frutos con mayor peso promedio (27,91 g) comparado con los autoinjertos conformados por IAC391/IAC391 (+) e IAC412/IAC412 (+); asimismo, el microinjerto de IAC412 con el tomate de tipo Chonto CAL (-) y el híbrido CAR (-) produjo frutos más pesados (66,32 g y 81,21 g, respectivamente) que los demás materiales que incluían este genotipo; por el contrario, CAL (-) y (+) redujo el PPF cuando se usó como copa de IAC426. Al igual que en los genotipos IAC391 e IAC412, en esta combinación se desarrollaron frutos de diferentes tamaños y pesos con un efecto directo sobre el rendimiento. Fue evidente que los tomates de tipo Chonto redujeron el PPF cuando se microinjertaron con los materiales silvestres y se inocularon con *Fol*; en estas combinaciones no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los heteroinjertos IAC412/CAR (+) y (-) y IAC391/CAR (-), lo que significa que se puede

conservar el PPF de CAR con cualquiera de estos dos patrones, pero cuando se emplea IAC391 como portainjerto y, además, hay presencia de *Fol*, el peso de los frutos se reduce significativamente. En el testigo susceptible SC, el mayor PPF se registró en el autoinjerto SC/SC (-), con 113,25 g, es decir, 52,38 g más que el PPF del control no injertado SC (-); sin embargo, este peso no se reflejó en la PPP, que fue de 0,7, asociada, a su vez, con un menor NFC de 0,5 (**Tabla 2**).

En general, la reducción en el NFC y el PPF de todos los materiales inoculados (**Tabla 2**) coincide con los porcentajes de pérdida reportados en tomate a causa de *Fol*, los cuales oscilan entre 60 y 70 % (**Ravindra et al.**, 2015), y pueden llegar a ser del 100 % cuando los cultivos son destruidos por el hongo antes de que puedan ser cosechados (**Agrios**, 2005). Por el contrario, la variación positiva observada en el PPF de los autoinjertos de los materiales silvestres IAC391/IAC391 (-) y IAC426/IAC426 (+) y (-) demuestra la eficiencia de los microinjertos en esta variable, con resultados comparables a los obtenidos por **Herrera et al.** (2015), quienes estudiaron las accesiones IAC391, IAC412 y IAC426 sin injertar y obtuvieron pesos promedio de 11,88 g, 11,14 g y 4,53 g, respectivamente, valores inferiores a los obtenidos en nuestro estudio.

Es evidente que *Fol* afecta el PPF; sin embargo, se destaca la tolerancia de los materiales silvestres IAC391 e IAC412 que, a pesar de la reducción en el peso de los frutos atribuible a factores como la incompatibilidad entre los materiales, la conexión vascular discontinua, la presencia de compuestos fenólicos en el punto de unión, y las alteraciones fisiológicas o bioquímicas, entre otros (**Baéz-Valdez et al.**, 2010), se mantuvieron sanos externa e internamente permitiendo un ciclo productivo más largo y, por consiguiente, mejor rendimiento de los tomates de tipo Chonto. La diferencia en el PPF fue una característica observada en los heteroinjertos IAC391/CAR, IAC412/CAR, IAC412/CAL e IAC426/CAL, combinaciones de microinjertos con frutos de diferentes tamaños, básicamente de tres categorías: 1) el fruto de tipo Cherry, 2) el genotipo Chonto y, 3) el genotipo combinado (tamaño y forma intermedia entre Cherry y Chonto) (**Figura 4**).

La mayor PPP en todos los materiales evaluados se obtuvo en el autoinjerto IAC412/IAC412 (+) y el heteroinjerto IAC412/CAR (+), con un promedio de 1,6 kg.planta<sup>-1</sup>; el segundo mejor promedio se obtuvo en IAC412 (+), con 1,5 kg y sin diferencias estadísticas con la producción de IAC412 (-). El IAC391 (+) produjo 1,1 kg. planta<sup>-1</sup> y no se observaron diferencias estadísticas significativas entre este genotipo y los heteroinjertos IAC412/CAR e IAC412/CAL sin inocular; el genotipo IAC391 (-) tuvo un promedio de 0,9 kg.planta<sup>-1</sup> y no presentó diferencias estadísticas con los autoinjertos IAC391/IAC391 y SC/SC no inoculados, el heteroinjerto IAC391/CAR (-) ni los genotipos SC (+) e IAC426 (+) (**Tabla 2**).



**Figura 4.** Características morfológicas de los frutos de los heteroinjertos de IAC391 e IAC412 con CAR

El autoinjerto IAC391/IAC391 (-), cuya PPP fue de 0,9 kg, no registró diferencias estadísticas frente a IAC391 (-) ni al heteroinjerto IAC391/CAR (-); sin embargo, este último tuvo un rendimiento equivalente a 20,9 t.ha<sup>-1</sup>, lo que significa una diferencia de 6 t.ha<sup>-1</sup> con respecto al mismo heteroinjerto inoculado. Asimismo, si se lo compara con el genotipo CAR (-), la diferencia en el rendimiento fue de 4,7 t.ha<sup>-1</sup>; por el contrario, al comparar el hetero-injerto IAC391/CAR (+) y el CAR (+) no hubo diferencias estadísticas en la variable. En esta interacción también fue claro el efecto de *Fol* sobre la producción, la cual se redujo tanto en el heteroinjerto con CAR como en el testigo sin injertar (**Tabla 2**). Sin embargo, el IAC391 puede considerarse un buen candidato como portainjerto del genotipo comercial CAR.

En el comportamiento de IAC412 y sus combinaciones no se evidenciaron diferencias estadísticas significativas en la variable PPP entre el autoinjerto IAC412/IAC412 (+) y el heteroinjerto IAC412/CAR (+), pero al comparar con el testigo CAR (+) y el CAR (-), la diferencia fue de 1,1 kg.planta<sup>-1</sup>, lo que demuestra el efecto positivo del injerto en estos materiales. En IAC426 la mayor producción fue para los genotipos no injertados y se notó una reducción cuando el material se sometió a autoinjerto (IAC426/IAC426) o heteroinjerto con CAL (IAC426/CAL), con una producción que difirió estadísticamente del testigo susceptible SC y, además, fue menor a la reportada para esta última variedad. Los materiales IAC426/CAL (+) e IAC426/IAC426 (-) presentaron la menor PPP de todos los evaluados, aunque el control no injertado e inoculado IAC426 (+) tuvo una producción de 0,8 kg.planta<sup>-1</sup>, lo cual sugiere un posible efecto del método de injerto (**Tabla 2**).

El rendimiento asociado al heteroinjerto IAC412/CAR (-) fue el mayor, con una producción promedio de 22 t.ha<sup>-1</sup>, seguido de IAC412/CAR (+), con 21,3 t.ha<sup>-1</sup>, en tanto que el genotipo comercial no injertado CAR (-) alcanzó una producción promedio de 16,2 t.ha<sup>-1</sup>, es decir, el microinjerto tuvo un efecto significativo en el rendimiento, de 5,1 t.ha<sup>-1</sup> adicionales frente al heteroinjerto. Asimismo, la inoculación con *Fol* tuvo un efecto significativo en términos de producción del genotipo CAR, registrándose una diferencia de 2,3 t.ha<sup>-1</sup> en relación con el testigo no inoculado. Cuando el mismo material IAC412 se combinó con CAL y se inoculó, se observó una reducción de 20 t.ha<sup>-1</sup> comparado con IAC412/CAR (+), comportamiento también observado al comparar los heteroinjertos no inoculados, con una reducción de 7,8 t.ha<sup>-1</sup>, lo que evidencia que el rendimiento en las combinaciones de CAL y CAR con IAC412 se ve afectado por *Fol*, siendo mayor la reducción en los heteroinjertos con CAL; sin embargo, el heteroinjerto IAC412/CAL (-) no presentó diferencias estadísticas en el rendimiento comparado con los autoinjertos IAC412/IAC412 (+) e IAC412/IAC412 (-) y con los testigos CAL (+) y CAL (-) (**Tabla 2**).

El genotipo IAC391 puede considerarse un buen candidato como portainjerto del genotipo comercial CAR. Los genotipos IAC426(+) e IAC426(-) tuvieron el tercer mayor rendimiento entre los genotipos evaluados, observándose diferencias estadísticas significativas por efecto del injerto, el cual lo redujo en 12,8 t.ha<sup>-1</sup> en IAC426/IAC426 (+) comparado con su testigo no injertado y con el heteroinjerto de CAL (+) y de CAL (-); sin embargo, cuando IAC426 (+) no se combinó, su producción fue similar a la del autoinjerto IAC391/IAC391 (-), con 19,0 t.ha<sup>-1</sup> y 19,2 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente (**Tabla 2**).

Los resultados obtenidos en el genotipo IAC412 producto del microinjerto son concluyentes y coinciden con otros reportes de estudios efectuados en el patosistema *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis* razas 1 y 2 en plantas de melón (*Cucumis melo* L.), en las que el injerto redujo el daño del hongo y aumentó el rendimiento (**Trionfetti et al.**, 2002). La diferencia en el rendimiento entre el heteroinjerto IAC412/CAR (+) y las plantas sin microinjerto confirma lo reportado por **Rouphael et al.** (2010), al indicar que el peso y el tamaño promedio de la fruta de las solanáceas y las cucurbitáceas son frecuentemente influenciados por el injerto, por lo que es un componente importante de esta variable; además, se confirmó que el injerto incrementa la producción de tomate incluso por encima del 15 % (**Velasco-Alvarado et al.**, 2016).

En el testigo resistente PAT la mejor respuesta fue la del autoinjerto no inoculado PAT/PAT (-) con 12,1 t.h<sup>-1</sup>, lo que representa una diferencia de 4,6 t.ha<sup>-1</sup> con respecto a PAT/PAT (+), pero también significa que, por efecto del autoinjerto y en ausencia del hongo, se obtuvieron 6,6 t.ha<sup>-1</sup> adicionales frente al control no inoculado y sin microinjerto PAT (-) (**Tabla 2**). Estos resultados son promisorios, ya que en estudios previos con los híbridos Multifort y Beaufort como portainjertos de tomate cv. Florida 47, se encontró que las plantas injertadas aumentaron el rendimiento de fruta comercializable hasta en un 41 % (**Djidonou et al.**, 2016); además, cuando la variedad de tomate El Cid se injertó en Multifort el rendimiento en fruta aumentó en 12,9 % (**Velasco-Alvarado et al.**, 2016), valores inferiores a los obtenidos en el presente estudio, pero que ratifican la eficiencia del patrón y su respuesta ante ambientes y copas diferentes. Asimismo, cuando se usaron los híbridos Vigostar y Multifort como patrones del híbrido Imperial, este último tuvo un incremento de aproximadamente 100 t.h<sup>-1</sup>, lo que demuestra una vez más el efecto que tienen el patrón y el injerto en la producción de tomate (**Baéz-Valdez et al.**, 2010). Asimismo, **Di Gioia et al.** (2010), reportaron aumentos superiores al 20 % por efecto del microinjerto del tomate Oxheart en las variedades Beaufort F1 y Maxifort F1, aunque no observaron efectos significativos del patrón en el número de frutos por planta ni en su tamaño. Estos resultados difieren en parte de nuestros resultados, pues aunque se aumentó el rendimiento, sí hubo un cambio en el número y el tamaño de los frutos.

En el testigo susceptible SC, el mayor rendimiento se obtuvo en la combinación SC/SC (-), con 10,2 t.ha<sup>-1</sup> frente a las 6,7 t.ha<sup>-1</sup> producidas por el control SC (-), es decir, el autoinjerto produjo 3,5 t.ha<sup>-1</sup> adicionales de tomate, pero cuando SC/SC (+) se inoculó con *Fol* se redujo el rendimiento en 4,4 t.ha<sup>-1</sup>. Por lo general, en los materiales que incluyeron el SC, se confirmó la habilidad de *Fol* para disminuir la producción en materiales susceptibles, pero también se demostró que con el microinjerto este genotipo aumenta el rendimiento de las plantas incluso en presencia del patógeno y que, cuando los autoinjertos no se inoculan, los rendimientos pueden ser estadísticamente similares a los obtenidos en IAC391(-), IAC391/IAC391 (+), IAC391/CAR (+), IAC412/CAL (-), IAC412/IAC412 (+) y CAL (+) (**Tabla 2**).

En los genotipos CAL y CAR se ha reportado resistencia a *Fol* razas 1 y 2 (**Jaramillo-Noreña et al.**, 2013), lo que se confirmó con nuestros resultados, pues, aunque en CAR el rendimiento se redujo en 2,3 t.ha<sup>-1</sup> por efecto de la inoculación, dicha reducción no fue estadísticamente significativa y tampoco se observaron síntomas de marchitamiento vascular, en tanto que CAL mostró un amarillamiento leve, marchitez y daño vascular, así como una disminución de 0,4 t.ha<sup>-1</sup> en el rendimiento a causa del hongo, diferencia que tampoco fue estadísticamente significativa (**Tabla 2**).

## Conclusiones

Este es el primer estudio en Colombia en el que se evaluaron plantas de tomate injertadas *in vitro* con patrones silvestres y copas comerciales como estrategia para el manejo del marchitamiento vascular ocasionado por *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*, lo que redujo la incidencia de la enfermedad en los microinjertos evaluados.

Los heteroinjertos que incluyeron IAC391 e IAC412 aumentaron los rendimientos hasta en 6 t. ha<sup>-1</sup> frente al genotipo comercial CAR manteniendo la dureza y el contenido de sólidos solubles de los frutos.

El uso sostenible de germoplasma de tomate y el método de microinjerto pueden considerarse una alternativa para la producción de plantas tolerantes a *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* y una estrategia para el manejo integrado de la enfermedad.

El microinjerto permitió el acople de variedades de tomate comercialmente aceptadas por su rendimiento y características organolépticas con materiales que confieren resistencia al hongo usados como patrón sin afectar la fisiología normal de la planta, lo que demuestra que estas combinaciones son compatibles y propicias a nivel productivo del tomate.

## Agradecimientos

A los estudiantes de pregrado Manuela Robledo, Oswaldo Murillo y María Camila Zuluaga por el apoyo durante la fase de campo de la investigación. Los recursos económicos para el desarrollo de la investigación fueron proporcionados por la Vicerrectoría de Investigaciones y Posgrados de la Universidad de Caldas.

## Contribución de los autores

DJGJ: conceptualización, diseño metodológico y experimental, trabajo de campo, análisis de datos, preparación del manuscrito, gestión y administración del proyecto; NCA: conceptualización, diseño metodológico y experimental, análisis de datos, preparación del manuscrito, gestión y administración del proyecto; WRL: conceptualización, diseño metodológico y experimental, trabajo en campo, preparación del manuscrito; JCZ: conceptualización, diseño metodológico y experimental, preparación del manuscrito; SPLZ: trabajo en campo, análisis de datos, preparación del manuscrito; SBG: trabajo en campo, preparación del manuscrito.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## Referencias

- Agrios, N. (2005). Plant pathology. fifth edition. Elsevier Academic Press. 922 pp.
- Báez-Valdez, E., Carrillo-Fasio, J.A., Báez-Sañudo, M.A., García-Estrada, R.S., Valdez-Torres, J.B., Contreras-Martínez, R. (2010). Resistant rootstocks utilization for *Fusarium* control (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Snyder & Hansen race 3) in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) under shade conditions. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 28, 111-123.
- Bletsos, F.A. & Olympios, C.M. (2009). Rootstocks and grafting of tomatoes, peppers and eggplants for soil-borne disease resistance, improved yield and quality. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 2 (1), 62-73.
- Botero, V., Hoyos-Carvajal, L., Marín, J. (2018). Detección de plantas asintomáticas de *Solanum lycopersicum* L. infectadas con *Fusarium oxysporum* usando espectroscopia de reflectancia VIS. *Ciencias Hortícolas*, 12 (2), 436-446. <http://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.7293>
- Cardona-Piedrahita, L.F., Castaño-Zapata, J., Marín-Serna, S.M., González-Guzmán, J.J., García-Jaramillo, D.J., Ceballos-Aguirre, N. (2021). *In vitro* study of some components of resistance of Cherry tomatoes to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen. FITOTECNIA No. 288, pp 2.
- Carmona, S.L., Burbano-David, D., Gómez, M., López, W., Ceballos, N., Castaño-Zapata, J., Simbaqueba, J., Soto-Suárez, M. (2020). Characterization of pathogenic and nonpathogenic *Fusarium oxysporum* isolates associated with commercial tomato crops in the Andean region of Colombia. *Pathogens*, 9 (70), 23 p. <https://doi.org/10.3390/pathogens9010070>
- Castaño-Zapata, J. (2016). Principios básicos de fitoepidemiología. Segunda reimpresión. Editorial Universidad de Caldas, pp. 398.
- Ceballos, N., López, W., Orozco-Cárdenas, M., Morillo, Y., Vallejo-Cabrera, F. (2017). Use of microsatellites for evaluation of genetic diversity in cherry tomato. *Bragantia Campinas*, 76 (2), 220-228. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.116>
- Curtis, F., Palmieri, D., Vitullo, D., Lima, G. (2014). First report of *Fusarium oxysporum* f. sp. *pisi* as causal agent of root and crown rot on chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Southern Italy. *Plant Disease*, 98 (7), 995. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-13-0941-PDN>
- Di Gioia, F., Serio, F., Buttaro, D., Ayala, O., Santamaría, P. (2010). Vegetative growth, yield, and fruit quality of 'Cuore di Bue', an heirloom tomato, as influenced by rootstock. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 85 (6), 477-482. <https://doi.org/10.1080/14620316.2010.11512701>
- Djidonou, D., Simonne, A.H., Koch, K.E., Brecht, J.K., Zhao, X. (2016). Nutritional quality of field-grown tomato fruit as affected by grafting with interspecific hybrid rootstocks. *American Society of Horticultural Science*, 51 (12), 1618-1624. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11275-16>

- Fang, X., Kuo, J., You, M.P., Finnegan, P., Barbetti, M.** (2012). Comparative root colonization of strawberry cultivars Camarosa and Festival by *Fusarium oxysporum* f. sp. *fragariae*. *Plant Soil*, 358 (1-2), 75-89. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1205-8>
- FAOSTAT.** (2022). Production. Crops data. Fecha de consulta: abril de 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QI>
- Forero-Reyes, C. M., Alvarado-Fernández, A. M., Ceballos-Rojas, A. M., Gonzalez-Carmona, L. C., Linares-Linares, M. Y., Castañeda-Salazar, R., Pulido-Villamarín, A., Góngora-Medina, M. E., Cortés-Vecino, J.A., Rodríguez-Bocanegra, M. X.** (2018). Evaluación de la capacidad patogénica de *Fusarium* spp. En modelos vegetal y murino. *Revista Argentina Microbiología*, 50 (1), 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.11.009>
- Gao, H., Beckman, C.H., Mueller, W.C.** (1995). The nature of tolerance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in polygenically field-resistant Marglobe tomato plants. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 46 (5), 401-412. <https://doi.org/10.1006/pmpp.1995.1031>
- Garcés, E., Orozco, A., Zapata, A.C.** (1999). Fitopatología en flores. *Acta Biológica Colombiana*, 4 (2), 5-26.
- García-Jaramillo, D.J., Atehortúa-Garcés, L., Castaño-Zapata, J., Ceballos-Aguirre, N.** (2018). *In vitro* micropropagation of commercial and non-commercial tomato genotypes. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 54 (4), 488-488.
- Hernández-Martínez, R., López-Benítez, A., Borrego-Escalante, F., Espinoza-Velázquez, J., Sánchez-Aspeytia, D., Maldonado-Mendoza, I.E., López-Ochoa, L.A.** (2014). Razas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* en predios tomateros en San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5 (7), 1169-1178.
- Herrera, H., Hurtado, A., Ceballos, N.** (2015). Estudio técnico y económico del tomate tipo cereza elite (*Solanum lycopersicum* L. var. *cerasiforme*) bajo condiciones semicontroladas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9 (2), 290-300. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2015v9i2.4185>
- International Plant Genetic Resources Institute-IPGRI.** (1996). Descriptores para el cultivo del tomate (*Lycopersicon* spp.). IPGRI. Roma, Italia. 131p.
- Jaramillo-Noreña, J. E., Sánchez-León, G. D., Rodríguez, V. P., Aguilar-Aguilar, P. A., Zapata-Cuartas, M. A., Guzmán-Arroyave, M.** (2013). Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas. Bogotá CORPOICA, 482 pp.
- Jiménez-Fernández, D., Landa, B.B., Kang, S., Jiménez-Díaz, R.M., Navas-Cortés, J.A.** (2013). Quantitative and microscopic assessment of compatible and incompatible interactions between chickpea cultivars and *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* races. *Plos One*, 8 (4), e61360. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061360>
- Joshi, R.** (2018). A review of *Fusarium oxysporum* on its plant interaction and industrial use. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 6(3), 112-115. <https://doi.org/10.22271/plants.2018.v6.i3b.07>
- López, W. R., García-Jaramillo, D. J., Ceballos-Aguirre, N., Castaño-Zapata, J., Acuña-Zornosa, R., Jovel, J.** (2021). Transcriptional responses to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen infection in three Colombian tomato cultivars. *BMC Plant Biology*, 21 (1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03187-z>
- Mandal, S., Mallick, N., Mitra, A.** (2009). Salicylic acid-induced resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in tomato. *Plant Physiology and Biochemistry*, 47 (7), 642-649. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.03.001>
- Marín-Serna, S.M., González-Guzmán, J.J., Castaño-Zapata, J., Ceballos-Aguirre, N.** (2014). Respuesta de germoplasma de tomate tipo cereza (*Solanum* spp.) a la Marchitez vascular [*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen]. *Revista Agronomía*, 22 (2), 48-59.
- Moore, N.Y.** (1994). Fusarium wilt of banana: pathogen variability and host-pathogen interaction. Ph.D. Thesis. University of Queensland, St. Lucia, Qld. 152 pp.
- Murashige, T. & Skoog, F.** (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia plantarum*, 15 (3), 473-497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
- Pérez, L., Dita, M., Martínez, E.** (2014). Prevention and diagnostic of Fusarium wilt (Panama disease) of banana caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (TR4). Proc. Regional Workshop on the Diagnosis of Fusarium Wilt (Panama disease) caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4: Mitigating the Threat and Preventing its Spread in the Caribbean, St. Augustine, Trinidad and Tobago. FAO, Rome, Italy. 74 pp.

- Ravindra, S., Biswas, S.K., Nagar, D., Singh, J., Singh, M., Mishra, Y.** (2015). Sustainable integrated approach for management of *Fusarium* wilt of tomato caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.). Sander & Hansen. *Sustainable Agricultural Research*, 4 (1), 138-147. <https://doi.org/10.5539/sar.v4n1p138>
- Rouphael, Y., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E.** (2010). Yield, mineral composition, water relations, and water use efficiency of grafted mini-watermelon plants under deficit irrigation. *Horticultural Science*, 43 (3), 730-736. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.730>
- SAKATA**® (2022). El éxito comienza por la raíz. Fecha de consulta: julio 18 de 2022. Disponible en: <https://www.sakata.com.br/blog/es/2022/07/18/el-exito-comienza-por-la-raiz/>
- SAS Institute Inc.** (2013) Statistical analysis system user's guide. Version 9.4. Cary, Statistical Analysis System Institute. 513p.
- Singh, V.K., Singh, H.B., Upadhyay, R.S.** (2017). Role of fusaric acid in the development of 'Fusarium wilt' symptoms in tomato: physiological, biochemical and proteomic perspectives. *Plant Physiology and Biochemistry*, 118, 320-332. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.06.028>
- Srinivas, C., Nirmala, D., Narasimha, D., Murthy, K., Dhananjaya, C., Lakshmeesha, T.R., Singh, B., Kumar, N., Niranjana, S.R., Hashem, A., Alqarawi, A., Tabassum, Fathi, E., Nayaka, C., Srivastava, R.** (2019). *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* causal agent of vascular wilt disease of tomato: Biology to diversity– A review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26 (7), 1315-1324. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.06.002>
- Steinkellner, S., Mammerler, R., Vierheilig, H.** (2008). Germination of *Fusarium oxysporum* in root exudates from tomato plants challenged with different *Fusarium oxysporum* strains. *European Journal of Plant Pathology*, 122 (3), 395-401. <https://doi.org/10.1007/s10658-008-9306-1>
- Tampoare, G.B., Adazabra, A.N., Milliar, G.** (2013). Analyzing the economic benefit of fresh tomato production at the Tono irrigation scheme in upper east region of Ghana. *Elixir Agriculture*, 58, 14613-14617.
- Tessier, B.J., Mueller, W.C., Morgham, A.T.** (1990). Histopathology and ultrastructure of vascular responses in peas resistant or susceptible to *Fusarium oxysporum* f. sp. *pisi*. *Phytopathology*, 80, 756-764. <https://doi.org/10.1094/Phyto-80-756>
- Trionfetti, P., Colla, G., Granati, E., Temperini, O., Crinó, P., Saccardo, F.** (2002). Rootstock resistance to fusarium wilt and effect on fruit yield and quality of two muskmelon cultivars. *Scientia Horticulturae*, 93 (3-4), 281-288. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00335-1](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00335-1)
- Velasco-Alvarado, M.D.J., Castro-Brindis, R., Castillo-González, A.M., Avitia-García, E., Sahagún-Castellanos, J., Lobato-Ortiz, J.S.R.** (2016). Mineral composition, biomass and fruit yield in grafted tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Interciencia*, 41 (10), 703-708.
- Zvirin, T., Herman, R., Brotman, Y., Denisov, Y., Belausov, E., Freeman, S., Perl-treves, R.** (2010). Differential colonization and defense responses of resistant and susceptible melon lines infected by *Fusarium oxysporum* race 1.2. *Plant Pathology*, 59, 576-585. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02225.x>

Artículo original

## Diversidad taxonómica y patrones de diversidad de la flora en humedales de la costa peruana

### Taxonomic diversity and patterns of flora diversity in coastal wetlands of Perú

● Sergio González<sup>1,2,\*</sup>, ● Héctor Aponte<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Veterinarias y Biológicas, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

<sup>2</sup>Coastal Ecosystems of Perú Research Group, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

#### Resumen

En los últimos años el interés por estudiar los humedales ha ido en aumento. A pesar de ello, los impactos en estos ecosistemas han persistido, lo que desemboca en el deterioro de los servicios ecosistémicos que proveen. Una forma complementaria de analizar su diversidad es mediante los índices de diversidad taxonómica, los cuales constituyen medidas valiosas para su comprensión y conservación. Con el objetivo de evaluar la diversidad taxonómica de la flora vascular a partir de los índices  $\Delta^+$  y  $\Lambda^+$  y algunos patrones de diversidad relacionados con el recambio de especies en los humedales costeros del Perú, se analizó la información existente sobre 109 especies de plantas vasculares distribuidas en ocho humedales de esa región. Los humedales de Santa Rosa, Pantanos de Villa y Carquín presentaron los valores más altos de  $\Delta^+$ , lo que exige un esfuerzo para su conservación con el fin de proteger la diversidad filogenética que albergan. La riqueza evidenció su correlación con el  $\Delta^+$  ( $r=0,931$ ;  $p<0,05$ ) y con el  $\Lambda^+$  ( $r=-0,878$ ;  $p<0,05$ ), y se obtuvo un modelo lineal confiable del  $\Delta^+$  en función de la riqueza ( $R^2=0,86$ ), cuyo uso permitiría simplificar el cálculo de la diversidad taxonómica de las plantas vasculares de esta región. No se encontraron diferencias de los valores del  $\Delta^+$  entre los humedales protegidos y los no protegidos ( $t=0,96$ ;  $p>0,05$ ), y no se halló correlación entre la distancia de un humedal a otro y la diversidad beta ( $p>0,05$ ). Dichos resultados evidencian la necesidad de proponer medidas para proteger estos humedales, estableciendo un corredor costero que incluya aquellos no protegidos en la actualidad.

**Palabras clave:** Conservación; Distancia taxonómica; Diversidad; Flora; Humedales costeros.

#### Abstract

In recent years, interest in studying wetlands has been increasing but the impacts on these ecosystems have persisted with the subsequent deterioration of the ecosystem services they provide. One way of analyzing their diversity is through taxonomic diversity indices which provide valuable measures for their understanding and conservation. To evaluate the taxonomic diversity of the vascular flora using the  $\Delta^+$  and  $\Lambda^+$  indices, as well as some of their diversity patterns related to the exchange of species in the coastal wetlands of Perú, we analyzed the existing data on 109 species of vascular plants distributed in eight coastal wetlands in this region. The Santa Rosa, Pantanos de Villa, and Carquín wetlands presented the highest  $\Delta^+$  values suggesting the need for their conservation to protect the phylogenetic diversity in the harbor. Richness was correlated to the  $\Delta^+$  ( $r = 0.931$ ;  $p < 0.05$ ) and  $\Lambda^+$  ( $r = -0.878$ ;  $p < 0.05$ ) indices and a reliable linear model of  $\Delta^+$  was obtained as a function of richness ( $R^2 = 0.86$ ) whose use would simplify the calculation of taxonomic diversity of vascular plants in this region. No differences were found for  $\Delta^+$  values between protected and unprotected wetlands ( $t = 0.96$ ;  $p > 0.05$ ) and no correlation between the distance from wetland to wetland and the beta diversity ( $p > 0.05$ ). Additionally, our results suggest the importance of adopting measures to protect these wetlands establishing them as a coastal corridor including currently unprotected wetlands.

**Keywords:** Conservation; Taxonomic distinctness; Diversity; Flora; Coastal wetlands.

**Citación:** González S, Aponte H. Diversidad taxonómica y patrones de diversidad de la flora en humedales de la costa peruana. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):730-741, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1696>

**Editor:** Elizabeth Castañeda

**\*Correspondencia:**

Héctor Aponte;  
[haponte@cientifica.edu.pe](mailto:haponte@cientifica.edu.pe)

**Recibido:** 31 de mayo de 2022

**Aceptado:** 2 de septiembre de 2022

**Publicado en línea:** 14 de septiembre de 2022



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

## Introducción

Los humedales son áreas que se caracterizan por el nivel freático próximo o por encima de la superficie, con un comportamiento estacional o permanente (**Salimi et al.**, 2021). En los últimos años se ha evidenciado el interés en estos ecosistemas, lo que se evidencia en el número de grupos de investigación que se dedican a estudiarlos y la variedad de temas investigados (**Aponte**, 2022; **Rivera et al.**, 2021; **Salazar-Navarro et al.**, 2020). Pese a ello, los humedales están a merced de impactos como los incendios y la contaminación por metales pesados, los cuales repercuten sobre la calidad del ecosistema y los servicios ecosistémicos que proveen (**Dang et al.**, 2021; **Zhao et al.**, 2021).

Los humedales costeros de Perú se caracterizan por presentar una amplia diversidad de aves (**Quiñonez & Hernández**, 2017), mamíferos (**Pacheco et al.**, 2020), plantas vasculares (**Aponte & Cano**, 2013) e invertebrados (**Castillo-Velásquez & Huamantincó-Araujo**, 2020; **Castillo-Velásquez et al.**, 2021). La urbanización, la disposición del desmonte, la introducción de especies invasoras y la ganadería, todas fruto de la influencia humana en estos ecosistemas, son actividades que podrían repercutir sobre la diversidad de especies (**Aponte et al.**, 2020).

Algunos patrones de diversidad de las plantas vasculares de la costa de Lima se han evaluado y se ha encontrado que alrededor del 50 % de las especies presentes en los humedales corresponde a especies invasoras o potencialmente invasoras, las cuales han llegado a ellos como fruto de las actividades humanas (**Aponte & Cano**, 2013). El tamaño de los humedales parece no influir en la riqueza vegetal que albergan, pues se han encontrado humedales grandes y pequeños con una gran riqueza por unidad de área; por ejemplo, Los Pantanos de Villa tiene más de 270 hectáreas y 72 especies (0,26 especies/hectárea) y el humedal de Carquín-Hualmay, con 11 hectáreas, registra 41 especies (3,72 especies/hectárea) (**Aponte & Cano**, 2018; **Ramírez & Cano**, 2010). El análisis de la diversidad beta espacial a partir de índices de similitud e índices beta indica un alto recambio entre las localidades, lo que evidencia la gran complementariedad entre estos ecosistemas (**Aponte**, 2017; **Aponte & Ramírez**, 2014; **Arana & Salinas**, 2003; **Gonzales et al.**, 2019; **La Torre & Aponte**, 2009), así como la necesidad de protegerlos como corredor costero.

A pesar de que se ha podido determinar la riqueza, la diversidad alfa y la diversidad beta de la flora vascular en algunos de estos humedales, esta aproximación tiene limitaciones; por ejemplo, en dichas evaluaciones se consideran todas las especies por igual, obviando aspectos evolutivos importantes para la interpretación de la diversidad (**Lean & Maclaurin**, 2016). Una evaluación complementaria a partir de aspectos filogenéticos permitiría abarcar más características del subconjunto de taxones, por ejemplo, taxonómicas y de historia. Los índices de diversidad taxonómica utilizan las relaciones entre especies, lo que representa información evolutiva (**Faith**, 1992; **García-de Jesús et al.**, 2016). La diversidad taxonómica es mayor en las comunidades, con una considerable cantidad de especies distantes en la clasificación taxonómica frente a otras comunidades en las que la relación es más cercana (**Clarke & Warwick**, 1998). Las medidas de distancia taxonómica tienen importancia en la evaluación de los cambios espaciales y ambientales de la diversidad (**Warwick & Clarke**, 1998), y sirven de indicador para los procesos evolutivos que ocurren en estas áreas (**Forest et al.**, 2007). Estos índices son independientes del esfuerzo de muestreo y del entorno, y se calculan haciendo uso de los datos de ausencia o presencia, lo que implica una ventaja frente a aquellos estudios con diferentes esfuerzos de muestreo, ya que pueden compararse entre sí (**Clarke & Warwick**, 2001; **Schweiger et al.**, 2008). Dicha ventaja hace de este un método ideal para los humedales de la costa central del Perú, ya que se han evaluado en momentos diferentes y con esfuerzos de muestreo que difieren (por ejemplo, en **Aponte & Cano**, 2018, y en **Arana & Salinas**, 2003).

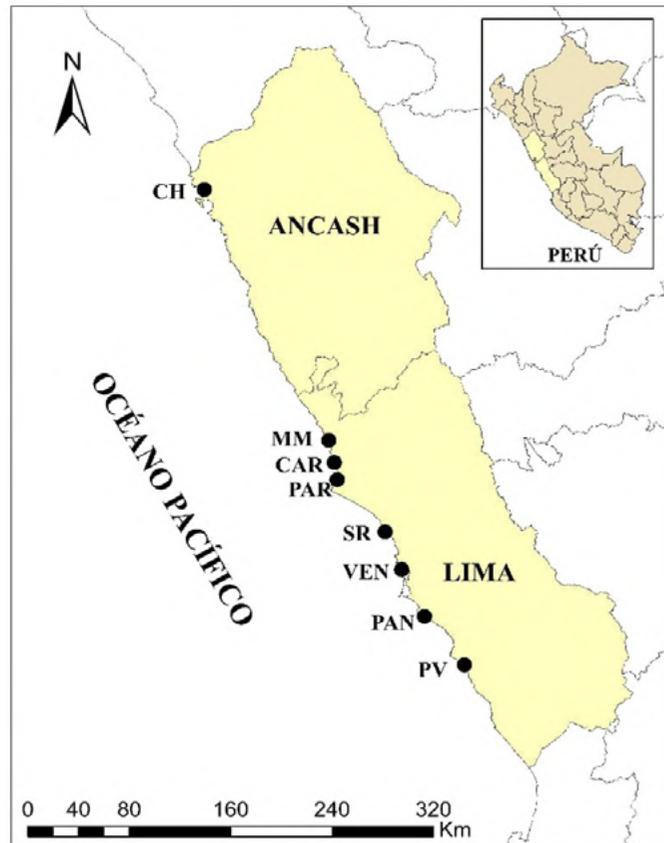
En este contexto, el presente estudio abordó la evaluación de la diversidad taxonómica (índices  $\Delta^+$  y  $\Lambda^+$ ) comparando los valores para ver si variaban en función del nivel de protección de los humedales. Asimismo, se propone un modelo matemático de la riqueza y la diversidad taxonómica que pueda servir para un cálculo rápido de la diversidad filogenética

de las plantas vasculares de esta región. Por último, se estudió el recambio espacial de las plantas vasculares en la costa central del Perú para establecer si existía alguna relación entre la diversidad beta y la distancia entre humedales.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

Los humedales costeros del Perú se ubican en el desierto árido del Pacífico sur. En este estudio se analizó la flora vascular de ocho humedales costeros ubicados en la región central del país: los humedales de Puerto Viejo (PV; coordenadas: 12°34'16,77"S - 76°42'35,36"O), Pantanos de Villa (PAN; coordenadas 12°12'39,9"S - 76°59'20,56"O), Ventanilla (VEN; coordenadas 11°52'35,6"S - 77°09'01,92"O), Santa Rosa (SR; coordenadas 11°35'45,93"S - 77°15'58,10"O), Paraíso (PAR; coordenadas 11°12'04,91"S - 77°35'22,57"O), Carquín (CAR; coordenadas 11°06'06,62"S - 77°36'50,01"O), Medio Mundo (MM; coordenadas 10°58'05,15"S - 77°39'23,99"O) y Chimbote (CH; coordenadas 09°05'51"S; 78°32'52"O) (**Figura 1**). Se eligieron por tener todos ellos estudios previos de su flora vascular. No se conocen estudios científicos sobre flora vascular de otros humedales costeros de la misma región. Estas localidades se encuentran entre los 0 y los 22 metros sobre el nivel del mar a lo largo de la franja desértica del Pacífico central; en general, el agua que los nutre proviene de afloramientos, fuentes subterráneas y canales de conducción de aguas de los asentamientos humanos. Estos humedales se componen generalmente de un cuerpo de agua principal rodeado por juncales con dominancia de



**Figura 1.** Ubicación de los humedales de la costa central del Perú. CH: humedales de Chimbote; MM: albufera de Medio Mundo; CAR: humedal de Carquín; PAR: laguna El Paraíso; SR: humedal Santa Rosa; VEN: humedales de Ventanilla; PAN: Pantanos de Villa; PV: humedales de Puerto Viejo

*Schoenoplectus americanus*; totorales con predominio de *Typha domingensis*; salicorniales dominados por *Salicornia neei*, y gramadales dominados por *Distichlis spicata* y *Sporobolus* spp. Se caracterizan, además, por la presencia de asentamientos humanos en sus inmediaciones (Aponte *et al.*, 2020); la distancia entre ellos es variable, siendo la mínima de 12,6 km (entre CAR y PAR) y la mayor de 430 km (entre CH y PV); para revisar otros detalles de las localidades, pueden consultarse los artículos citados en la **tabla 1**, la **figura 1** y el **material suplementario 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1696/3282>.

**Tabla 1.** Humedales evaluados en el presente trabajo con su respectiva clasificación de protección y especies reportadas

Humedal	Estado de conservación	Número de especies encontradas	Referencia
Los pantanos de Villa	Área Natural Protegida	47	Ramírez & Cano (2010)
Puerto Viejo	Ninguno	32	La Torre & Aponte (2009)
Medio Mundo	Área de conservación regional	21	Aponte & Cano (2013)
Laguna El Paraíso	Ninguno	40	Aponte & Cano (2013)
Ventanilla	Área de conservación regional	20	Aponte & Ramírez (2014)
Carquín	Ninguno	41	Aponte & Cano (2018)
Santa Rosa	Ninguno	57	Gonzales <i>et al.</i> (2019)
Chimbote	Ninguno	41	Arana & Salinas (2003)

### Preparación de los datos

Se recopilaron las listas de las plantas vasculares utilizando los estudios más recientes en cada localidad (**Tabla 1**). En los ocho humedales se han registrado un total de 109 especies pertenecientes a 94 géneros, 34 familias, 19 órdenes y 3 subclases (Magnoliidae, 107 especies; Equisetidae, 1 especie; Polypodiidae, 1 especie) (**Tablas S1 y S2**, ).

La taxonomía de las plantas fue actualizada a partir de la plataforma Trópicos ([www.trópicos.org](http://www.trópicos.org)) para evitar sinónimos. Con los datos obtenidos se hicieron dos matrices: una sobre presencia o ausencia de las especies por localidad, y otra en la que se clasificaron las especies por clase, subclase, orden, familia, género y especie siguiendo las actualizaciones utilizadas en dichas bases de datos, las cuales se basan en el artículo del **The Angiorperm Phylogeny Group** (2009; 2016) y en el de **Chase & Reveal** (2009); el ranking taxo-nómico utilizado puede apreciarse en el **material suplementario 1 y en la Tabla S2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1696/3282>.

### Cálculo de la diversidad taxonómica

Se calcularon dos índices de diversidad taxonómica: la distancia taxonómica promedio ( $\Delta^+$ ) y la variación de la distancia taxonómica ( $\Lambda^+$ ) en los ocho humedales evaluados. La  $\Delta^+$  mide la longitud de trayectoria promedio entre todos los pares de especies dentro de la clasificación taxonómica, en tanto que la  $\Lambda^+$  refleja la desigualdad del árbol taxonómico para una comunidad dada (ecuaciones 1 y 2):

$$\Delta^+ = \frac{\sum_{i < j} \omega_{ij}}{[S(S - 1)/2]} \dots \dots \dots (1)$$

$$\Lambda^+ = \frac{\sum_{i < j} (\omega_{ij} - \bar{\omega})^2}{S(S-1)/2} \dots \dots \dots (2),$$

donde S es el número de especies y  $\omega_{ij}$  es la distancia que adhiere a las especies i y j en el árbol taxonómico jerárquico (número de niveles taxonómicos superiores que separan a dos especies hasta que se llegan a unir en un mismo punto: clase, subclase, orden, familia y género). Esta distancia ( $\omega_{ij}$ ) recibió un valor de manera que su proporción con respecto a los valores asignados a cada nivel taxonómico sumara 100 (Clarke & Warwick, 1999; 1998). Asimismo, se hicieron gráficos de embudo de confianza para  $\Delta^+$  y  $\Lambda^+$  en los cuales las líneas de los extremos indican los límites dentro de los cuales se encuentran el 95 % de los valores simulados de ambos índices, en tanto que las líneas centrales indican los valores medios (Iglukowska & Namiotko, 2010). Ambos índices y gráficos se obtuvieron con el programa PRIMER, versión 6 (Clarke & Gorley, 2006).

Por último, se compararon los valores de  $\Delta^+$  de los humedales protegidos y los no protegidos, para lo cual se verificó la normalidad ( $p > 0,05$  en la prueba de Shapiro Wilk) y se hizo la prueba de t de Student.

### ***Correlación y modelamiento de la correlación entre la riqueza y la diversidad taxonómica***

Con la finalidad de evaluar la correlación entre la diversidad taxonómica y la riqueza, se empleó la prueba de correlación de Pearson utilizando los valores de los índices taxonómicos obtenidos y la riqueza de la flora de cada humedal evaluado después de verificar la normalidad ( $p > 0,05$  en la prueba de Shapiro Wilk).

Asimismo, para modelar la diversidad taxonómica a partir de los datos de riqueza, se hizo una regresión lineal entre los índices  $\Delta^+$  y  $\Lambda^+$  (por separado) en función de la riqueza. Este modelo fue elegido por tener pocas variables (solo la pendiente y un intercepto), lo que facilita su análisis y comprensión. La confiabilidad del modelo se calculó con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para lo que se utilizó el programa PAST 4.05 (Hammer *et al.*, 2001).

### ***Evaluación de la similitud y recambio espacial***

La similitud de la flora entre los humedales de la región se evaluó mediante el índice de Jaccard ( $I_j$ ) (3):

$$I_j = \frac{C}{C + NC} \dots \dots \dots (3),$$

donde C es el número de especies comunes entre dos localidades y NC el número de especies no comunes.

Para evaluar la correlación entre la diversidad beta (recambio espacial) y la distancia geográfica entre humedales se utilizó la prueba de Spearman. Para ello se calculó primero el recambio de especies entre cada par de humedales utilizando el índice de Whitaker (4) (Koleff *et al.*, 2003):

$$\beta_w = \frac{S}{\alpha} - 1 \dots \dots \dots (4),$$

donde S es el valor de la riqueza y  $\alpha$  el número promedio de especies de todos los humedales evaluados.

Una vez determinado el recambio, se procedió a hallar las distancias espaciales entre los humedales utilizando Google Earth. Con este conjunto de datos se realizaron las pruebas de correlación.

## **Resultados**

### ***Diversidad taxonómica***

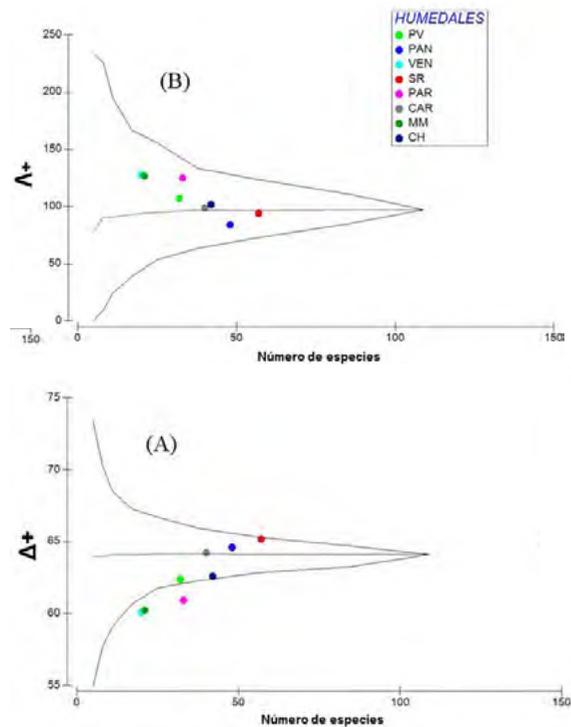
Los valores más altos de  $\Delta^+$  se encontraron en los humedales SR, PAN y CAR y de  $\Lambda^+$ , en los humedales de VEN, MM y PAR (Tabla 2). En la figura 2A se puede observar que la flora de los humedales PAR, MM y VEN estuvo por debajo del intervalo de confianza, lo cual implicaría que las especies en dichos humedales son filogenéticamente distintas de las de los otros. Los valores de  $\Lambda^+$  en todos los humedales costeros estuvieron dentro

del intervalo de confianza (**Figura 2B**). Por otro lado, los valores de  $\Delta^+$  de los humedales con algún grado de protección y aquellos sin protección no presentaron diferencia alguna ( $t=0.96$ ;  $p>0,05$ ).

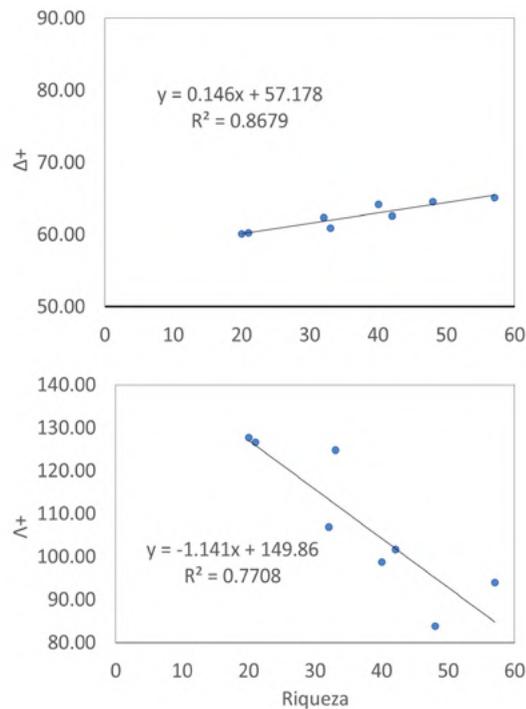
Los análisis de correlación indicaron que la riqueza de especies se relacionó positivamente con el  $\Delta^+$  ( $r=0,931$ ;  $p<0,05$ ) y negativamente con el  $\Lambda^+$  ( $r=-0,878$ ;  $p<0,05$ ). La **figura 3** muestra los modelos obtenidos mediante la regresión lineal; en ambos casos, los modelos fueron confiables ( $R^2>0,75$  para la relación con  $\Lambda^+$ ), aunque el modelo de  $\Delta^+$  en función del número de especies lo fue más ( $R^2=0,86$ ).

**Tabla 2.** Valores de  $\Delta^+$  y  $\Lambda^+$  para los humedales del presente estudio: PV: humedales de Puerto Viejo; PAN: pantanos de Villa; VEN: humedales de Ventanilla; SR: humedal Santa Rosa; PAR: laguna El Paraíso; CAR: humedal de Carquín; MM: albufera de Medio Mundo; CH: humedales de Chimbote

Humedales	$\Delta^+$	$\Lambda^+$
PV	62,37	106,95
PAN	64,60	83,88
VEN	60,09	127,77
SR	65,17	94,02
PAR	60,92	124,82
CAR	64,23	98,77
MM	60,24	126,66
CH	62,58	101,72



**Figura 2.** Gráficos de embudo de (A) distancia taxonómica promedio ( $\Delta^+$ ) y (B) variación en la distancia taxonómica ( $\Lambda^+$ ) versus el número de especies de cada uno de los humedales costeros del Perú: PV: humedales de Puerto Viejo; PAN: pantanos de Villa; VEN: humedales de Ventanilla; SR: humedal Santa Rosa; PAR: laguna El Paraíso; CAR: humedal de Carquín; MM: albufera de Medio Mundo; CH: humedales de Chimbote



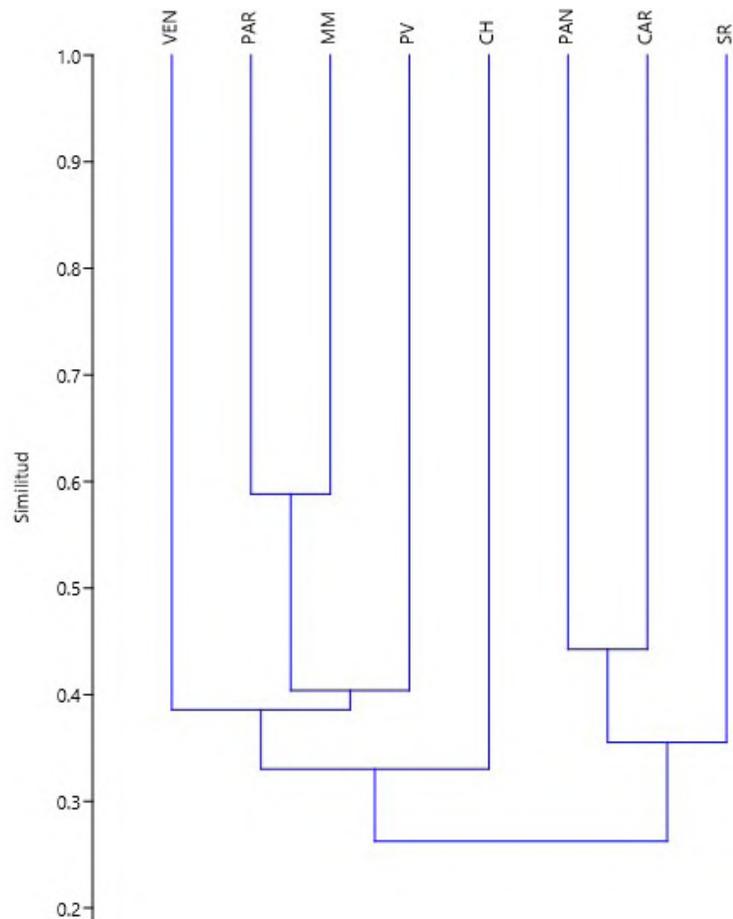
**Figura 3.** Relaciones entre los valores de la distancia taxonómica promedio ( $\Delta^+$ ) y la variación de la distancia taxonómica ( $\Lambda^+$ ) con la riqueza de especies de los humedales de la costa central del Perú. Se incluye la ecuación fruto de la regresión lineal.

### *Similitud y recambio*

La comparación entre la flora de los humedales mostró una baja similitud ( $I_j = 0,48$  en promedio), lo que se interpretó como un recambio alto entre localidades, con excepciones como las registradas entre MM y PAR y MM y VEN ( $I_j=0,74$  e  $I_j=0,63$ , respectivamente). La menor similitud se registró entre los humedales SR y MM y SR y VEN ( $I_j=0,26$  y  $I_j=0,29$ , respectivamente) (**Figura 4**). Por último, no se encontró correlación entre la distancia de los humedales y la diversidad beta ( $\rho=-0,18$ ;  $p>0,05$ ).

### **Discusión**

Según **Clarke & Warwick** (1998), la diversidad taxonómica no tiene una relación dependiente de la riqueza de especies, patrón que se ha encontrado en escarabajos (Scarabaeoidea) (**García-de Jesús et al.**, 2016), macrófitas lacustres (**Alahuhta et al.**, 2017) y crustáceos decápodos (**Germán- Gómez**, 2020); pese a ello, nuestro estudio evidenció un patrón contrario: la flora de estos humedales se correlaciona con la diversidad taxonómica, lo que sugiere que conforme aumentan las especies de plantas vasculares en los humedales, aumenta la complejidad de su estructura filogenética. Cerca del 50 % de estas especies se considera invasor o invasor potencial (**Aponte & Cano**, 2013), por lo que es probable que el ser humano esté modelando la evolución de la estructura florística y filogenética de los humedales en esta zona, y que las nuevas especies estén apareciendo debido a la intervención humana. Esta observación está respaldada por reportes recientes; por ejemplo, en el último censo de flora realizado en el humedal SR, se encontró que el 55 % de las nuevas especies reportadas era invasor potencial (**Gonzales et al.**, 2019), a lo que se suman las observaciones de nuevas especies en otros taxones de la misma región (**Aponte**, 2022). Es importante hacer un seguimiento temporal y una actualización florística de los otros humedales costeros para verificar si sucede lo mismo en las otras localidades y confirmar así la hipótesis propuesta.



**Figura 4.** Dendrograma de similitud entre ocho humedales de la costa central del Perú. Coeficiente cofenético=0,7887. PV: humedales de Puerto Viejo; PAN: pantanos de Villa; VEN: humedales de Ventanilla; SR: humedal Santa Rosa; PAR: laguna El Paraíso; CAR: humedal de Carquín; MM: albufera de Medio Mundo; CH: humedales de Chimbote

En la mayoría de los humedales analizados en este estudio (con excepción de Chimbote) se han determinado múltiples impulsores de cambio (Aponte *et al.*, 2020) que podrían incidir sobre la flora, ya sea reduciendo su diversidad florística (por ejemplo, mediante los incendios) o aumentándola (mediante la introducción de especies). En cuanto a la diversidad taxonómica, Clarke & Warwick (1998) no encontraron una relación entre esta y la perturbación antropogénica. Casos como los de CAR y SR (humedales sin ningún tipo de protección), que presentaron altos valores de  $\Delta^+$ , pueden ser indicativos de la necesidad de evaluar la diversidad taxonómica en función del impacto que presenta cada uno de los humedales, verificando si los que se degradan registran una mayor o menor diversidad taxonómica.

Las características filogenéticas de las especies que difieren en la clasificación taxonómica contribuyen a que los valores de diversidad taxonómica calculados sean mayores (Faith, 1992; Polasky *et al.*, 2001). Los resultados obtenidos permiten sugerir que deben protegerse prioritariamente los humedales que albergan la mayor variabilidad, es decir, el SR, el CAR y el PAN, los cuales registraron los valores más altos; debe anotarse que el PAN ya cuenta con el grado de protección necesario. Estos humedales presentan una flora con una mayor historia evolutiva y, por ende, poseen una composición florística filogenéticamente más diversa y con mayor capacidad de adaptarse al cambio climático y a otros problemas ambientales (Faith, 1992; Forest *et al.*, 2007; Lean & Maclaurin, 2016;

**Mace et al.**, 2003). Es importante mencionar que una de las limitaciones de este estudio es que las especies introducidas o invasoras se analizaron conjuntamente con las demás y, por ello, los índices estimados incluyeron dicho efecto. La cercanía de estos humedales a la urbe y las actividades humanas (**Aponte & Cano**, 2013) es propia de su historia como ecosistemas; sin embargo, se habrían obtenido resultados distintos si se hubieran analizado las especies introducidas por separado.

En estudios previos se ha propuesto que estos ecosistemas tienen un potencial de especies todavía no registradas, ya sea por su recambio temporal o porque algunos humedales aún no se han evaluado (**Aponte & Apeño**, 2019), lo que significa que el valor de la distancia taxonómica podría cambiar temporalmente. Puede ser que el valor de  $\Delta^+$  se incremente con los muestreos, ya que estos ecosistemas albergan flora monoespecífica, es decir, cada especie nueva reportada en la región podría representar géneros o familias nuevos. Por ejemplo, la última evaluación del humedal Santa Rosa reportó 12 nuevos registros para la región que significaron dos familias y dos géneros no registrados antes en este espacio geográfico (**Gonzales et al.**, 2019). Esta situación debe incentivar el planteamiento de estudios que permitan conocer el recambio temporal de las especies y el papel de las plantas invasoras en él.

Por otra parte, los modelos lineales obtenidos podrían facilitar el cálculo de los índices de diversidad taxonómica y arrojar resultados rápidos solo conociendo la riqueza de los humedales de la región, lo que permitiría tener rápidamente una perspectiva complementaria. Dicha ecuación es apropiada para los ecosistemas evaluados, pero sería importante verificar si estos patrones persisten en otras regiones a lo largo del tiempo para poder seguir empleándola.

En este estudio se agregó el humedal CH a las evaluaciones espaciales realizadas en los últimos años (**Aponte & Cano**, 2018, 2013); pese a ello, la interpretación de la diversidad beta no ha variado, es decir, en estos ecosistemas hay una alta complementariedad. Asimismo, al no hallarse correlación entre la distancia entre los humedales y la diversidad beta, las medidas de conservación clásicas no podrían emplearse atendiendo a este criterio de distancia (conservar humedales alejados), sino que se podrían conservar también aquellos cercanos entre sí; además, debería considerarse la agrupación de todos ellos en un sistema interconectado (un corredor), ya que, a pesar de su cercanía, hay un alto recambio. En Perú existe un sistema que se puede extrapolar al caso de los humedales, se trata de la Reserva Nacional del Sistema de Islas, Islotes y Puntas Guaneras, que ha demostrado su eficiencia para la conservación de la biodiversidad, como lo demuestra el caso de los cangrejos decápodos (**Germán-Gómez et al.**, 2020).

A pesar de que el número de los humedales registrados en la costa suramericana es considerable (puede revisarse un mapa en el Atlas de humedales costeros de Pacífico disponible en [www.humedalescosteros.org](http://www.humedalescosteros.org)), no todos cuentan con estudios sobre su flora vascular; por ello nos unimos a otros autores (**Gómez-Sánchez et al.**, 2022) para sugerir que se hagan inventarios florísticos donde corresponda, así como evaluaciones complementarias sobre la de diversidad taxonómica para estudiarla a una mayor escala, por ejemplo, a nivel de la costa del Pacífico sur, el cual constituye un corredor biológico interconectado.

## Conclusiones

Los humedales de Santa Rosa, Pantanos de Villa y Carquín presentaron los valores más altos de diversidad filogenética ( $\Delta^+$ ), lo que requeriría su conservación para protegerla. La comparación de la flora de los humedales evidenció una baja similitud, lo que se interpreta como señal de un recambio alto entre estas localidades (alta diversidad beta en la región). Por último, no se encontró correlación de la distancia entre humedales con la diversidad beta.

Estos resultados deben tomarse en consideración para proponer áreas de conservación a lo largo del corredor donde se ubican e incentivar evaluaciones complementarias en otros humedales de la costa suramericana.

## Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/1696/3282>

## Agradecimientos

A Arianne Germán-Gómez por su apoyo durante el procesamiento de datos.

## Contribución de los autores

SG: concepción del estudio, procesamiento de los datos y redacción del manuscrito; HA: concepción del estudio y redacción del manuscrito.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias

- Alahuhta, J., Toivanen, M., Hjort, J., Ecke, F., Johnson, L.B., Sass, L., Heino, J.** (2017). Species richness and taxonomic distinctness of lake macrophytes along environmental gradients in two continents. *Freshwater Biology*, 62 (7), 1194-1206. <https://doi.org/10.1111/fwb.12936>
- Aponte, H.** (2017). Diversidad beta en los humedales costeros de Lima, Perú: Estimación con índices de presencia/ausencia y sus implicancias en conservación. *Biologist (Lima)*, 15 (1), 9-14.
- Aponte, H.** (2022). Nuevos reportes en los humedales de la costa central del Perú: Comentarios sobre el trabajo de Castillo-Velásquez, *et al.*, 2021. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46 (178), 287-288. <https://doi.org/10.18257/racefyn.1568>
- Aponte, H., Apeño, A.** (2019). Riqueza de flora vascular de los humedales costeros de Lima: una aproximación utilizando estimadores no paramétricos. *Arnaldoa*, 26 (1), 131-138. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.261.26107>
- Aponte, H., Cano, A.** (2013). Estudio florístico comparativo de seis humedales de la costa central del Perú: actualización y nuevos retos para su conservación. *Revista Latinoamericana de Conservación*, 3 (2), 15-27.
- Aponte, H., Cano, A.** (2018). Flora vascular del Humedal de Carquín—Hualmay, Huaura (Lima, Perú). *Ecología Aplicada*, 17 (1), 69-76. <https://doi.org/10.21704/rea.v17i1.1175>
- Aponte, H., Gonzáles, S., Gómez, A.** (2020). Impulsores de cambio en los humedales de América Latina: el caso de los humedales costeros de Lima. *South Sustainability*, 1 (2), e023 (1-5). <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-023>
- Aponte, H., Ramírez, W.** (2014). Riqueza florística y estado de conservación del área de conservación regional humedales De Ventanilla, Callao, Perú. *The Biologist*, 12 (2), 283-295. <https://doi.org/10.24039/rb2014122356>
- Arana, C., Salinas, L.** (2003). Flora vascular de los Humedales de Chimbote, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 10 (2), 221-224.
- Castillo-Velásquez, R.M., Huamantínco-Araujo, A.A.** (2020). Spatial variation of the aquatic macroinvertebrates community in the littoral zone of the Santa Rosa Coastal Wetland, Lima, Peru. *Revista de Biología Tropical*, 68 (1), 50-68. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.35233>
- Castillo-Velásquez, R.M., Alvarado-García, E.W., Laurent-Ríos, A.R., Huamantínco-Araujo, A.A.** (2021). Dípteros acuáticos de dos humedales de la costa central de Perú y obtención de adultos a partir de pupas en el laboratorio. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45 (176), 795-805. <https://doi.org/10.18257/racefyn.1350>
- Chase, M.W., Reveal, J.L.** (2009). A phylogenetic classification of the land plants to accompany APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161 (2), 122-127. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2009.01002.x>
- Clarke, K.R., Gorley, R.** (2006). *PRIMER v6: User manual/tutorial*. <https://www.primer-e.com/>
- Clarke, K.R., Warwick, R.M.** (1998). A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology*, 35 (4), 523-531. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.1998.3540523.x>
- Clarke, K.R., Warwick, R.M.** (2001). *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation* (2a ed.). PRIMER-E Limited. Plymouth. 176pp.

- Dang, A.T.N., Kumar, L., Reid, M., Mutanga, O.** (2021). Fire danger assessment using geospatial modelling in Mekong delta, Vietnam: Effects on wetland resources. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 100456. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100456>
- Faith, D.P.** (1992). Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation*, 61 (1), 1-10. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(92\)91201-3](https://doi.org/10.1016/0006-3207(92)91201-3)
- Forest, F., Grenyer, R., Rouget, M., Davies, T.J., Cowling, R.M., Faith, D.P., Balmford, A., Manning, J.C., Procheş, Ş., van der Bank, M., Reeves, G., Hedderston, T.A.J., Savolainen, V.** (2007). Preserving the evolutionary potential of floras in biodiversity hotspots. *Nature*, 445 (7129), 757-760. <https://doi.org/10.1038/nature05587>
- García-de Jesús, S., Moreno, C.E., Morón, M.Á., Castellanos, I., Pavón, N.P.** (2016). Integrando la estructura taxonómica en el análisis de la diversidad alfa y beta de los escarabajos Melolonthidae en la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87 (3), 1033-1044. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.003>
- Germán-Gómez, A.M.** (2020). *Evaluación de los índices de diversidad taxonómica y estado de conservación de las especies de decápodos (Crustacea) marino costeros del Perú*. Tesis de Biólogo, Universidad Científica del Sur. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/1115>
- Germán-Gómez, A.M., Aponte, H., Moscoso-Villacorta, V.** (2020). Decápodos (Crustacea) marino-costeros del Perú: Efectividad de las ANP y retos para su protección. *South Sustainability*, 1 (2), e024-e024. <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-024>
- Gómez-Sánchez, R., Cuba, D., Aponte, H.** (2022). Sobre la necesidad de descentralización y diversificación de la investigación en humedales costeros peruanos. *The Biologist (Lima)*, 20 (1), Article 1. <https://doi.org/10.24039/rb20222011311>
- Gonzales, S., Aponte, H., Cano, A.** (2019). Actualización de la flora vascular del humedal Santa Rosa—Chancay (Lima, Perú). *Arnaldoa*, 26 (3), 867-882. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26303>
- Hammer, O., Harper, D., Ryan, P.** (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1-9.
- Iglikowska, A., Namiotko, T.** (2010). Freshwater Ostracoda (Crustacea) of Inari Lapland in northern Finland. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 46(3), 199-206. <https://doi.org/10.1051/limn/2010016>
- Koleff, P., Gaston, K.J., Lennon, J.J.** (2003). Measuring beta diversity for presence-absence data. *Journal of Animal Ecology*, 72 (3), 367-382. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.2003.00710.x>
- La Torre, M. I., Aponte, H.** (2009). Flora vascular y vegetación de los humedales de Puerto Viejo. *Revista Peruana de Biología*, 16 (2), 215-217.
- Lean, C., Maclaurin, J.** (2016). The Value of Phylogenetic Diversity. En R. Pellens y P. Grandcolas (Eds.), *Biodiversity Conservation and Phylogenetic Systematics: Preserving our evolutionary heritage in an extinction crisis* (pp. 19-37). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-22461-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22461-9_2)
- Mace, G.M., Gittleman, J.L., Purvis, A.** (2003). Preserving the Tree of Life. *Science*, 300 (5626), 1707-1709. <https://doi.org/10.1126/science.1085510>
- Pacheco, V., Pacheco, J., Zevallos, A., Valentín, P., Salvador, J., Ticona, G.** (2020). Mamíferos pequeños de humedales de la costa central del Perú. *Revista Peruana de Biología*, 27 (4), 483-498. <https://doi.org/10.15381/rpb.v27i4.19204>
- Polasky, S., Csuti, B., Vossler, C.A., Meyers, S.M.** (2001). A comparison of taxonomic distinctness versus richness as criteria for setting conservation priorities for North American birds. *Biological Conservation*, 97 (1), 99-105. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(00\)00103-8](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(00)00103-8)
- Quiñonez, A.S., Hernández, F.** (2017). Uso de hábitat y estado de conservación de las aves en el humedal El Paraíso, Lima, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 24(2), 175. <https://doi.org/10.15381/rpb.v24i2.13494>
- Ramírez, D., Cano, A.** (2010). Estado de la diversidad de la flora vascular de los pantanos de Villa (Lima- Perú). *Revista Peruana de Biología*, 17 (1), 111-114.
- Rivera, G., Gonzales, S., Aponte, H.** (2021). Wetlands of the South American pacific coast: A bibliometric analysis. *Wetlands Ecology and Management*. 30, 869-877 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11273-021-09830-8>

- Salazar-Navarro, K., Olortigue-Tello, A., Aponte, H., Lobato-de Magalhães, T.** (2020). Wetland Science in Latin America and the Caribbean Region: Insights into the Andean States. *Wetland Science y Practice*, 37 (4), 232-240.
- Salimi, S., Almuktar, S.A.A.A.N., Scholz, M.** (2021). Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands. *Journal of Environmental Management*, 286, 112160. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112160>
- Schweiger, O., Klotz, S., Durka, W., Kühn, I.** (2008). A comparative test of phylogenetic diversity indices. *Oecologia*, 157 (3), 485-495. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-1082-2>
- The Angiosperm Phylogeny Group.** (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), 1-20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- The Angiosperm Phylogeny Group.** (2009). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161 (2), 105-121. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2009.00996.x>
- Warwick, R.M., Clarke, K.R.** (1998). Taxonomic distinctness and environmental assessment. *Journal of Applied Ecology*, 35 (4), 532-543. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.1998.3540532.x>
- Zhao, Q., Bai, J., Gao, Y., Zhang, G., Lu, Q., Jia, J.** (2021). Heavy metal contamination in soils from freshwater wetlands to salt marshes in the Yellow River Estuary, China. *Science of The Total Environment*, 774, 145072. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145072>

Artículo original

## Estudios monográficos sobre Agavaceae de Suramérica. Primer registro de *Furcraea foetida* para las floras de Ecuador y Perú

### Monographic studies in South American Agavaceae. First report of *Furcraea foetida* for Ecuadorian and Peruvian floras

Diego Giraldo-Cañas

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

#### Resumen

Se registra por primera vez en Ecuador y Perú la especie nativa de América tropical *Furcraea foetida* (L.) Haw. Se presenta su descripción, así como fotografías, nombres vulgares, usos y algunos análisis morfológicos y ecológicos. Se describen por primera vez inflorescencias laterales en esta especie y se incorpora el binomio *Furcraea nana* Hochstätter & Van der Meer a la sinonimia de *F. foetida*.

**Palabras clave:** Asparagales; Cabuya; Figue; Flora de Ecuador; Flora de Perú.

#### Abstract

*Furcraea foetida* (L.) Haw., a native species from tropical America, is recorded for the first time in Ecuador and Perú. Its description, photographs, vernacular names, uses, and some morphological and ecological analyses are presented, as well as the presence of lateral inflorescences in this species for the first time. *Furcraea nana* Hochstätter & Van der Meer is reduced to synonymy of *F. foetida*.

**Keywords:** Asparagales; Cabuya; Figue; Flora of Ecuador; Flora of Peru.

#### Introducción

*Furcraea* Vent. es un género neotropical distribuido desde Florida (Estados Unidos de América) y México hasta Paraguay, así como en las Antillas (García-Mendoza, 2001; Thiede, 2020). Se conocen 24 especies (Giraldo-Cañas, 2020) y numerosos sinónimos (García-Mendoza, 2001; Thiede, 2020); muchas de sus especies se cultivan ampliamente en áreas tropicales y subtropicales de los países de ambos hemisferios (Pérez Mejía, 1964; Ullrich, 1992; García-Mendoza, 2000, 2001; Crouch & Smith, 2011; Hochstätter, 2016; Barbosa *et al.*, 2017; Verloove *et al.*, 2019; Giraldo-Cañas, 2020; Thiede, 2020). El género se caracteriza por sus hojas espiraladas, inermes, aunque más frecuentemente dentadas en sus márgenes, suculentas a semisuculentas, dispuestas en rosetas, con una inflorescencia terminal paniculada de gran tamaño (hasta de 15 m de alto), en la cual se disponen numerosas flores péndulas, perfectas, epíginas, trímeras, campaniformes, cortamente pediceladas, y solitarias, aunque más frecuentemente fasciculadas, las cuales presentan seis tépalos subiguales agrupados en dos series, así como seis estambres insertos aproximadamente en la mitad (*ca.* ½) de la longitud de los tépalos, los cuales tienen los filamentos conspicuamente engrosados en su porción proximal; además, el estigma es trilobado, con estilo papiloso, engrosado proximalmente y triquetro, en tanto que sus frutos son cápsulas trivalvadas, leñosas, cortamente estipitadas, y rostradas que varían de oblongas o subglobosas a ovoides, en las cuales se disponen numerosas semillas aplanadas, aladas,

**Citación:** Giraldo-Cañas D. Estudios monográficos sobre Agavaceae de Suramérica. Primer registro de *Furcraea foetida* para las floras de Ecuador y Perú. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):742-750, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1730>

**Editor:** Elizabeth Castañeda

**Correspondencia:**

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

**Recibido:** 14 de julio de 2022

**Aceptado:** 13 de septiembre de 2022

**Publicado en línea:** 19 de septiembre de 2022



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

negras y brillantes en dos series por lóculo (**García-Mendoza, 2000, 2001; Giraldo-Cañas, 2020; Thiede, 2020**). Por otra parte, las inflorescencias presentan eventos de proliferación vegetativa (falsa viviparí) y producen numerosos bulbilos, que pueden ser bracteados o foliosos. Los bulbilos constituyen un elemento importante para la propagación de las especies, ya que, una vez caen al suelo, pueden enraizar fácilmente y constituir nuevas rosetas (**García-Mendoza, 2000, 2001; Giraldo-Cañas, 2020; Thiede, 2020**).

Las especies de este género pueden ser arborescentes (tallos de más de 1,5 m de alto), aunque más comúnmente subcaulescentes, generalmente restringidas a hábitats secos y sustratos pobres en nutrientes entre el nivel del mar y los 3.000 m de altitud (**García-Mendoza, 2000, 2001; Giraldo-Cañas, 2020; Thiede, 2020**). A pesar de ser un género morfológicamente bien delimitado, es taxonómicamente complejo debido a la pobreza de los ejemplares tipo y a los pocos y fragmentarios materiales de herbario (**García-Mendoza, 2000, 2001**). En este sentido, *Furcraea* sigue siendo uno de los géneros menos entendidos de la familia (**Eguiarte et al., 2000; Thiede, 2020**). Por otra parte, es necesario destacar su importancia cultural y económica, ya que desde tiempos precolombinos, muchas de sus especies se han empleado en la producción de fibras duras a gran escala, una práctica muy arraigada y vigente, principalmente en Colombia, Costa Rica, Ecuador, Perú y Venezuela, donde se conocen con los nombres de cabuyas o fiques (**Pérez-Mejía, 1964; Ullrich, 1992; Cadefique, 2006; Giraldo-Cañas, 2020; Thiede, 2020; Medina-Cano et al., 2022**). Se usan principalmente para la elaboración de cordeles, sacos y variados artículos artesanales, industriales y farmacéuticos. Colombia es el líder mundial en la producción de este tipo de fibra (**Medina Cano et al., 2022**), reconocida como la fibra nacional del país (**Pérez Mejía, 1964**).

La especie *Furcraea foetida* (L.) Haw., previamente registrada en Florida (Estados Unidos), México, Costa Rica, Panamá, Colombia, Venezuela, Guayana Francesa, Guyana, Surinam, Brasil, Bolivia y las Antillas (**García-Mendoza, 2001; Ulloa-Ulloa et al., 2017, Thiede, 2020**), se registra aquí por primera vez para las floras de Ecuador y Perú, con lo cual se amplía el conocimiento y la distribución del género en Suramérica.

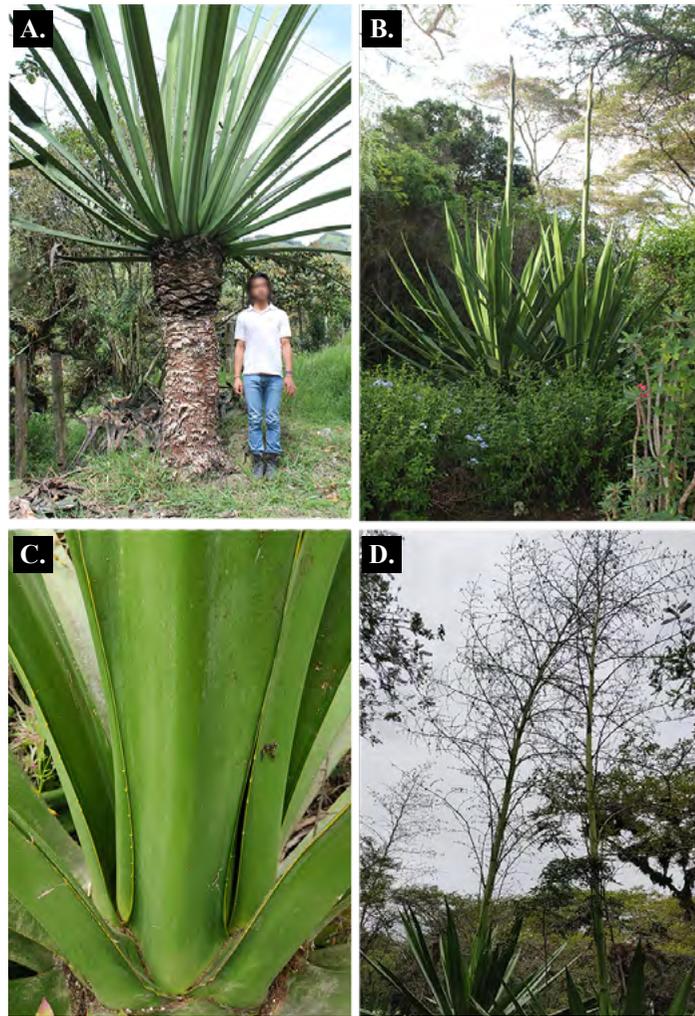
## Materiales y métodos

En el análisis morfológico y la descripción de la especie se utilizaron los métodos convencionales de la taxonomía y la sistemática biológicas (**Lawrence, 1962; Fonnegra, 1989**). Se acogió el concepto morfológico de especie según los postulados de **McDade (1995), Wiens & Servedio (2000)** y **Sosef et al. (2021)**. Se revisó la literatura concerniente al género *Furcraea*, haciendo énfasis en las descripciones, las ilustraciones y los protólogos de todos los binomios nativos o cultivados del género, así como en el análisis de numerosos materiales tipo. Para el reconocimiento y la circunscripción de la familia Agavaceae, así como su ubicación en el orden Asparagales, se siguió a **Nyffeler & Egli (2020)** y a **Thiede & Egli (2020)**, en tanto que la circunscripción y la delimitación del género *Furcraea* se basaron en **Thiede (2020)**. Para referirse a los eventos de proliferación vegetativa de las inflorescencias (falsa viviparí), se empleó el término “bulbilo” y no “bulbillo” (**Arizaga & Ezcurra, 1995; Font-Quer, 2001**). Los acrónimos de los herbarios se ajustaron a los de **Thiers (2022)**.

Por último, la categoría de riesgo de extinción se estimó con base en los lineamientos de la **UICN (2012)**, considerando, además, la extensión de presencia (EOO) y el área de ocupación (AOO) (**UICN, 2012**). Las áreas EOO y AOO se calcularon en la plataforma GeoCAT (<http://geocat.kew.org/>) (**Andrés Fonseca-Cortés, com. pers. 23 de agosto de 2022**).

## Resultados y discusión

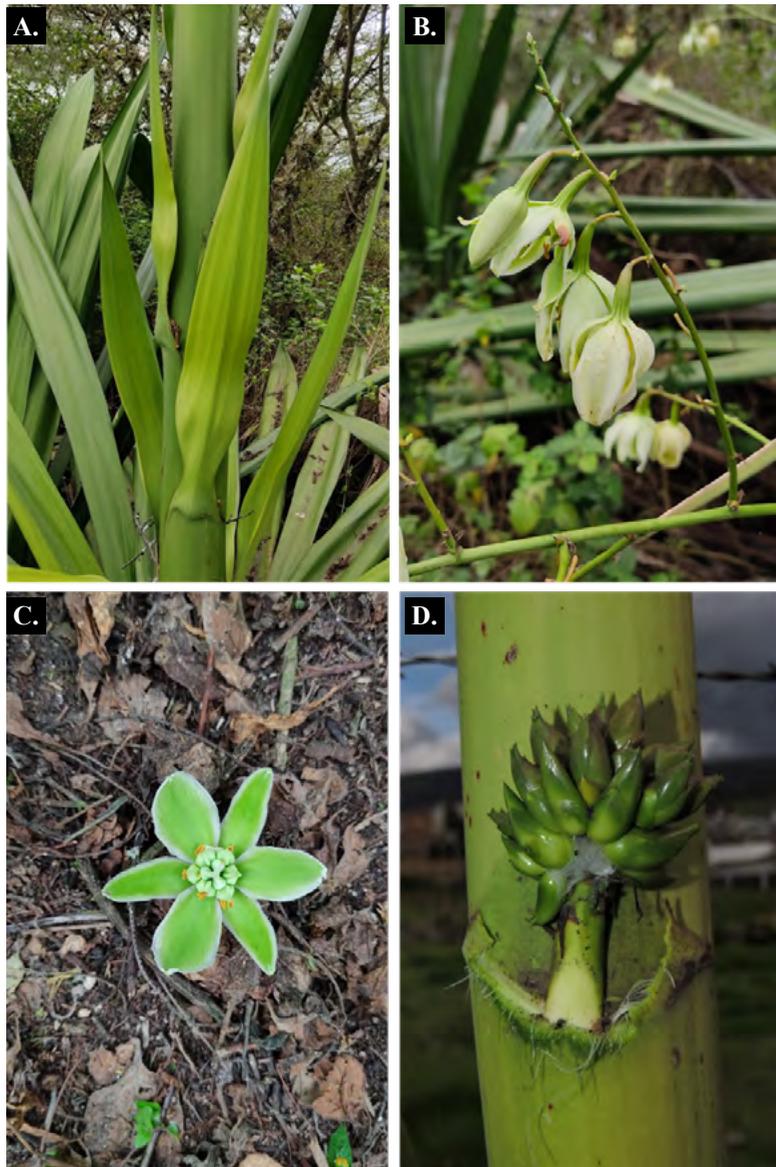
*Furcraea foetida* (L.) Haw., Syn. Pl. Succ. 73. 1812. *Agave foetida* L., Sp. Pl. 1: 323–324. 1753. LECTOTIPO (designado por R. A. Howard, Fl. Lesser Antilles 3: 497. 1979) (ícono): América Tropical. Commelin, Hort. Med. Amstelod. Pl. Rar. 2: 35, t. 18. 1701. **Figuras 1 y 2.**



**Figura 1.** *Furcraea foetida* (L.) Haw. **A.** Roseta conspicuamente caulescente (D. Giraldo-Cañas 6232). **B.** Roseta subcaulescente (D. Giraldo-Cañas 6229). **C.** Detalle de las márgenes foliares inermes en gran parte de su extensión, aunque con algunos denticillos proximales (D. Giraldo-Cañas 6031). **D.** Rosetas floríferas (D. Giraldo-Cañas 6229) (fotografías: D. Giraldo-Cañas)

*Furcraea nana* Hochstätter & Van der Meer, *nom. nud.*, in F. Hochstätter, *Furcraea* Ventenat - *Beschorneria* Kunth (Agavaceae). Mannheim: 57–60. 2016. TIPO: Colombia. Boyacá. 1800 m s.m., 2 de febrero de 2006, P. Van der Meer s. nro. (holotipo: sin indicación del herbario), *syn. nov.*

Roseta robusta, hapaxántica, de (1,5–) 2–4 (–5) m de diámetro, no surculosa (sin hijuelos estoloníferos), con hijuelos interfoliares o infrafoliares (los cuales pueden desarrollar inflorescencias terminales espiciformes de hasta un metro de alto, floríferas y bulbilíferas), o sin estos; corta a conspicuamente caulirrósula, tallo de (0,3–) 0,5–1,5 (–3) m × (15–) 25–40 (–50) cm de diámetro; hojas simples, sésiles, gruesas, coriáceas, fibrosas, lanceoladas, linear-lanceoladas u oblanceoladas, dispuestas en ángulos de 30–60° con respecto al tallo, generalmente rígidas, numerosas [(20–) 30–70 (–105) hojas por roseta], 50–200 (–300) × 7–21 cm, siendo más largas las proximales; de color verde claras (en algunas plantas cultivadas se presentan hojas variegadas con listones amarillos o blanquecinos y verdes), opacas o brillantes, con una línea de color rojizo, marrón, morado o amarillo marginalmente en toda su extensión, cóncavas a planas, alternas en una densa roseta, las senescentes escasas y persistentes en la porción proximal del tallo, nerviación inconspicua, abaxialmente



**Figura 2.** *Furcraea foetida* (L.) Haw. **A.** Detalle de brácteas proximales del pedúnculo (*D. Giraldo-Cañas 6229*). **B.** Porción de una inflorescencia (nótese las flores péndulas) (*D. Giraldo-Cañas 6229*). **C.** Detalle de una flor (*D. Giraldo-Cañas 6229*). **D.** Bulbilos inmaduros de una ramificación proximal (*D. Giraldo-Cañas 6134*) (fotografías: D. Giraldo-Cañas)

ásperas al tacto, adaxialmente lisas, márgenes inermes, raramente con muy pocos y diminutos dientes principalmente dispuestos en las porciones proximales de las hojas (menos de 20 dientecillos por hoja y de 0,1–0,3 cm long.). Inflorescencia en panícula piramidal-ovoide, terminal, de (2–) 5–10 m de alto, medianamente densa a más comúnmente laxa, bracteada y bracteolada, fértil a partir del segundo cuarto o segundo quinto de su longitud, y el primer cuarto o el primer quinto solo bracteado; multiflórida y bulbilífera, con cientos de bulbilos por inflorescencia, foliosos, muy raramente bracteados, de color verde intenso, brillantes, fácilmente caedizos (muy raramente, algunas rosetas pueden desarrollar inflorescencias laterales interfoliarias, axilares, de hasta 1,7 m de alto, pobremente ramificadas, floríferas y bulbíferas, solo desarrolladas en la porción distal de las rosetas); pedúnculo de (5–) 10–14 cm de diámetro (en su porción proximal), verde claro y opaco, con corteza que se desprende

en tiras; brácteas inermes, que disminuyen progresivamente en longitud a medida que se asciende en el pedúnculo; brácteas proximales y medias lanceoladas, con ceñiduras regulares en su porción proximal, verdes opacas, regularmente con su porción distal marrón o marginalmente marrón, erectas y plegadas al pedúnculo, brácteas distales deltoideas, plegadas o no al pedúnculo, quebradizas, café-opacas; brácteas proximales de 17–58 × 3–8 cm; brácteas medias de 14–27 × 3–5 cm; de cada bráctea surge una ramificación primaria horizontal, aunque en las brácteas proximales puede estar atrofiada o ser muy corta (de hasta 5 cm), caso en el cual es florífera y bulbilífera o solo bulbilífera; ramificaciones primarias espiraladas, numerosas [(10–) 23–58 (–64) por inflorescencia]; ramificaciones primarias proximales muy cortas, de (2) 5–37 cm de longitud; ramificaciones primarias medias de 58–120 cm de longitud; ramificaciones primarias distales de 20–30 cm de longitud; 1–15 ramificaciones secundarias por ramificación primaria de hasta 28 cm de longitud. Flores fácilmente caducas, péndulas, solitarias o en fascículos de 2–5 flores, pediceladas, pedicelos capilares de 0,3–0,8 cm de longitud; ovario cilíndrico, glabro, de 1,8–2,6 × 0,2–0,4 cm, verde opaco con matices de color marrón; tépalos de 2,0–2,7 × 0,5–1,6 cm, elípticos, carnosos, glabros, opacos, adaxialmente verdes muy claros, abaxialmente blanquecino-verdosos, y tépalos del verticilo interno con márgenes escariosas e hialinas; estilo de 1,5–1,6 cm de longitud y 0,2–0,4 cm de ancho en su porción proximal más engrosada, verde claro, opaco, estigma trilobulado, verde claro, opaco; estambres con filamentos blanquecino-verdosos, opacos, de 1,1–1,4 cm de longitud y 0,2–0,4 cm de ancho en su parte proximal más engrosada, anteras oblongas, amarillas de 0,2–0,3 × ca. 0,1 cm. Frutos desconocidos.

#### ***Distribución y hábitat***

*Furcraea foetida* es la especie que exhibe la más amplia distribución geográfica de todas las especies de *Furcraea*: Florida (Estados Unidos de América), México, Costa Rica, Panamá, Colombia, Venezuela, Guayana Francesa, Guyana, Surinam, Brasil y Bolivia, así como las Antillas (García-Mendoza, 2001; Ulloa-Ulloa *et al.*, 2017, Thiede, 2020). Sin embargo, no había sido citada anteriormente para las floras de Ecuador y Perú (Ullrich, 1992; Brako & Zarucchi, 1993; García-Mendoza & Lott, 1994; Jørgensen & León-Yáñez, 1999; García-Mendoza, 2001; Ulloa-Ulloa *et al.*, 2004, 2017; Ulloa-Ulloa & Neill, 2005; Neill & Ulloa-Ulloa, 2011; Hochstätter, 2016; Thiede, 2020). Esta especie crece tanto en ambientes secos como húmedos, principalmente en arbustales y matorrales, pastizales, bosques secundarios, bordes de bosque y caminos, en suelos de diferentes características y en afloramientos rocosos entre los 100 y los 2.900 m s.n.m. (obs. pers.). La especie se cultiva ampliamente en áreas tropicales y subtropicales de numerosos países de ambos hemisferios (García-Mendoza, 2001; Thiede, 2020; Giraldo-Cañas, obs. pers.). *Furcraea foetida* presenta un claro carácter invasor en ambientes tanto húmedos como xerofíticos de varios países (obs. pers.), condición que resaltan Crouch & Smith (2011), Barbosa *et al.* (2017) y Verloove *et al.* (2019).

#### ***Conservación***

Dado que la especie no cumple con ninguno de los criterios que definen las categorías de “En peligro crítico” (CR), “En peligro” (EN), “Vulnerable” (VU), o “Casi amenazada” (NT) (UICN, 2012) y es una especie abundante, invasora en varios ambientes y de amplia distribución geográfica (EEO: 12.997.340,71 km<sup>2</sup>, AOO: 128 km<sup>2</sup>), *F. foetida* se ubica en la categoría de “Preocupación menor” (LC).

#### ***Nombres vulgares***

Se la conoce como borde de oro, bordo dioro, cabuya cimarrona, cabuya hembra, cenizo, fique, fique borde de oro, fique bordo dioro, fique cenizo, fique liso, fique negro, fique perolero, fique variedad cenizo, maguey, penca de fique (Colombia), cabuya (Colombia, Costa Rica, Ecuador), cabulla, cabuya olancho (Costa Rica), cabuya blanca (Costa Rica, Ecuador), cabuya sin espinas (Colombia, Costa Rica, Perú), cáñamo (Bolivia), cocuiza, fique (Colombia, Venezuela), cocuiza mansa (Venezuela), pita, piteira (Brasil) (García-Mendoza, 2001; Giraldo-Cañas, datos inéditos).

### Usos

Se usa en la producción de fibras duras para la elaboración de cuerdas y productos artesanales (en varios países), cercas vivas (en varios países), barreras (en Boyacá, Colombia, los pedúnculos secos se usan como barreras horizontales al lado de pozos y charcos con el fin de evitar que niños y animales caigan en ellos), forraje (en algunas áreas andinas de Colombia se emplean las hojas nuevas picadas para alimento de vacas, cabras y chivos), medicinal (las hojas se usan como abortivo y para regular la menstruación) (Bogotá, Colombia), para tratar molestias de la próstata y los riñones (Arauca, Colombia); ornamental en espacios abiertos (en muchos países), arreglos florales (en algunas áreas andinas de Colombia se usan las hojas completas para la elaboración de arreglos florales de gran formato); como material de construcción (en algunas áreas de Boyacá, Colombia, el escape partido en astillas largas se usa para “robloniar”, esto es, rellenar cielorrasos, con el fin de ahorrar cañas y mezcla de cemento y arena) (**Giraldo-Cañas**, datos inéditos), y, por último, en Brasil se emplea como veneno para peces (**García-Mendoza**, 2001). La especie, entonces, constituye un valioso recurso para muchas comunidades campesinas e indígenas, principalmente en los Andes de Colombia y Ecuador.

### Observaciones

*Furcraea foetida* se distingue fácilmente entre las especies suramericanas por ser la única con hojas inermes, pues las demás especies del género tienen hojas conspicuamente armadas en toda la longitud de sus márgenes. Los numerosos sinónimos de esta especie se encuentran en **García-Mendoza** (2001) y **Thiede** (2020). *F. foetida* es muy variable en cuanto a las dimensiones de sus tallos, rosetas, hojas e inflorescencias, razón por la cual se han publicado numerosos binomios que corresponden a sinónimos. En este sentido, aquí se propone como nuevo sinónimo a *F. nana* Hochstätter & Van der Meer, binomio recientemente publicado por **Hochstätter** (2016), cuyas rosetas, hojas e inflorescencias corresponden a las formas más pequeñas de las poblaciones de *F. foetida*, muy comunes en varias áreas de xerofitía andina en el departamento de Boyacá (Colombia) (obs. pers.). **Thiede** (2020: 330) había destacado la estrecha relación entre *F. nana* y *F. foetida*, pero no propuso ninguna sinonimia.

Esta especie no produce frutos (**García-Mendoza**, 2001; **Thiede**, 2020; **Giraldo-Cañas**, obs. pers.), por lo que su propagación es meramente clonal a partir de los numerosos y vigorosos hijuelos infrafoliares e interfoliares, así como por la gran cantidad de bulbilos que se producen en las inflorescencias. Dicha condición es muy frecuente entre numerosas especies de *Agave* L. y *Furcraea* (**Gentry**, 1982; **García-Mendoza**, 2001; **Giraldo-Cañas**, 2017; **Thiede**, 2020). *F. foetida* puede desarrollar tallos de hasta 3 m de alto × 50 cm de diámetro, lo cual la convierte, junto con *F. acaulis* (Kunth) B. Ullrich (tallos de hasta 3 m × 50 cm de diámetro), en la especie suramericana con los tallos más altos (obs. pers.). Estas rosetas con tallos conspicuamente desarrollados se han denominadas como arborescentes, condición esta más frecuente en especies mesoamericanas (**García-Mendoza**, 2000).

Aquí se señala por primera vez la presencia de inflorescencias laterales en esta especie en algunas rosetas de las áreas de xerofitía andina del departamento de Boyacá (Colombia) (obs. pers.). Dichas inflorescencias laterales son interfoliares, axilares, floríferas y bulbilíferas al mismo tiempo, y solo se desarrollan en la porción distal de las rosetas; son, además, bracteadas, numerosas (13–16 inflorescencias laterales por roseta), de 1,4–1,7 m de alto, piramidales, laxas, con 12–15 ramificaciones de primer orden. El hallazgo es una novedad en las especies suramericanas, ya que solo se había detectado en dos especies de México: *F. parmentieri* (Roehl ex Ortgies) **García-Mendoza** y *Furcraea* sp. nov. (**García-Mendoza**, 2001: 28). Muy raramente, se han visto bulbilos de *F. foetida* en poblaciones de Antioquia (Colombia) que desarrollan pequeñas inflorescencias con flores y bulbilos, incluso estando en la inflorescencia de la roseta madre, condición muy rara en el género y documentada una sola vez en esta especie (**García-Mendoza**, 2001: 28).

Algunas rosetas pueden presentar un notable pero poco diverso epifitismo, por ejemplo, el helecho *Pleopeltis macrocarpa* (Willd.) Kaulf. (Polypodiaceae), algunos musgos de la familia Bryaceae (obs. pers.) y las hierbas *Oxalis medicaginea* Kunth y *Pilea* cf. *microphylla* (L.) Liebm. Por otra parte, las rosetas de *F. foetida*, particularmente las brácteas proximales del pedúnculo, constituyen refugio para numerosos invertebrados (arañas, caracoles, escorpiones, grillos, gusanos, larvas, tijeretas, entre otros) (obs. pers.). Por último, merece destacarse que en la portada y la página 30 del libro de **Hochstätter** (2016) aparecen fotografías descritas por el autor como de *F. foetida*, pero que, dadas las características de sus tallos, sus rosetas, sus hojas y sus inflorescencias (obs. pers.), claramente corresponden a la especie endémica de México *F. parmentieri* (Roezl ex Ortgies) García-Mendoza (**García-Mendoza**, 2000, 2001). **García-Mendoza** (2001) y **Hochstätter** (2016) suministraron varias claves para todas las especies del género y, por tal razón, aquí no se las incluye.

### **Material examinado**

**BOLIVIA. La Paz.** Nor Yungas, Coroico-Beljardín, 29 de marzo de 1992, *S. G. Beck 21061* (LPB).

**BRASIL. Brasília D. F.** Baria do Rio São Bartolomeu, 9 de diciembre de 1980, *E. P. Herdiger 5844* (US). **Minas Gerais.** Viçosa, road to São Miguel, about km 12, in open valley land, 800 m, 16 de febrero de 1930, *Y. Mexia 4354* (MO, NY, US).

**COLOMBIA. Boyacá.** Municipio de Villa de Leyva, vereda Salto y Lavandera, finca “*Gatan asucune zpuyquyz quypcuas bzascua*”, a 5.7 km al noroeste de la plaza principal de Villa de Leyva, a 1.5 km de la intersección de la carretera veredal en el Alto de Los Migueles, en dirección al valle del río Cane, 2250 m, 13 de marzo de 2016, *D. Giraldo-Cañas et al. 6031* (COL). Cordillera Oriental andina, municipio de Tunja, campus de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), potreros de kikuyo (*Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.) Morrone), ubicados detrás del edificio de Ingeniería y al lado de la Estación Meteorológica del IDEAM; 2800 m, 12 de diciembre de 2016, *D. Giraldo-Cañas et al. 6134* (COL, UPTC). **Casanare.** Los Llanos, río Casanare, Esmeralda, woods and savanna, 130 m, 19–20 de octubre de 1938, *J. Cuatrecasas 3973* (US). **Cauca.** La Paila, 4 de julio de 1853, *L. F. Holton 149* (NY). **Cundinamarca.** Municipio de Guaduas, carretera Bogotá-Guaduas, a 11 km de la plaza de la Constitución de Guaduas, en borde de bosque húmedo secundario, 5°02'35,3"N–74°33'05,8"O, ca. 730 m, 5 de junio de 2022, *D. Giraldo-Cañas et al. 6232* (COL). **Magdalena.** Santa Marta, años 1898-1899, *H. H. Smith 2336* (MO, NY, US). **Valle del Cauca.** La Cumbre, 21–25 de mayo de 1922, *F. W. Pennell & E. P. Killip 5991* (US).

**ECUADOR. Imbabura.** Along road from Apuela to Plaza Gutiérrez, 1.7 km E of Apuela, 00°21'04"N–78°30'28"O, 2414 m, 29 de abril de 2003, *T. B. Croat & L. Hannon 88247* (MO, QCNE). **Pichincha.** Parroquia Malchinguí, cantón Pedro Moncayo, parque-bosque protector Jerusalem, vía Guayllabamba-Tabacundo, a 28-30 km al norte de la ciudad de Quito, sendero “La Casa de las Aves”, en xerofitía, ca. 2440 m, 24 de abril de 2022, *D. Giraldo-Cañas et al. 6229* (COL).

**ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA. Florida.** Dade Countu, Crandon Park-Key Biscayne, in coastal strand, ca. 0.3 miles north of nature center, 8 de diciembre de 1997, *K. Bradley 1258* (NY).

**GUAYANA FRANCESA.** Vicinity of Cayenne, sea coast, 17 de julio de 1921, *W. E. Broadway 870* (US).

**GUYANA. Región U. Takatu-U.** Essequibo, Tautowan Mt., base and slopes, 10 km E of Dadanawa Ranch Compound, on granitic outcroppings, 150–260 m, 02°49'24"N–59°25'46"O, 4 de julio de 1997, *H. D. Clarke 5148* (NY, US). Upper Rupununi River, near Dadanawa, 24–29 de julio de 1922, *J. S. De La Cruz 1711* (US). **Región Potaro-Siparuni.** Pakairama Mts., upper Ireng R watershed, Kaatnang R, near base of Malakwalai-Tipu, 700 m, 4°48'N–60°12'O, 9 de julio de 1994, *T. W. Henkel & M. Chin 5500* (US).

**PERÚ. Huánuco.** Between Huanchahuasi and Hacienda Quicacán, about 20 km south of Huánuco, habitat stony, 2300 m, 15 de febrero de 1950, *R. Ferreyra 6911* (US).

**PERÚ. Lima:** Provincia de Huaura, Lomas de Lachay, suelo arenoso, 300-600 m, 22 enero 2000, *A. Cano 10051* (USM).

**SURINAM.** 7 km SSW of Juliana Top, 12 km north of Lucie Rivier, on granitic outcrop in forested hill, 450 m, 03°36'N–56°30'O, 1 de septiembre de 1963, *H. S. Irwin et al. 55327* (MO, NY).

**VENEZUELA.** Near Caracas, febrero de 1906, *J. Padrón Ustariz s. nro.* (US: 592589). Near Caracas, año 1906, *Ustariz s. nro.* (MO: 2148586). Caracas, año 1912, *Zuloaga s. nro.* (MO: 2148583). Sin localidad, año 1906, *Dewey s. nro.* (MO: 2148590). Sin localidad, año 1909, *Ustariz 4* (MO).

## Agradecimientos

Al Instituto de Ciencias Naturales, al Herbario Nacional Colombiano (COL) y a la Universidad Nacional de Colombia, por todas las facilidades brindadas para la preparación de este trabajo. A mis queridos amigos, por su acompañamiento en las expediciones de campo, por la toma de varias de las fotografías, por el obsequio de preciada bibliografía y por toda su valiosa y alegre ayuda durante diferentes muestreos de los agaves y los fiques de Suramérica. A los curadores y al personal científico y administrativo de los herbarios visitados, por su valiosa ayuda. A Agrosavia (Rionegro, Colombia), por el obsequio de variados ejemplares de herbario. A la UICN por la invitación y la financiación del “Taller para la evaluación de riesgo de extinción de las especies de agaves y yucas para la Lista Roja de la UICN” (Querétaro, México, 2018). Esta contribución se derivó de los proyectos “Estudios taxonómicos y morfológicos en los géneros *Agave* y *Furcraea* (Asparagaceae) en Sudamérica” (código Hermes 37417) y “Estudios florísticos en comunidades xerófilas de la Cordillera Oriental andina de Colombia” (código Hermes 26215), de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá D.C. Al Comité Editorial y a los evaluadores anónimos, por sus acertados comentarios.

## Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias

- Arizaga, S., Ezcurra, E. (1995). Insurance against reproductive failure in a semelparous plant: Bulbil formation in *Agave macroacantha* flowering stalks. *Oecologia*, 101, 329-334. <https://doi.org/10.1007/BF00328819>
- Barbosa, C., Otálora, J.M., Giehl, E.L.H., Villalobos, F., Loyola, R., Tessarolo, G., Machado, N., Tarabini Castellani, T. (2017). Changes in the realized niche of the invasive succulent CAM plant *Furcraea foetida*. *Austral Ecology*, 42, 643-654. <https://doi.org/10.1111/aec.12483>
- Brako, L., Zarucchi, J.L. (1993). Catalogue of the flowering plants and gymnosperms of Peru. *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden*, 45, 1-1286.
- Cadefique (Cadena Productiva Nacional del Fique). (2006). *Guía ambiental del subsector fiquero*. Bogotá D. C.: Ministerio de Ambiente-Ministerio de Agricultura. 102 páginas.
- Crouch, N.R., Smith, G.F. (2011). *Furcraea foetida*: An invading alien in South Africa. *Bothalia*, 41, 196-199.
- Eguiarte, L. E., Souza, V., Silva-Montellano, A. (2000). Evolución de la familia Agavaceae: Filogenia, biología reproductiva y genética de poblaciones. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 66, 131-150. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1618>
- Fonnegra, R. (1989). *Taxonomía de las plantas vasculares*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia. 283 páginas.
- Font Quer, P. (2001). *Diccionario de botánica*. Barcelona: Ediciones Península.
- García-Mendoza, A. (2000). Revisión taxonómica de las especies arborescentes de *Furcraea* (Agavaceae) en México y Guatemala. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 66, 113-129.
- García-Mendoza, A. (2001). Revisión del género *Furcraea* (Agavaceae). México D. F.: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis doctoral inédita.

- García-Mendoza, A., Lott, E.J.** (1994). *Furcraea* Vent. *Flora Mesoamericana*, 6, 45-47.
- Gentry, S.H.** (1982). *Agaves of Continental North America*. Tucson: The University of Arizona Press. 670 páginas.
- Giraldo-Cañas, D.** (2017). Una nueva especie de *Agave* (Asparagaceae) de Colombia y una clave taxonómica para las especies sudamericanas. *Caldasia*, 39, 33-49. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v39n1.63318>
- Giraldo-Cañas, D.** (2020). Una nueva especie de *Furcraea* (Agavaceae) de Colombia. *Darwiniana (nueva serie)*, 8, 499-508. <https://doi.org/10.14522/darwiniana.2020.82.917>
- Hochstätter, F.** (2016). *Furcraea* Ventenat - *Beschorneria* Kunth (Agavaceae). Mannheim (Alemania): Publicado por el autor.
- Jørgensen, P. M., León-Yáñez, S.** (1999). Catalogue of the vascular plants of Ecuador. *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden*, 75, 1-1181.
- Lawrence, G.H.M.** (1962). *An introduction to plant taxonomy*. Nueva York: The Macmillan Company. 321 páginas.
- 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>
- Medina-Cano, C.I., Grisales-Vásquez, N.Y., Orozco-Orozco, L.F., Barbosa-Ángel, E.S., Vargas-Arcila M.O., Cotes-Torres, J.M.** (2022). Morphoagronomic characterization of a germplasm collection of *Furcraea* spp. and *Agave* spp. *Revista Ceres*, 69, 283-293. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269030005>
- Neill, D.A., Ulloa Ulloa, C.** (2011). *Adiciones a la flora del Ecuador: Segundo Suplemento, 2005–2010*. Quito: Fundación Jatun Sacha. 109 páginas.
- Nyffeler, R., Egli, U.** (2020). Introduction to the classification of Monocotyledons. In: U. Egli & R. Nyffeler (eds.). *Illustrated handbook of succulent plants. Monocotyledons*, pp. 1-6. Berlín: Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56486-8>
- Pérez-Mejía, J.A.** (1964). *El fique. Su taxonomía, cultivo y tecnología*. Medellín: Compañía de Empaques-Editorial Colina. 124 páginas.
- Sosef, M.S.M., Degreef, J., Engledow, H., Meerts, P.** (2021). *Clasificación botánica y nomenclatura, una introducción*. Meise: Meise Botanic Garden. 185 páginas. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3980300>
- Thiede, J.** (2020). *Furcraea*-Agavaceae. In: U. Egli & R. Nyffeler (eds.). *Illustrated handbook of succulent plants. Monocotyledons*, pp. 323-347. Berlín: Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-56486-8\\_106](https://doi.org/10.1007/978-3-662-56486-8_106)
- Thiede, J., Egli, U.** (2020). Agavaceae. In: U. Egli & R. Nyffeler (eds.). *Illustrated handbook of succulent plants. Monocotyledons*, pp. 9-19. Berlín: Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56486-8>
- Thiers, B.** [permanentemente actualizado]. (2022). *Index Herbariorum: a global directory of public herbaria and associated staff*. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium. <https://sweetgum.nybg.org/ih/>
- UICN.** (2012). *Categorías y criterios de la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza UICN. Versión 3.1*. Gland, Suiza. Segunda edición. 34 páginas. <https://www.iucn.org/es/content/categorias-y-criterios-de-la-lista-roja-de-la-uicn-version-31-segunda-edicion>
- Ulloa-Ulloa, C., Acevedo, P., Beck, S., Belgrano, M., Bernal, R., Berry, P., Brako, L., Celis, M., Davidse, G., Forzza, R., Gradstein, S., Hokche, O., León, B., León-Yáñez, S., Magill, R., Neill, D., Nee, M., Raven, P., Stimmel, H., Jørgensen, P.** (2017). An integrated assessment of the vascular plant species of the Americas. *Science*, 358, 1614-1617. <https://doi.org/10.1126/science.aao0398>
- Ulloa-Ulloa, C., Neill, D.A.** (2005). *Cinco años adiciones a la flora del Ecuador*. Loja: Editorial Universidad Técnica Particular de Loja. 129 páginas.
- Ulloa-Ulloa, C., Zarucchi, J.L., León, B.** (2004). Diez años de adiciones a la flora del Perú 1993–2003. *Arnaldoa (Edición Especial)*, 1-242.
- Ullrich, B.** (1992). *Furcraea* (Agavaceae) en Sudamérica. *Quepo*, 6, 67-75.
- Verloove, F., Thiede, J., Marrero Rodríguez, A., Salas-Pascual, M., Reyes-Betancort, J.A., Ojeda-Land A.E., Smith, G.F.** (2019). A synopsis of feral *Agave* and *Furcraea* (Agavaceae, Asparagaceae s. lat.) in the Canary Islands (Spain). *Plant Ecology and Evolution*, 152, 470-498. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2019.1634>
- Wiens, J.J., Servedio, M.R.** (2000). Species delimitation in systematics: inferring diagnostic differences between species. *Proceedings of the Real Society of London. B*, 267, 631-636. <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1049>

Original article

## New records of lichen genera and species for Colombia

### Nuevos registros de géneros y especies de líquenes para Colombia

Edier Soto Medina<sup>1,\*</sup>, André Aptroot<sup>2</sup>, Robert Lüicking<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación, Ecología y Diversidad Vegetal; Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia

<sup>2</sup> ABL Herbarium, G.v.d.Veenstraat 107, NL-3762 XK Soest, The Netherlands.

<sup>3</sup> Botanischer Garten und Botanisches Museum, Freie Universität Berlin, Königin-Luise-Straße 6–8, 14195 Berlin, Germany

#### Abstract

*Dirina paradoxa*, *Heterocyphelium triseptatum*, *Julella sublactea*, *Opegrapha aurantiaca*, *Peltula steppae*, *Sarcographina cyclospora* and *Schistophoron tenue* are reported for the first time in Colombia. The genera *Dirina*, *Heterocyphelium*, *Sarcographina* and *Schistophoron* are reported for the first time in Colombia. These lichens mainly originate from dry ecosystems where previous collections of lichenized fungi have been uncommon.

**Key words:** Crustose lichens; Tropic; Taxonomy.

#### Resumen

*Dirina paradoxa*, *Heterocyphelium triseptatum*, *Julella sublactea*, *Opegrapha aurantiaca*, *Peltula steppae*, *Sarcographina cyclospora* y *Schistophoron tenue* son reportadas por primera vez para Colombia. Los géneros *Dirina*, *Heterocyphelium*, *Sarcographina* y *Schistophoron* son reportados por primera vez para Colombia. Estos líquenes provienen principalmente de ecosistemas secos donde colecciones previas de hongos liquenizados han sido escasas.

**Palabras clave:** Líquenes costrosos; Pruina; Taxonomía.

#### Introduction

It is estimated that there are close to 20000 lichenized fungal species globally, with approximately 7000 occurring in the Neotropics (Sipman and Aptroot, 2001; Lüicking *et al.*, 2009, 2017). The great majority of these are found epiphytically on bark. Colombia has 1634 species reported in the most recent Catalogue (Lüicking *et al.*, 2021), while 3300 species have been predicted (Lüicking *et al.*, 2009), which suggests a large gap in the knowledge of the Colombian lichen biota. In addition, if we consider that the vast majority of studies and collections have been restricted to a few regions of the country, particularly the Andean region with departments such as Cundinamarca, Boyacá, Caldas, Cauca and Valle del Cauca, it is expected that there are many more taxa to be recorded or described (Soto *et al.*, 2021).

Dry forests are a life zone characterized by annual rainfall between 1000-2000 mm and mean temperatures of 25 °C. These ecosystems are characterized by often having thorny woody plants with various adaptations to desiccation. The dry forest in Colombia is restricted to the inter-Andean valleys (Cauca and Magdalena), the Caribbean region, and some small high mountain areas. Currently, dry forests are one of the most threatened ecosystems in Colombia, with only 5% of their original area remaining (Ramos and Silverstone, 2018). Despite their small area, they represent the least known ecosystem in

**Citation:** Soto Medina E, Aptroot A, Lüicking R. New records of lichen genera and species for Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):751-757, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1726>

**Editor:** Elizabeth Castañeda

**\*Corresponding autor:**  
Edier Soto Medina; ediersot@gmail.com

**Received:** July 5, 2022

**Accepted:** September 27, 2022

**Published:** September 30, 2022



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

terms of their the diversity of lichenized fungi, with many new discoveries to be expected (Lücking et al., 2019). The objective of this study is to show new records of genera and species of lichens for Colombia

## Materials and methods

The material studied is deposited in the CUVC Herbarium of the Universidad del Valle (Colombia). Specimens were determined by examining characteristics of the thallus and ascomas such as ascospore type and size. The material was reviewed using a stereoscope and an Olympus SX-21 microscope. The ascospores were measured with a micrometric ruler. Photographs of all specimens were taken with a digital camera Canon PowerShot SX16. Chemical tests were also carried out with reagents K (10% potassium hydroxide), C (10% sodium hypochlorite) and lugol's iodine (IKI) for hymenium and ascospores.

## Results and discussion

### *Dirina paradoxa* (Fée) Tehler

**Description.** Thallus corticolous, crustose, verrucose to squamulose, whitish gray, surface with pruina. Photobiont green. *Apothecia* sessile, disc gray with white pruine; white thalline margin, entire to wavy, 0.5–1.7 mm diam. Ascospores 8 per ascus, hyaline, 3-septate, 16–20 × 5 µm. Pycnidia not observed. CHEMISTRY: Thallus UV–, K–, C+ red; medulla C–, K–, KC–. Disc pruina C– or faintly C+ red, I+ red (lecanoric acid, erythrin).

(Fig. 1 A–B)

**Habitat and distribution.** This species grows on acid rock or on bark in the Antilles and Venezuela (Tehler et al., 2013). Most species of the genus occur in Europe or Africa, and in South America it has been registered in Brazil, Cuba, Ecuador, Mexico, Perú and Venezuela (Tehler et al., 2013). In Colombia, it is reported for first time as a corticolous in dry forests of the Chicamocha Canyon. It is a typical element of dry forests.

**Specimens examined.** COLOMBIA: Santander: Municipality Los Santos, lower andeans orobiome; 06°47'32"N, 73°5'55"O, 1560-1700 m; open grasslands; 22 December 2018, Jiménez and Romero 785 (CUVC).

### *Heterocyphelium triseptatum* Aptroot and M. Cáceres

**Description.** Thallus corticolous, crustose, smooth, grayish green to yellowish gray. Photobiont green. *Perithecia* solitary, becomes mazedia, laminar, ostiole margin white with black mass of ascospores, 0.3–0.6 mm diam. *Ascus* degrade quickly, leaving a mass of ascospores. *Ascospores* brown, 3-septate, 12–14 × 5–6 µm. CHEMISTRY: Thallus UV–, K–; medulla C–, K–, KC– (no substances).

(Fig. 1 C–D)

**Habitat and distribution.** This species grows on bark in Cerrado vegetation (Aptroot et al., 2017). Previously it has been reported from Brazil and Bolivia (Guzow-Krzemińska et al., 2019). In Colombia, it is reported for the first time in forests of the middle Magdalena, in Río Claro (Antioquia).

**Specimens examined.** COLOMBIA: Antioquia: Municipality of Doradal, Magdalena temperate rainforest, Río Claro, on the road between Río Claro an Doradal; 05°54'50"N, -74°50'57"W, 600 m; 4 July 2018, Soto s.n. (CUVC).

### *Julella sublactea* (Nyl.) R.C. Harris

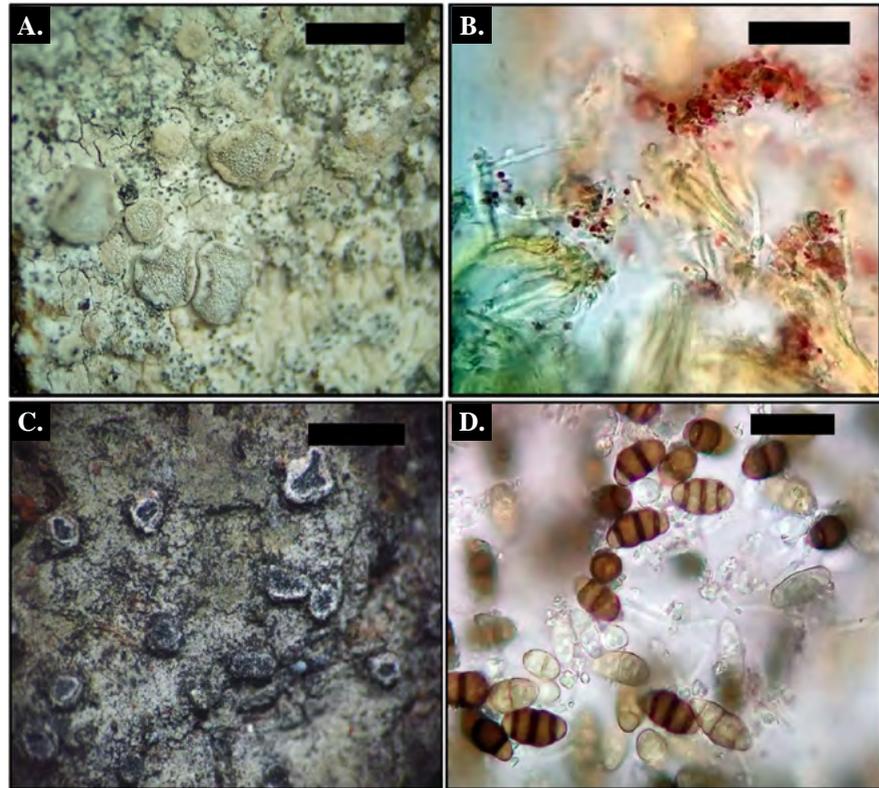
**Description.** Thallus corticolous, crustose, ecorticate, whitish gray. Photobiont green. *Perithecia* solitary, black, ostiole apical, 0.3–0.7 mm diam. Ascospores 8 per ascus, hyalines, muriforms, 30–34 × 10 µm. CHEMISTRY: Thallus UV–, K–; medulla C–, K–, KC– (no substances).

(Fig. 2 A–B)

**Habitat and distribution.** *Julella sublactea* is a corticolous species present in dry forests of North America and Mediterranean (Esslinger, 2019). In the Neotropics, this

species has so far been registered for Mexico, the Caribbean, and recently Brazil (Aptroot and Spielmann, 2020; Harris, 1995, Roux et al., 2014), see GBIF.org (2019). In Colombia, it is reported for the first time as a corticolous in xerophytic dry forests of La Guajira

**Specimens examined.** COLOMBIA: Guajira: Municipality of Uribia, Ranchería Mapuain; 1°45'N, 88°08'W, 100 m; dry forest; 29 November 2018, Feria and Hoyos X53-103-NV35 (CUVC).



**Figure 1.** *Dirina paradoxa* (A-B) and *Heterocyphelium triseptatum* (C-D). A, *D. paradoxa* habitus; B, section through apothecia with red–purple crystals reaction with lugol’s iodine; C, *H. triseptatum* habitus; and D, dark brown ascospores in *H. triseptatum*. Bar scale: A and C= 1mm, B and D= 10  $\mu$ m

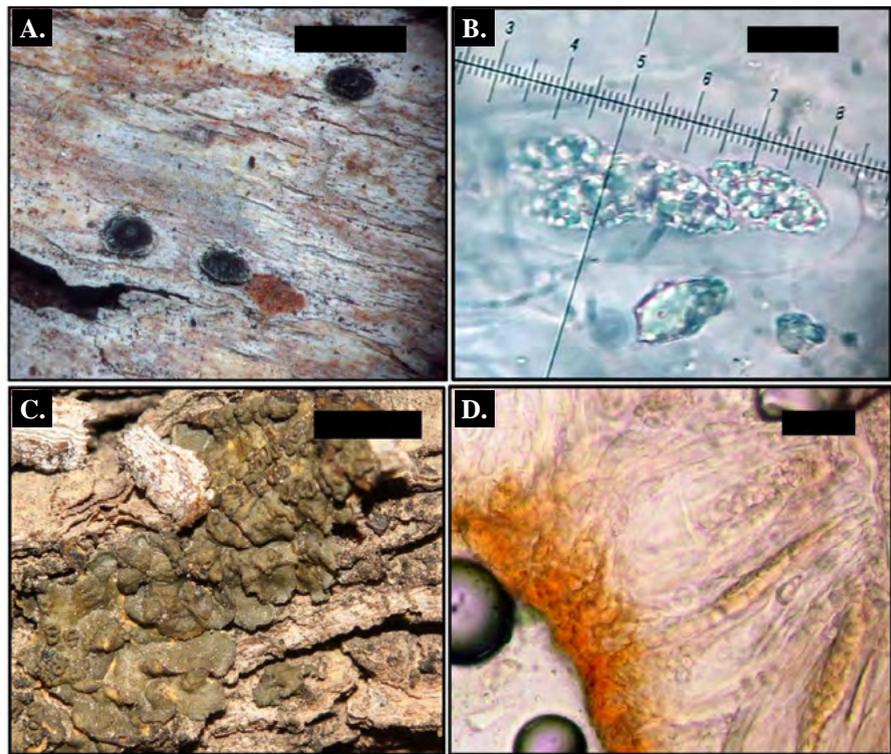
***Opegrapha aurantiaca* B. de Lesd.**

**Description.** *Thallus* corticolous, crustose, thin, smooth, green yellowish, with abundant yellow pruina, with indistinct prothallus. Photobiont green. *Apothecia* irregular with linear and branched shapes, only slightly raised above the thallus, 0.1–0.2 mm wide and 0.2–1.0 mm large; occasionally confluent, pale light grey throughout, with sparse yellow pruina, margins differentiated with abundant yellow pruina. *Excipulum* developed. *Hymenium* without gel, 65–72  $\mu$ m, IKI+ blue; paraphysoids anastomosing. *Asci* short ellipsoid to nearly globose, IKI-, dispersed in the hymenium, 30–50 x 18  $\mu$ m. *Ascospores* 8 per ascus, hyaline, clavate, 3-septate, 16–20 x 5  $\mu$ m, ends broadly rounded, wall and septum c. 1 mm thick. *Pycnidia* not observed.

(Fig. 3 A–D)

**Habitat and distribution.** On smooth bark of trees in secondary rainforest. Only known from Florida, Cuba and Brazil (Ertz, 2009)

**Specimens examined.** COLOMBIA: Valle del Cauca, El Dovio, corregimiento of Bitaco, 4° 29.419'N, 76° 20.968'W, 888 m alt., on bark of *Caliandra* sp., premontane cloud forest, 20 May 2019, E. Soto-Medina sn (CUVC 697373). 888 m



**Figure 2.** *Julella sublactea* (A-B) and *Peltula steppae* (C-D). A, *J. sublactea* habitus; B, ascus with ascospores; C, *P. steppae* habitus, and D, dark section through apothecia. Bar scale: A and C= 1mm, B and D= 10  $\mu$ m

***Peltula steppae* (Kalb) Büdel, Kauff and Bachran**

**Description.** *Thallus* corticolous, microfoliose, thin, smooth, lobes 1–2 mm large 0.5–1 mm wide, olive green to dark brown. *Photobiont* cyanobacteria. *Apothecia* sessile, laminar, cupuliform, thaline margin smooth, disc brown to dark brown, 0.4–0.9 mm diam. *Ascus* polysporus, hyaline, simple, subglobose, 3–5  $\times$  3–4  $\mu$ m (Fig. 1 D–F). **CHEMISTRY:** *Thallus* UV<sup>-</sup>, K<sup>-</sup>; *medulla* C<sup>-</sup>, K<sup>-</sup>, KC<sup>-</sup>.

(Fig. 2 C–D)

**Habitat and distribution.** *Peltula steppae* grows on bark in very dry ecosystems of South America (Ferraro and Michlig, 2011; Kalb, 2001). Previously it has been reported in Argentina, Ecuador, Paraguay and Venezuela (Kalb, 2001, Ferraro and Michlig, 2011). In Colombia, it is reported for the first time in very dry shrublands typical of the Guajira, which are dominated by plants of the Cactaceae and Fabaceae families.

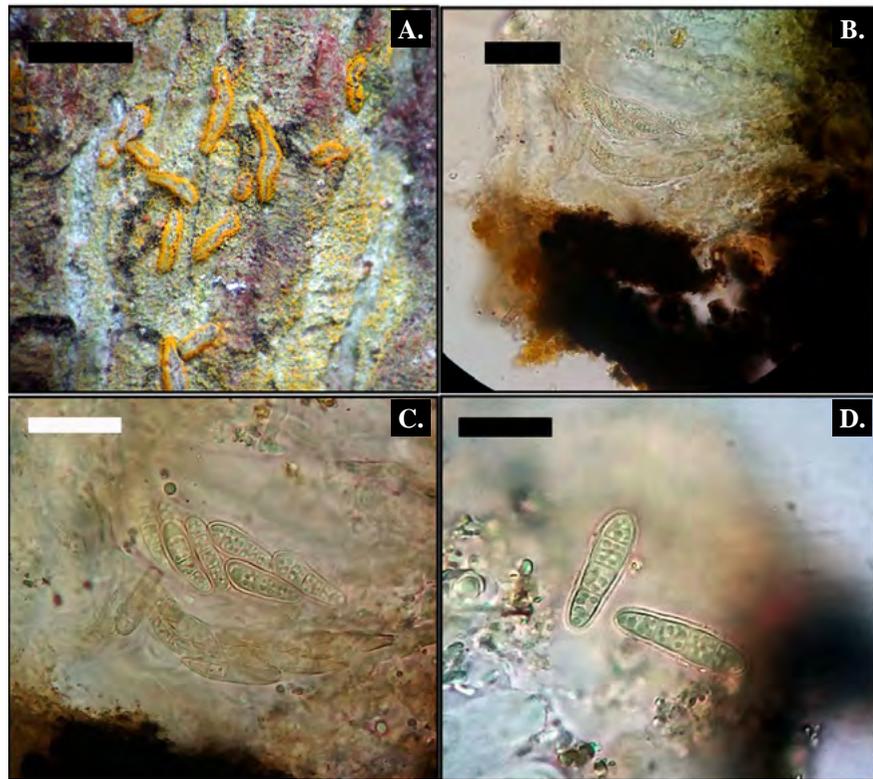
**Specimens examined.** COLOMBIA: Guajira, Municipality of Uribia, dry forest, Ranchería Wourre, 1°45'N, 88°08'W, 100 m. 29-11-2018. Feria e Hoyos PH29-NV10 (CUVC).

***Sarcographina cyclospora* Müll. Arg.**

**Description.** *Thallus* corticolous, crustose, mineral grey, thin, smooth. *Photobiont* trentepohlioid. *Ascomata* immersed in stromata; stromata white, immersed, irregularly rounded, 2–5 mm wide; lirelae thin, black, open, in irregular stellate clusters, 0.05–0.10 mm wide. Disc black to dark grey, white-pruinose. *Hymenium* 80–100  $\mu$ m thick, not interspersed. *Ascospores* 8 per ascus, ellipsoidal to globose, dark brown and irregularly 2  $\times$  2-locular, 10–13  $\times$  6–8  $\mu$ m, I<sup>-</sup>.

**CHEMISTRY:** *Thallus* UV<sup>-</sup>, K<sup>-</sup>; *medulla* C<sup>-</sup>, K<sup>-</sup>, KC<sup>-</sup> (no substances).

(Fig. 4 A–B).



**Figure 3.** *Opegrapha aurantiaca*. A, habitus; B, section through apothecia; C, ascus with 8 ascospores; D, Ascospores. Bar scale: A = 1mm, B, C and D= 10  $\mu$ m

**Habitat and distribution.** A very rare, corticolous species known thus far from north-eastern Australia, Sri Lanka and Vietnam. In Colombia, it is reported for first time as corticolous in tropical forests of the Chocó Biogeographic region.

**Specimens examined.** COLOMBIA: Valle del Cauca: El Dovio, corregimiento of Bitaco; 17°14'11"S, 65°49'02"W, 1300 m; premontane cloud forest, on bark of *Caliandra* sp., 20 May 2019, E. Soto-Medina s.n. (CUVC).

***Schistophoron tenue* Stirt.**

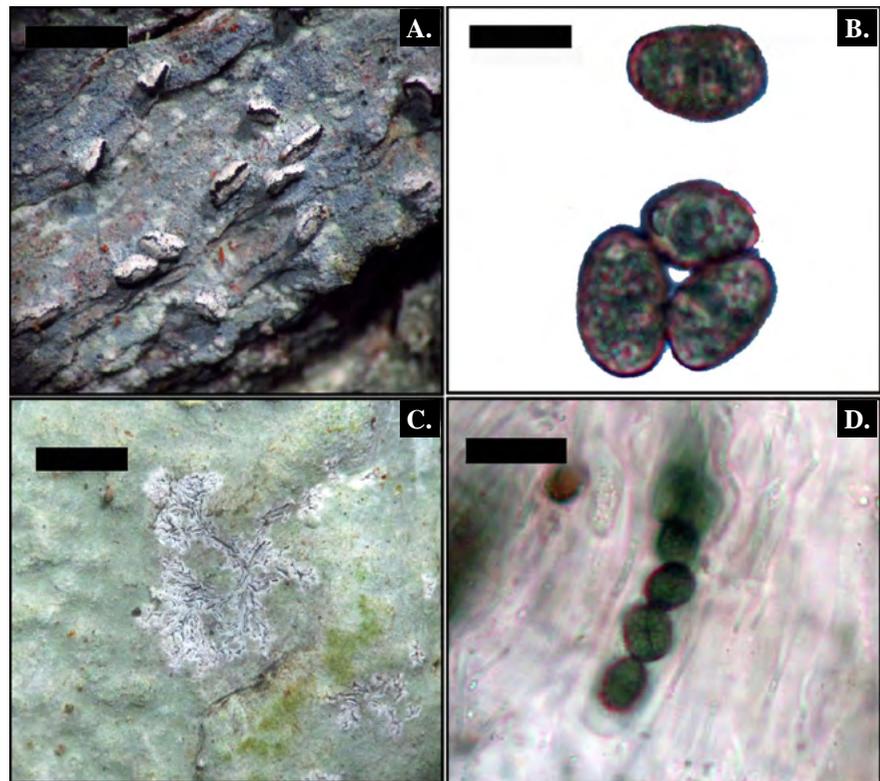
**Description.** *Thallus* corticolous, crustose, ecorticate, whitish. *Photobiont* trentepohlioid. *Ascomata* sessile, elliptical to shortly lirelliform, 0.2–0.3 mm wide, 0.3–1.2 mm long and 0.1–0.2 mm high, ostiole a black slit. *Ascospores* 8 per ascus, grey to blackish brown, globose, submuriform, with reticulate ornamentation, 10–12  $\times$  5–7  $\mu$ m. CHEMISTRY: *Thallus* UV–, K–; *medulla* C–, K–, KC– (no substances).

(Fig. 4 C–D)

**Habitat and distribution.** *Schistophoron tenue* has been registered in Mexico, Guatemala, Costa Rica, Brazil, French Guiana, Ecuador, Peru, and Argentina (Torres et al., 2020).

**Specimens examined.** COLOMBIA: Valle del Cauca: El Dovio, locality of Vitaco; 17°14'11"S, 65°49'02"W, 1300 m; premontane cloud forest, on bark of *Caliandra* sp., 20 May 2019, E. Soto-Medina s.n. (CUVC).

These findings highlight the importance of exploring dry ecosystems in Colombia, which are perhaps the most threatened areas in the country. These species could be used as indicators of contamination or anthropic disturbance since they were collected in conserved sites. *Sarcographina* was only reported from Asia and Oceania, which shows the complexity of the distribution of lichenized fungi.



**Figure 4.** *Sarcographina cyclospora* (A-B) and *Schistophoron tenue* (C-D). A, *Sarcographina cyclospora* habitus; B, asci with dark brown ascospores in *S. cyclospora*; C, *Schistophoron tenue* habitus, and D, ascospores in *S. tenue*.

### Author's contribution

ESM: sample review, manuscript writing and photography; RL: manuscript writing; AA: manuscript writing

### Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interest.

### References

- Aptroot, A.** (1991). A monograph of the Pyrenulaceae (excluding *Anthracothecium* and *Pyrenula*) and the Reuquenellaceae, with notes on the Pleomassariaceae, the Trypetheliaceae and *Mycomicrothelia* (lichenized and non-lichenized ascomycetes). *Bibliotheca Lichenologica*, 44, 1-178. <https://doi.org/10.1006/lich.1993.1035>
- Aptroot, A., Lücking, R., Sipman, H.J.M., Umaña, L., Chaves, J. L.** (2008). Pyrenocarpous lichens with bitunicate asci. A first assessment of the lichen biodiversity inventory in Costa Rica. *Bibliotheca Lichenologica*, 97, 1-162.
- Aptroot, A., Lücking, R.** (2016). A revisionary synopsis of the Trypetheliaceae (Ascomycota: Trypetheliales). *The Lichenologist*. 48(6), 763-982. <https://doi.org/10.1017/S0024282916000487>
- Aptroot, A., Feuerstein, S.C., Cunha-Dias, I.P.R., Nunes, A.R.L., Honorato, M.E., Cáceres, M.E.S.** (2017). New lichen species and lichen reports from Amazon Forest remnants and Cerrado vegetation in the Tocantina region, northern Brazil. *The Bryologist*. 120, 320-328. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-120.3.320>
- Aptroot, A., Spielmann, A.** (2020). New lichen species and records from the Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul, Brazil, the westernmost Atlantic rain forest. *Archive for Lichenology*, 17, 1-26

- Ertz, D.** (2009). Revision of the corticolous Opegrapha species from the Paleotropics. *Bibliotheca Lichenologica*, 102, 1-176.
- Esslinger, T.L.** (2019). A cumulative checklist for the lichen-forming, lichenicolous and allied fungi of the continental United States and Canada, version 23. *Opuscula Philolichenum*, 18, 102-378.
- GBIF.org** (2019). GBIF Occurrence Download. Available from <https://doi.org/10.15468/dl.qawcaf> 12 April 2019).
- Guzow-Krzemińska, B., Flakus, A., Kosecka, M., Jabłońska, A., Rodríguez-Flakus, P., Kukwa, M. N.** (2019). New species and records of lichens from Bolivia. *Phytotaxa*, 397(4), 257-279. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.397.4.1>
- Jaklitsch, W., Baral, H.O., Lücking, R., Lumbsch, H.T.** (2016). Ascomycota. In: Syllabus of Plant Families: Adolf Engler's Syllabus der Pflanzenfamilien (Frey W, ed.). 1(2), 1-322. Stuttgart: Borntraeger Science Publishers. <https://doi.org/10.1017/S0024282916000669>
- Kalb, K.** (2001). New or otherwise interesting lichens. I. *Bibliotheca Lichenologica*, 78, 141-167.
- Lücking R., Nelsen M.P., Aptroot A., Barillas De Klee R., Bawingan P.A., Benatti M. N., Binh N. Q., Bungartz F., Cáceres, M.E.S., Canêz L.S., Chaves, J.-L., Ertz, D., Esquivel, R.E., Ferraro, L.I., Grijalva, A., Gueidan, C., Hernández M. J.E., Knight, A., Lumbsch, H.T., ... Ventura, N.** (2016). A phylogenetic framework for reassessing generic concepts and species delimitation in the lichenized family Trypetheliaceae (Ascomycota: Dothideomycetes). *The Lichenologist*, 48 (06), 739-762. <https://doi.org/10.1017/S0024282916000505>
- Lücking, R., Rivas-Plata, E., Chaves, J., Umaña, L., Sipman, H.J.** (2009). How many tropical lichens are there... really? *Bibliotheca Lichenologica*, 10, 399-417.
- Lücking, R., Moncada, B., Martínez-Habibe, M.C., Salgado-Negret, B. E., Celis, M., Rojas-Zamora, O., Rodríguez-M, G. M., Brokamp, G., Borsch, T.** (2019) Lichen diversity in Colombian Caribbean dry forest remnants. *Caldasia*, 41(1), 194-214. <https://dx.doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.71060>
- Lücking, R., Moncada, B., Soto-Medina, E., Simijaca, D. M., Sipman, H. J.** (2021). Actualización nomenclatural y taxonómica del Catálogo de Líquenes de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(174), 147-189. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1266>
- Ramos-Pérez, J. E., Silverstone Sopkin, P. A.** (2018). Catálogo de la flora relictual del valle geográfico del río Cauca. St. Louis, Missouri Botanical Garden Press. 205p.
- Roux, C. and Association française de lichénologie.** (2014). Catalogue des lichens et champignons lichénicoles de France métropolitaine. Association française de lichénologie; Henry des Abbayes).
- Sipman, H., Aptroot, A.** (2001). Where are the missing lichens? *Mycological Research*, 105(12), 1433-1439. <https://doi.org/10.1017/S0953756201004932>
- Torres, J.M., Spielmann, A.A., Aptroot, A., Cardoso, K.F., Honda, N.K.** (2020). The lichen genus Schistophoron Stirt.(Ascomycetes, Graphidaceae) in Brazil with a world key to the species. *Cryptogamie, Mycologie*. 41(13), 211-217. <https://doi.org/10.5252/cryptogamie-mycologie2020v41a13>
- Tehler, A., Ertz, D. Irestedt, M.** (2013). The genus Dirina (Roccellaceae, Arthoniales) revisited. *The Lichenologist*, 45(4), 427-476. <https://doi.org/10.1017/S0024282913000121>

Artículo original

## El avance de la línea de costa de las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande y la construcción de la Escollera en 1758 en Cartagena de Indias

### The advance of the coastline of the peninsulas of Bocagrande and Castillogrande and the construction of the Breakwater in 1758 in Cartagena de Indias

✉ Carlos Alberto Andrade-Amaya<sup>1,\*</sup>, ✉ Richard Guzmán-Martínez<sup>2</sup>,  
✉ Diana María Quintana-Saavedra<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo Asesor del Comando de la Armada Nacional de Colombia, Cartagena, Colombia

<sup>2</sup> Grupo de Investigación de Patrimonio Cultural Sumergido, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Dirección General Marítima de Colombia, Cartagena, Colombia

## Resumen

Se reconstruyeron los paisajes arqueológicos sumergidos frente a la costa de Cartagena de Indias con base en datos batimétricos multihaz de alta resolución provenientes del Servicio Hidrográfico de la Dirección General Marítima de Colombia y la comparación de mapas históricos de 1772, 1854, 1935, 1995 y 2021. Se demuestra que la construcción de la escollera de Bocagrande ha significado la acreción del terreno en este punto en cerca de 44,4 Ha, y que los espolones colocados en la playa en el siglo pasado lo han sostenido.

**Palabras clave:** Bahía de Cartagena; Escollera; Bocagrande; Línea de costa.

## Abstract

The submerged archaeological landscapes off the coast of Cartagena de Indias were reconstructed based on high-resolution multibeam bathymetric data from the Hydrographic Service of the General Maritime Directorate of Colombia and on the comparison of historical maps from 1772, 1854, 1935, 1995, and 2021. We show that the construction of the Bocagrande breakwater has meant the accretion of around 44,4 Ha of land in Bocagrande and the spurs placed on the beach in the last century have sustained it.

**Keywords:** Cartagena Bay; La Escollera; Bocagrande; Coastline change.

## Introducción

Bocagrande se sitúa sobre la península que se extiende al suroeste del casco amurallado del centro de Cartagena de Indias y constituye una infraestructura urbana relativamente moderna (**Figura 1**). La ciudad está dividida en tres localidades: histórica y del caribe norte (162 Km<sup>2</sup>), de la Virgen y turística (371 Km<sup>2</sup>) e industrial y de la bahía (89 Km<sup>2</sup>). Las localidades se dividen en unidades comuneras de gobierno (UCG) urbanas y rurales en las cuales se agrupan los distintos barrios de la ciudad (183), siendo el sector de Bocagrande, Laguito, Castillogrande y Centro Histórico la unidad número 1 (**Dau**, 2020). La población que habitaba en esta UCG en el 2018 era de 83.728 habitantes (**Dau**, 2020) frente a una población total de Cartagena de 1.003.685 (2019) (**Dane**, 2020).

Cartagena ha sufrido muchos cambios con el tiempo, principalmente debido al depósito de las arenas que provienen de la boca del río Magdalena (**Andrade**, 1993; **Andrade et al.**, 2013) y cuyo balance neto (acumulaciones y erosiones) ha modelado la forma de la península de Bocagrande.

**Citación:** Andrade-Amaya CA, Guzmán-Martínez R, Quintana-Saavedra DM. El avance de la línea de costa de las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande y la construcción de la Escollera en 1758 en Cartagena de Indias. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 46(180):758-768, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1722>

**Editor:** Carlos Alberto Vargas Jiménez

**\*Correspondencia:**

Carlos Alberto Andrade-Amaya;  
candrade@costa.net.co

**Recibido:** 29 de junio de 2022

**Aceptado:** 31 de agosto de 2022

**Publicado en línea:** 19 de septiembre de 2022



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



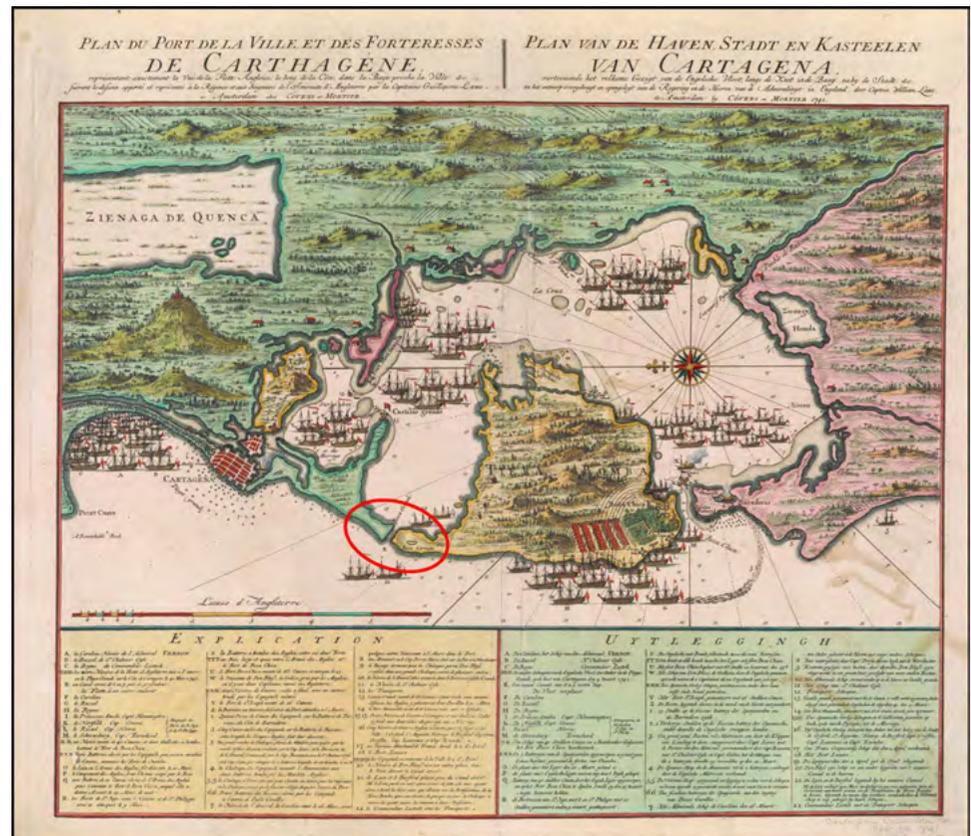
**Figura 1.** El área de Bocagrande en el contexto de la bahía de Cartagena de Indias (tomada de GoogleEarth, 2021)

En ese contexto ha sido de particular interés la lengua de arena que solía comunicar Bocagrande con la isla de Tierrabomba, la cual ya no existe. Actualmente hay cerca de dos kilómetros entre estos dos sitios. De esta barra de arena se sabe que no existía cuando Francis Drake atacó la ciudad, ya que en la descripción de su ataque en 1586 se dice que entró y desembarcó por Bocagrande (**de Bry, 1599**). Un siglo después se documentó que Bocagrande y Tierrabomba estaban unidas por una barra de arena, como aparece en los mapas que ordenó el Barón de Pointis (**Figura 2**) para su ataque a la ciudad en 1697 (**Arrazola, 1961**).

En 1741, casi 50 años después, los mapas ordenados por el servicio de inteligencia británico para el ataque a la Bahía de Cartagena muestran que había un canal abierto en dicha lengua de arena (**Figura 3**), que se describe como pequeño para ser utilizado por el atacante. Ese canal se amplió rápidamente y, a la llegada de los ingenieros que repararon las defensas de la bahía luego del retiro de la escuadra inglesa, la arena había desaparecido casi en su totalidad y Bocagrande estaba totalmente abierta. Esta situación se consideró de gran vulnerabilidad y por esa razón se construyó una escollera submarina, que siguió la dirección natural del cordón de arena. En la medida en que la construcción fue creciendo desde Bocagrande hacia la isla de Tierrabomba, la arena que llegaba a la escollera empezó



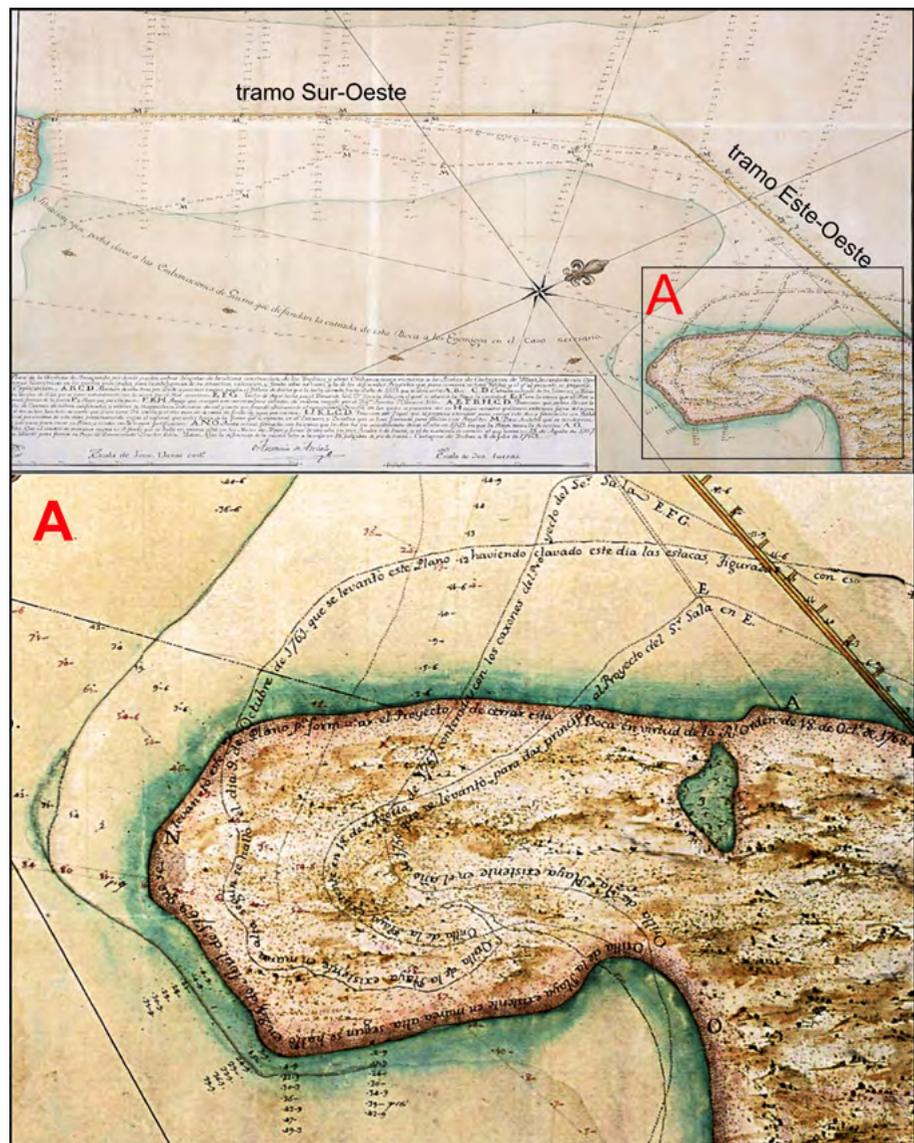
**Figura 2.** Planos de Cartagena de Indias hechos por la escuadra francesa a las órdenes del Barón de Pointis en 1697 donde se aprecia que Bocagrande y Tierrabomba se encontraban unidas (**Bouquet & Aubert, 1793-1820**)



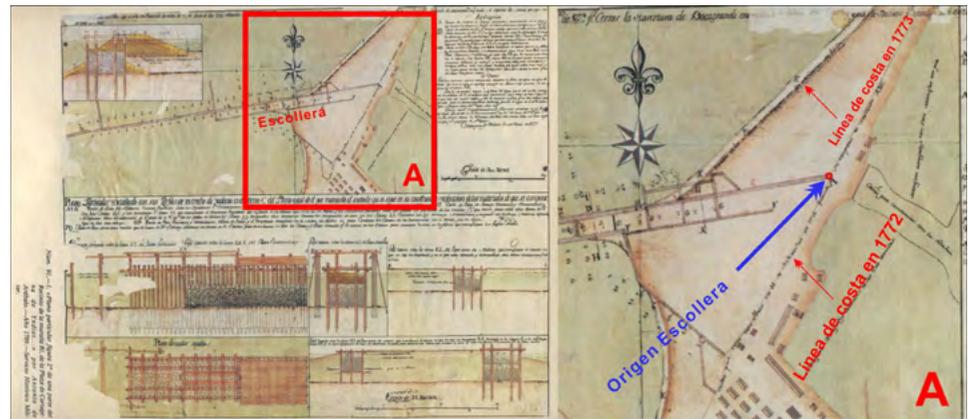
**Figura 3.** Plano de la bahía de Cartagena (**Laws, 1741**) hecho por el servicio de inteligencia inglés del Almirante Vernon para la toma de la Bahía. En el plano se puede ver que la cinta de arena entre Bocagrande y Tierrabomba está separada por un pequeño canal.

a acumularse en la parte continental. Los ingenieros siguieron con detalle los cambios que sufría dicha línea de costa a lo largo del tiempo y los dejaron plasmados en sus planos (**Figura 4**).

La escollera de Bocagrande fue construida entre 1771 y 1778. El proyecto de **Antonio de Arebalo** realizado por orden Real de 15 de octubre de 1764, consistía en cuatro líneas de pilotes paralelos hincados en el fondo del mar a lado y lado de la barra de arena que aún existía, conformando cajones que posteriormente se rellenaron con piedras: una primera capa de piedra pequeña, una segunda de un tamaño mayor y la parte superior coronada con rocas de gran tamaño, como se ve en las gráficas del plano del año 1789 (**Figura 5**). Conforme pasó el tiempo, la escollera actuó como un gran espolón que permitió el avance y la estabilización de una nueva línea de costa sobre el sector de Bocagrande, evento que ha llamado la atención de la comunidad científica desde hace tiempo (**Vernette et al., 1984; Vernette et al., 1977**).



**Figura 4.** El plano para la construcción de la escollera de Bocagrande hecho en 1769 por Antonio de Arebalo cuando se perdió totalmente la lengua de arena entre las islas. En el recuadro inferior se indica el movimiento de la línea de la playa de manera cronológica.



**Figura 5.** Plano particular detallado de la construcción de la escollera por Antonio de Arebalo en 1789. Detalle de la construcción de la escollera. Se inició por la playa que en ese momento existía frente a los manglares que conformaban la península de Bocagrande en 1771.

## Metodología

### Fuentes cartográficas

En el marco del proyecto de registro nacional del patrimonio cultural sumergido de Colombia, liderado por la Dirección General Marítima, se revisó una serie de mapas antiguos cuya precisión y autoría explícita fueron suficientes para hacer comparaciones formales mediante mediciones basadas en las características de cada uno de los documentos. Se reconocieron puntos comunes en todos ellos utilizando georreferenciación (Cerezo, 2011) y después superponiendo los diferentes paisajes en el tiempo.

Con base en la estructura de la escollera submarina, claramente definida en los documentos históricos escogidos y en el levantamiento multihaz más reciente del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, así como a partir de otros puntos, se determinó la acumulación de arena y el avance de la línea de costa en cada uno de los momentos definidos en el tiempo en los documentos encontrados y a partir de la información histórico-arqueológica y oceanográfica (Ryan & Macgrath, 2008/2009).

En la georreferenciación de los planos y cartas (Tabla 1) se empleó una imagen satelital del 2021 en la cual se plasmaron los siguientes puntos de control: Geo1, (Baluarte de Santo Domingo), Geo2, (Santa Clara), Geo3 (Fuerte de San Sebastián de Pastelillo), Geo4 (Fuerte de Manzanillo), Geo 5 (Fuerte de Santa Cruz de Castillo Grande), y otros sobre la escollera (Geo6, Geo7 y Geo 8), como se indica en la figura 6.

**Tabla 1.** Planos, cartas e imágenes empleadas para la comparación y georreferenciación de la escollera sumergida y el sector de Bocagrande

	Descripción	Autor/Origen	Año
1	Plano de la abertura (sic) de Bocagrande	Antonio de Arebalo	1769
2	Planos y perfiles que manifiestan el estado en que quedan concluidas las dos escolleras	Antonio de Arebalo	1778
3	Carta náutica de la bahía de Cartagena	The British Admiralty	1854
4	Carta náutica de la bahía de Cartagena	U.S. Naval Hydrographic Office	1935
5	Carta náutica de la bahía de Cartagena	U.S. Naval Hydrographic Office	1995
6	Imagen satelital de la bahía de Cartagena	GoogleEarth®	2021



**Figura 6.** El sector de Bocagrande de Cartagena de Indias. En la imagen las diferentes líneas de costa así: 1769 amarillo; 1778: azul; 1854: roja; 1935: verde; 2021: azul marino y los puntos de control utilizados en el presente estudio

La imagen de la superficie batimétrica se obtuvo con una ecosonda multihaz de alta resolución procesada en Caris Hips & Sips®, Hypack® y ARCMAP®. Para el análisis de la línea de costa, se digitalizaron las líneas de costa en los planos seleccionados en el estudio (Tabla 1). Posteriormente, se almacenaron las imágenes en los programas ya citados y se generó una superposición de las imágenes para finalmente iniciar el proceso de análisis y cálculos, con el fin de establecer la evolución de la línea de costa de Bocagrande en 1769, 1778, 1854, 1935 y 2021. En la figura 6 se plasma cada una de las líneas de costa con un color diferente para diferenciarlas.

## Resultados

### *Descripción de la evolución histórica de la línea de costa*

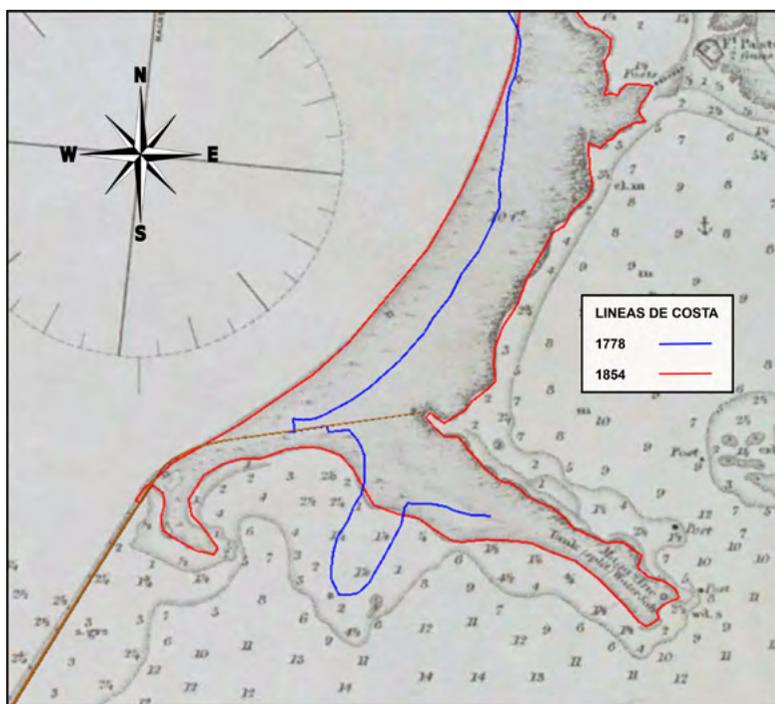
*Análisis de la evolución de la línea de costa entre 1769 y 1778.* Se puede observar cómo la línea de costa original en el plano de 1769 avanzó hacia el mar, atrapando arena que empezó a cubrir el elemento oblicuo de la escollera (Figura 7).

*Análisis de evolución de la línea de costa entre 1778 y 1854.* Desde su construcción, la escollera de Bocagrande se convirtió en una trampa para la arena captada en su costado externo, especialmente, de tal manera que avanzó y la cubrió en su totalidad desde el centro amurallado hasta la curva donde la estructura cambia de dirección este-oeste al suroeste y remata en una flecha litoral que se hoy se conoce como El Laguito. En el plano de 1854 (Figura 8) aparece superpuesta la línea de costa de 1778 y de esa forma se evidencia su avance como resultado de la instalación de la escollera.

*Análisis de evolución de la línea de costa entre 1854 y 1935* En la figura 9 se nota claramente que durante esta época hubo un retroceso de la línea de costa, que se modificó ligeramente en decenas de metros con la colocación de los primeros espolones a principios del siglo pasado.

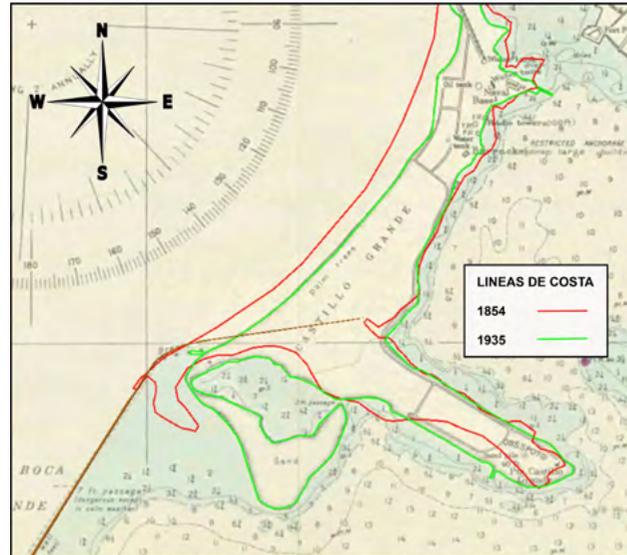


**Figura 7.** Detalles de la construcción de la escollera en el costado de Bocagrande sobre el plano de Arebalo (1778) superpuesto a una imagen satelital actual. Obsérvese el cambio de la línea de costa medido por los constructores desde 1769.

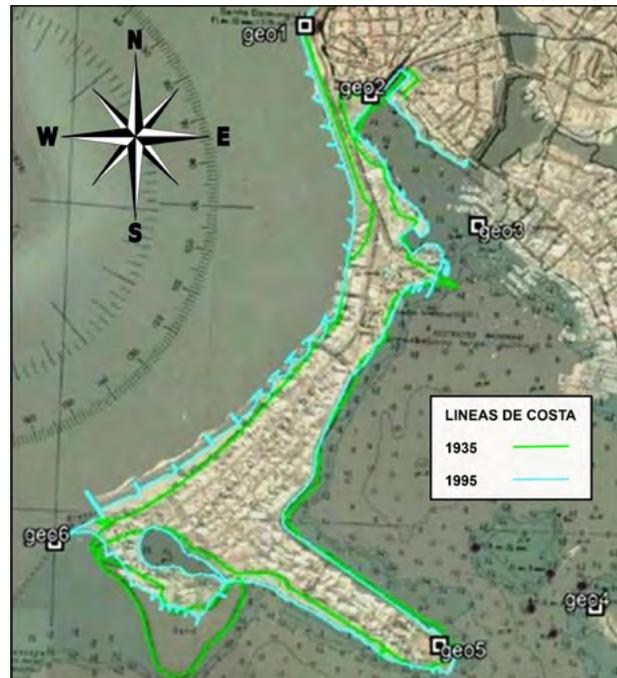


**Figura 8.** La línea de costa cartografiada en 1778 (en azul) que solo cubre la parte occidental y en 1854 (en rojo). La escollera se sobrepuso en color ocre. Obsérvese el avance de la línea de costa medido por el almirantazgo británico en 1854. También es evidente la flecha litoral que se formaba en donde se encontraba la punta más distal al suroeste.

*Análisis de evolución de la línea de costa entre 1935 y 1995.* La **figura 10** muestra el avance hacia el mar de la línea de costa como fruto de la construcción de la batería de espolones de piedra perpendiculares a la playa de la época, lo cual ha resultado en una relativa estabilización de lo que ahora son las playas de Bocagrande y en particular del área de El Laguito. La línea de costa no se ha movido significativamente desde que se instalaron dichas estructuras de piedra.



**Figura 9.** Fracción de la carta náutica realizada por la Armada de los Estados Unidos en la bahía de Cartagena durante 1935. En rojo la línea de 1854 y en verde la línea de 1935.



**Figura 10.** Análisis de la línea de costa empleando las cartas náuticas de la Armada de los Estados Unidos de 1935 y la de 1995. En esta figura es evidente la franja de arena que resultó de la construcción del grupo de espulones en la década de 1960 y la estabilización de El Laguito en la forma definitiva.

## Discusión

La evolución de la línea de costa de Bocagrande ha sido documentada a partir de su construcción, como puede verse en los planos de la obra de junio de 1769 (**Figura 4**). Desde finales del siglo pasado se han seguido las distintas formas que ha tomado la flecha litoral de El Laguito (**Vernette et al., 1977**), así como el avance de la línea de costa de Bocagrande (**Gómez & Carvajal, 2011**), y se han registrado los cambios de las formas.

Al haber encontrado una estructura sólida donde depositarse y asentarse, la escollera se convirtió en la trampa que permitió la acumulación y depósito permanente de arenas, lo que significó un cambio muy importante en la península de Bocagrande, con un importante aumento de su tamaño.

La visualización de los cambios en la línea de costa de Bocagrande, El Laguito y la península de Castillogrande evidencia cómo la gran transformación que ha sufrido la geografía de esta parte de la ciudad de Cartagena de Indias se debe principalmente a la construcción de la escollera de Bocagrande (**Figura 11**).

En términos de distancias, se calcula que la escollera se amplió desde la costa de Bocagrande, primero hacia el suroeste, en 622 m de longitud sepultados bajo las playas en ese sector y luego se hizo una curva de 1.914 m de longitud orientada hacia la punta norte de la isla de Tierrabomba, que hoy se encuentra sumergida. Es decir, se trató de una ampliación de un total de 2.536 m.



**Figura 11.** En amarillo, las penínsulas de Bocagrande y Castillo Grande calculadas a partir de los planos de Arebalo de 1769 al inicio de la construcción de la escollera (línea blanca) superpuestas a una imagen de 2021 tomada de GoogleEarth®, cuya línea de costa (en azul) resalta el área de terreno ganado principalmente por la construcción de la escollera y de forma secundaria por las baterías de espolones posteriores, cuyos tamaños son cortos en comparación.

Solamente en el área de Bocagrande, la ganancia en términos del terreno resultante del proceso aquí descrito es de alrededor de 44,4 Ha. No se pudo establecer lo mismo en el caso del terreno de El Laguito en la forma actual y del avance de los terrenos del costado sur de Castillo Grande, porque estos han sido producto de varios esfuerzos que han incluido diversos espolones y rompeolas recientes a lo largo de esa línea de costa, como se evidencia en la **figura 11**. Si bien es cierto que en el siglo pasado (entre 1950 y 1990), se colocaron espolones a lo largo de la costa de Bocagrande que facilitaron el avance de la línea de costa algunos metros, dicho avance no se compara con el resultado de la construcción de la escollera de Bocagrande.

En síntesis, para la línea de costa externa de Bocagrande la construcción de la escollera significó un obstáculo en el que se apoyaron y estabilizaron las arenas en una cantidad calculada en 44,4 Ha adicionales a las existentes en 1769. Dicha línea de costa se ha venido reforzando con nuevas estructuras que tienen como objeto proteger esta área ganada al mar por la escollera, pues constituye una de las zonas más importantes para la finca raíz y el turismo de Colombia.

## Agradecimientos

Este artículo hace parte del proyecto del Grupo de Investigación sobre Patrimonio Cultural Sumergido de Colombia financiado por la Dirección General Marítima y la Armada Nacional. Los autores expresan su agradecimiento al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, al Servicio Hidrográfico Nacional y en especial, al Capitán de Navío Hermann León, la Capitán de Corbeta Alexandra Chadid por su apoyo durante el desarrollo del presente trabajo y a los revisores de la revista de la Academia por sus amables y acertados comentarios y correcciones.

## Contribución de los autores

RG: acopio y georreferenciación de los mapas; DMQ: acopio de documentos antiguos y análisis del proceso; CA: trabajó en la interpretación y análisis oceanográfico y del proceso costero. Todos los autores colaboraron en la elaboración de los textos presentados.

## Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener ningún conflicto de intereses relacionado con el desarrollo y la autoría del presente documento.

## Referencias

- Andrade, C.A., Thomas, Y.F., Lerma, N., Durand P., Anselme, B.** (2013) Coastal Flooding Hazard Related to Storm Surge Events in Cartagena de Indias, Colombia, *Journal of Coastal Research*, 29 (5), 1126-1136. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00028.1>
- Andrade, C.A.** (1993) Análisis de la velocidad del viento en el Mar Caribe con datos de GEOSAT. *Boletín Científico CIOH*, (13), 33-44. <https://doi.org/10.26640/22159045.53>
- Arrazola, R.** (1961). Historial de Cartagena, 3ª Edición, Roberto Arrazola Ed., Cartagena, Colombia, 342 pp.
- Bouclet, S., Aubert, L.** (1793-1820) Prise de Carthagene des Indes par l'Escadre Francaise aux Ordres de Pointis en 1697. Mapa, MA000007565, Biblioteca Digital Hispánica.
- Cerezo, F., Becario, A.** (2013) Paisajes culturales marítimos: georreferenciación de planos históricos, I Congreso de Arqueología Náutica y Subacuática Española Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Universidad de Murcia, Cartagena, FPI, BES-2012-054481, marzo de 2013.
- Dane.** (2020). La información del DANE en la toma de decisiones de las ciudades capitales. Fecha de consulta: 29 de octubre de 2021. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/planes-desarrolloterritorial/030220-Info-Alcaldia-Cartagena.pdf>
- Dau, W.** (2020). Plan de desarrollo Cartagena 2020/2023. Fecha de consulta: 29 de octubre de 2021. Disponible en: <https://www.cartagena.gov.co/Documentos/2020/Transparencia/TyALaIP/Planeacion/PlanesDeDesarrollo/2020-2023/1.Diagnostico.pdf>

- de Arebalo, A.** Mapa de Cartagena –8 junio 1769. Plano No.63 en: Servicio Histórico Militar (1980). Servicio Geográfico Ejército de España, Servicio Geográfico del Ejército, Cartografía y Relaciones Históricas de Ultramar. Volumen V, Colombia-Panamá-Venezuela, Carta Descriptiva, España, 642 pp, Madrid.
- de Arebalo, A.** (1980). Mapa de Cartagena –30 enero 1773. Plano No. 91 en: Servicio Histórico Militar. Servicio Geográfico Ejército de España, Servicio Geográfico del Ejército, Cartografía y Relaciones Históricas de Ultramar. Volumen V, Colombia-Panamá-Venezuela, Carta Descriptiva, España, 642 pp, Madrid.
- de Arebalo, A.** (1980). Plano y perfiles que manifiestan el estado en que quedan concluidas las dos escolleras (Bocagrande) –30 junio 1778 en: Plano No.77, Servicio Histórico Militar. Servicio Geográfico Ejército de España, Servicio Geográfico del Ejército, Cartografía y Relaciones Históricas de Ultramar. Volumen V, Colombia-Panamá-Venezuela, Carta Descriptiva, España, 642 pp, Madrid
- De Bry, T.** (1599). Franciscvs Draco Carthagenam civitatem expvgnat, en *Americae Pars VIII*, Ed. Matthias Becker, Frankfurt.
- Gómez-Pretel, W., Carvajal-Díaz, A. F.** (2011). Estrategia para la defensa y ubicación de las fortificaciones de la plaza fuerte de Cartagena de Indias en el siglo XVIII a partir de condiciones océano-atmósfera y variaciones morfológicas en la línea de costa. *Saber, Ciencia Y Libertad*, 6 (2), 179-192. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2011v6n2.2506>
- Laws, W.** (1741) Plan du port de la Ville et des Forteresses de Carthagene = Plan van de Haven Stadt en Kasteelen van Cartagena: représentant exactement la Vue de la Flotte Angloise, le long de la Côte, dans la Baye proche la Ville c. suivant le dessein apporté et re, Mapa, G5294 .L3 1741 Osher Map Library, U. of Southern Maine.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J.** (2005) *Geographic Information Systems and Science*. New York: Wiley, 2005, 2a. Ed. 1101 pp.
- Parsons, M.J.** (1854) Carta náutica CARTAGENA HARBOUR, abordo HMS Scorpion, escala 1/29000, UK Admiralty Hydrographic Office, London.
- Ryan, M.S., Macgrath, J.P.** (2008/2009) Search for the Bonhomme Richard Using Computer Modeling and Submarine Technologies. *Marine Technology Society Journal*, 42 (4), 57-63.
- U.S. Naval Hydrographic Office.** (1995). Carta Náutica 24505. Bahía de Cartagena, Escala 1:20000.
- Vernette, G., Lesueur, P., Klingebiel, A.** (1984). Evolución morfológica y sedimentológica de la flecha litoral del Laguito, (Bahía de Cartagena - Colombia). *Boletín Científico CIOH*, 5 (5), 3-23. [https://doi.org/10.26640/01200542.5.3\\_23](https://doi.org/10.26640/01200542.5.3_23)
- Vernette, G., Buitrago, J., Campos, N., Llano, M.** (1977). Variaciones Morfológicas de las Costas de la Bahía de Cartagena a partir del siglo XVI. *Boletín Científico CIOH*, 1, 21-40. <https://doi.org/10.26640/22159045.5>
- Westley, K., Quinn, R., Forsythe, W.** (2010) Mapping Submerged Landscapes Using Multibeam Bathymetric Data: a case study from the north coast of Ireland. *The International Journal of Nautical Archaeology* [en línea], 1-14.

Artículo original

## Implicaciones metodológicas e inconsistencias de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático de Colombia

### Methodological implications and inconsistencies of Colombia's Third National Communication on Climate Change

Paola A. Arias<sup>1,\*</sup>, Laura D. Villegas<sup>1</sup>, Oscar J. Mesa<sup>2</sup>, José D. Pabón<sup>3</sup>,  
Jacobó Arango<sup>4</sup>, Santiago Arango-Aramburo<sup>2</sup>, Dolors Armenteras<sup>5</sup>, Lina Berrouet<sup>6</sup>,  
Rolando Barahona<sup>7</sup>, Janet Barco<sup>8</sup>, Yuley Cardona<sup>2</sup>, Yesid Carvajal-Escobar<sup>9</sup>,  
Lina I. Ceballos-Bonilla<sup>10</sup>, Wilmar L. Cerón<sup>11</sup>, Jaime H. Escobar<sup>12</sup>,  
Catalina González<sup>13</sup>, Isabel C. Hoyos<sup>14</sup>, Natalia Hoyos<sup>12</sup>, Carlos Jaramillo<sup>15</sup>,  
Giovanni Jiménez-Sánchez<sup>16</sup>, J. Alejandro Martínez<sup>17</sup>, Germán Poveda<sup>2</sup>,  
Benjamín Quesada<sup>18</sup>, Estela Quintero-Vallejo<sup>19</sup>, Ángela M. Rendón<sup>1</sup>,  
Daniel Ruiz-Carrascal<sup>20</sup>, Alejandro Salazar<sup>21</sup>, Juan F. Salazar<sup>1</sup>, Adriana Sánchez<sup>22</sup>,  
Sara C. Vieira<sup>1</sup>, Juan Camilo Villegas<sup>6</sup>, Clara Villegas-Palacio<sup>2</sup>, Manuel D. Zuluaga<sup>2</sup>

**Citación:** Arias PA, Villegas LD, Mesa OJ, *et al.* Implicaciones metodológicas e inconsistencias de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):769-794, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1705>

**Editor:** Andrés Cárdenas Rozo

**\*Correspondencia:**

Paola A. Arias; [paola.arias@udea.edu.co](mailto:paola.arias@udea.edu.co)

**Recibido:** 18 de junio de 2022

**Aceptado:** 7 de septiembre de 2022

**Publicado en línea:** 23 de septiembre de 2022



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

<sup>1</sup> Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

<sup>2</sup> Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Colombia

<sup>3</sup> Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Bogotá, D.C., Colombia

<sup>4</sup> Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Palmira, Colombia

<sup>5</sup> Grupo de Ecología del Paisaje y Modelación de Ecosistemas, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Bogotá, D.C., Colombia

<sup>6</sup> Grupo de Investigación en Ecología Aplicada, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

<sup>7</sup> Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Colombia

<sup>8</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia

<sup>9</sup> Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), Universidad del Valle, Cali, Colombia

<sup>10</sup> Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), Proyecto del Área Metropolitana Del Valle de Aburrá, Medellín, Colombia

<sup>11</sup> Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad del Valle, Cali, Colombia

<sup>12</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

<sup>13</sup> Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

<sup>14</sup> Facultad de Ciencias Básicas y Tecnologías, Programa de Física, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

<sup>15</sup> Smithsonian Tropical Research Institute, Ciudad de Panamá, Panamá

<sup>16</sup> Fuerza Aérea Colombiana, Bogotá, Colombia

<sup>17</sup> Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

<sup>18</sup> Programa de Ciencias del Sistema Tierra, Grupo de Investigación en Interacciones Clima-Ecosistemas (ICE), Facultad de Ciencias Naturales, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia

<sup>19</sup> Facultad de Ciencias y Biotecnología, Universidad CES, Medellín, Colombia

<sup>20</sup> Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, Columbia University in the City of New York, USA,

<sup>21</sup> Facultad de Ciencias Ambientales y Forestales, Universidad Agrícola de Islandia, Reykjavík, Islandia

<sup>22</sup> Programa de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia

## Resumen

Las Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático (CNCC) son un mecanismo para que los países informen sus avances en mitigación y adaptación, y constituyen uno de los elementos de base para la política sobre cambio climático a escala nacional. Colombia ha emitido tres CNCC. La tercera plantea un escenario que considera las proyecciones de diversos modelos incluidos en la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project*, CMIP), el cual se estima como el promedio de las proyecciones correspondientes a las cuatro trayectorias de concentración representativa (*Representative Concentration Pathways*, RCP) presentadas en el quinto reporte de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cada una de estas RCP representa una trayectoria de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) para un escenario particular de crecimiento poblacional, económico y tecnológico que conduce a una posible trayectoria de evolución del sistema climático. En este estudio se comparan las proyecciones presentadas en la Tercera CNCC con las obtenidas directamente de los modelos empleados. Nuestros resultados demuestran que al utilizarse un promedio de RCP se pierden escenarios alternos que podrían ser importantes a la hora de considerar posibles futuros diferentes y anulan la utilidad de plantear diversas trayectorias de emisiones de GEI. Más aun, una comparación entre la Segunda y la Tercera CNCC muestra proyecciones de precipitación opuestas para diferentes regiones del país, lo cual es de particular importancia, pues el escenario de cambio climático planteado en la Tercera CNCC sirve de referencia para la toma de decisiones en materia de cambio climático a nivel nacional.

**Palabras clave:** Cambio climático; Comunicaciones nacionales de cambio climático (CNCC); Proyecciones climáticas, Escenario de cambio climático de Colombia; CMIP5.

## Abstract

The National Communications on Climate Change (NCCC) are a mechanism for countries to report on their progress in mitigation and adaptation, and are a basis for climate change policy at the national level. Colombia has issued three NCCCs. The third CNCC presents a scenario that considers projections from various models included in the fifth phase of the Coupled Model Comparison Project (CMIP). This scenario is estimated as the average of the projections corresponding to the four Representative Concentration Pathways (RCPs) presented in the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Each of these RCPs represents a greenhouse gas (GHG) concentration trajectory for a particular scenario of population, economic and technological growth, leading to a possible trajectory of climate system evolution. Our article compares the projections presented in the Third CNCC with those obtained directly from the models used. Our results show that by using an average RCP, alternative scenarios that could be important in considering different possible futures are lost, negating the usefulness of proposing different GHG emission trajectories. Moreover, a comparison between the Second and Third CNCC shows opposite precipitation projections for different regions of the country. This is particularly important because the climate change scenario proposed in the Third CNCC is a reference scenario for climate change decision-making at the national level. (No está incluido el resumen en inglés)

**Keywords:** Climate change; National Communications on Climate Change; Climate projections; Climate change scenario for Colombia; CMIP5.

## Introducción

El más reciente reporte del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) indica que la temperatura promedio global ha aumentado alrededor de 1,1 °C (datos de 2020) con respecto al período preindustrial (1850-1900), lo que ha generado un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos y meteorológicos extremos en diversas regiones del planeta (IPCC, 2021). Estos cambios son atribuibles a la actividad humana, principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producto de la quema de combustibles fósiles y de cambios en los usos del suelo (IPCC, 2021). Por ello, el IPCC resalta la urgencia de generar reducciones fuertes, rápidas y sostenidas de las emisiones globales de GEI (IPCC, 2021, 2022b).

Las Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático (CNCC) son el mecanismo de reporte designado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) para que las partes (o países que la conforman) informen al mundo

sus avances en la implementación de la Convención en términos de mitigación y adaptación al cambio climático, y así reúnan la información disponible para orientar la planificación y elaboración de políticas que permitan mejorar la respuesta nacional ante este fenómeno (**IDEAM et al.**, 2017).

Cada uno de los países adscritos a la CMNUCC asume, entre otros, el compromiso de presentar regularmente estas comunicaciones como instrumentos que permitan evaluar la vulnerabilidad de cada país ante el cambio climático, así como hacer un seguimiento de las emisiones de GEI provenientes de cada uno de los sectores, lo que constituye un insumo fundamental para las decisiones a nivel nacional e internacional en materia de cambio climático (**IDEAM**, 2001).

Colombia ratificó el acuerdo de la CMNUCC en 1994 (**IDEAM**, 2001) y hasta la fecha ha presentado tres CNCC publicadas en el 2001, el 2010 y el 2017. Estos informes nacionales siguen los lineamientos aportados por los reportes de evaluación del IPCC, que, a nivel general, ofrecen información sobre los inventarios nacionales de emisiones de GEI, las acciones de mitigación, la reducción de la vulnerabilidad, la adaptación y la educación, así como las dificultades que se hayan presentado en la elaboración de cada una de las CNCC (**IDEAM**, 2001, 2010; **IDEAM et al.**, 2015a, 2015b, 2017).

La Primera CNCC de Colombia estuvo limitada por la disponibilidad de información y tecnología, y la dificultad para aplicar los protocolos del IPCC en el contexto del país (**IDEAM**, 2001). En su elaboración se utilizó información de escenarios generada mediante reducción de escala (*downscaling*) con métodos estadísticos de los resultados del promedio de siete de los modelos incluidos en el Tercer Reporte de Evaluación del IPCC (AR3) bajo el escenario A1 del Reporte Especial sobre Escenarios de Emisiones (IPCC, 2000), es decir, el escenario moderado de **Hulme & Sheard** (1999). Dicho escenario se acerca al de duplicación de concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono frente a los niveles preindustriales. En esta CNCC se consideraron, además, las simulaciones provenientes del Modelo de la Comunidad Climática, versión 3 (CCM3) (**Kiehl et al.**, 1998), modelo que produjo información para el escenario de duplicación de la concentración de dióxido de carbono (**Eslava & Pabón**, 2001; **Pabón et al.**, 2001), con incrementos graduales hasta llegar a 550 ppmv para finales del siglo XXI, en comparación con el periodo de referencia de 1961 a 1990. El **IDEAM** (2001) presentó una síntesis de los cambios en la temperatura media anual y en la precipitación anual obtenidos en 24 regiones del país bajo los escenarios mencionados. La Primera CNCC también presentó información de eventuales escenarios de ascenso del nivel del mar para estimar el impacto potencial en las zonas costeras e insulares.

Las dos siguientes CNCC constituyeron un avance en el análisis de las proyecciones de cambio climático en Colombia. La Segunda CNCC se basó en el Cuarto Reporte de Evaluación (AR4) del IPCC y la Tercera en el Quinto Reporte de Evaluación (AR5) (**IDEAM**, 2010; **IDEAM et al.**, 2015a, 2015b, 2017). En la Segunda CNCC se consideró la reducción de escala de modelos regionales con base en las proyecciones de seis modelos de circulación general (MCG) bajo diferentes escenarios (**Tabla 1**). Las dos CNCC son consistentes en cuanto a las proyecciones de cambio en la temperatura media anual, pero presentan notables contradicciones en las proyecciones de precipitación para el siglo XXI en el país. Por ejemplo, en algunas regiones del territorio colombiano se obtuvieron resultados con un signo de cambio en la lámina total anual de precipitación opuesto entre las dos CNCC publicadas: la segunda proyectó disminuciones de precipitación sobre parte de la región Andina superiores al 10 % para el periodo 2011-2040 y reducciones mayores (20-30 %) en algunas zonas de esta región para el periodo 2071-2100 (**IDEAM**, 2010), en tanto que en la tercera se proyectaron reducciones de 10 a 40 % en las regiones Caribe y Amazonas y aumentos de hasta 30 % en algunas zonas de la región Andina para los tres periodos considerados (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) (**IDEAM et al.**, 2017).

La Tercera CNCC de Colombia plantea un escenario de cambio climático que considera las proyecciones de diversos MCG incluidos en la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) (**Tabla 2**). Este escenario considera los

**Tabla 1.** Modelos empleados en la Segunda CNCC de Colombia (IDEAM, 2010).

Condiciones iniciales Modelos de baja resolución	Modelo para reducción de escala dinámico	Resolución (km)	Escenario	Periodo analizado
<b>Clima presente</b>				
ERA40	Precis	25 x 25	Clima presente	1971-2000
CCM3	GSM-MRI	20 x 20	Clima presente	1979-1998
CAM	WRF	4 x 4	Año de referencia	1990
<b>Clima futuro</b>				
HadAM3P	Precis	25 x 25	A2	2011-2100
HadAM3P	Precis	25 x 25	B2	2011-2100
ECHAM4	Precis	25 x 25	A2 (Sulfato)	2071-2100
ECHAM4	Precis	25 x 25	B2 (Sulfato)	2071-2100
HadAM3Q	Precis	25 x 25	A1B (Sulfato)	2071-2100
CAM	WRF	4 x 4	A2	Cada 10 años 2020-2100
CCM3	GSM-MRI	20 x 20	A1B	2080-2090

promedios de las proyecciones para las cuatro trayectorias de concentración representativa (RCP) presentadas en el AR5 (IDEAM *et al.*, 2017). Estas RCP (RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0 y RCP 8,5) plantean diferentes trayectorias de concentración atmosférica de GEI, que obedecen a trayectorias climáticas futuras bajo diversos crecimientos poblacionales, económicos y tecnológicos y conllevan diferentes forzamientos radiativos para finales de este siglo (Masui *et al.*, 2011; Riahi *et al.*, 2011; Thomson *et al.*, 2011; van Vuuren *et al.*, 2011a, 2011b). Por ejemplo, la RCP 2,6 corresponde a la de menores emisiones de GEI, con una concentración de 490 ppm de CO<sub>2</sub>eq para el año 2100, e indica un forzamiento radiativo de 3,1 W/m<sup>2</sup> para mediados del siglo XXI, el cual disminuye a 2,6 W/m<sup>2</sup> en el 2100. Esta RCP plantea: (i) una reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a partir del 2020 hasta llegar a cero en el 2100; (ii) una reducción de emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) hasta aproximadamente la mitad de los niveles del 2020, y (iii) una reducción de las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) hasta aproximadamente el 10 % de los niveles observados en el periodo 1980-1990. Estas reducciones obedecen a emisiones negativas en el sector energético derivadas de la captura y el almacenamiento de carbono y la migración del uso de combustibles fósiles a energías renovables y nucleares, e implican sistemas socio-ambientales más sostenibles (van Vuuren *et al.*, 2011a, 2011b).

En contraste, la RCP 8,5 corresponde a la ruta con mayores emisiones de GEI, con una concentración de 1.370 ppm de CO<sub>2</sub>eq en el 2100, e indica un forzamiento radiativo de 8,5 W/m<sup>2</sup> para el 2100. Esta RCP plantea un aumento de las emisiones de GEI para el 2100 igual al triple de las emisiones observadas en el 2000; no incluye metas específicas de mitigación, y proyecta un crecimiento poblacional continuo, con alta desigualdad social, lo que genera expansión urbana y pérdida de áreas boscosas. Además, representa un escenario con una gran dependencia de combustibles fósiles como el carbón debido a su bajo costo y al limitado avance tecnológico (Riahi *et al.*, 2011). Las trayectorias RCP 4,5 y RCP 6,0 corresponden a escenarios intermedios entre los dos mencionados (Masui *et al.*, 2011; Thomson *et al.*, 2011).

Por tal razón, es necesario evaluar las proyecciones presentadas en la Tercera CNCC de Colombia y el escenario de cambio climático generado a partir de ellas, máxime cuando el IPCC ha publicado su Sexto Reporte de Evaluación (AR6) (IPCC, 2021, 2022a, 2022b),

**Tabla 2.** Generalidades de los modelos considerados en la Tercera CNCC de Colombia y en este estudio para el análisis de temperatura superficial del aire (tas) y precipitación (pr). En negrilla se resaltan los modelos identificados con la mejor representación de estas variables para el país (Arias et al., 2021b), es decir, aquellos modelos que representan adecuadamente el ciclo anual y la distribución espacial de estas variables. Además, se indican los modelos con simulaciones CORDEX disponibles para el dominio CAM44.

Modelo	Resolución horizontal (Lon x Lat)	Simulaciones CMIP5		Simulaciones CORDEX	
		tas	pr	tas	pr
bcc-csm1-1	2,8125° × 2,8125°	X	X		
bcc-csm1-1-m	1,125° × 1,125°	X			
<b>CCSM4</b>	1,25° × 0,9°	X	X		
<b>CESM1-CAM5</b>	1,25° × 0,9°	X			
CSIRO-MK3.6.0	1,875° × 1,875°	X	X	X	X
FIO-ESM	2,875° × 2,875°	X	X		
GFDL-CM3	2,5° × 2°	X	X		
GFDL-ES-M2G	2,5° × 2°	X			
GISS-E2-H	2,5° × 2°	X	X		
GISS-E2-R	2,5° × 2°	X	X		
HadGEM2-AO	1,875° × 1,25°	X	X		
<b>HadGEM2-ES</b>	1,875° × 1,25°	X		X	
IPSL-CM5A-LR	3,75° × 1,875°	X	X		
IPSL-CM5A-MR	2,5° × 1,25°	X	X	X	X
<b>MIROC-ESM</b>	2,8125° × 2,8125°	X	X		
<b>MIROC-ESM-CHEM</b>	2,8125° × 2,8125°	X	X		
<b>MIROC5</b>	1,4° × 1,4°	X	X	X	X
MRI-CGCM3	1,12° × 1,12°	X	X		
NorESM1-M	2,5° × 1,9°	X		X	
NorESM1-ME	2,5° × 1,9°	X	X		

que considera una gama más amplia de escenarios socioeconómicos, conocidos como Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways, SSP*) (Riahi et al., 2017).

Para avanzar en el análisis de las proyecciones de cambio climático para Colombia, en el presente estudio se compararon las proyecciones correspondientes al escenario de cambio climático planteado en la Tercera CNCC de Colombia con las proyecciones obtenidas de los modelos CMIP5 para cada una de las RCP planteadas en el AR5 (Collins et al., 2013). Además, se analizaron las simulaciones históricas durante el período 1979-2005 provenientes de los 20 modelos CMIP5 de temperatura superficial del aire y los 15 de precipitación usados en la Tercera CNCC (IDEAM et al., 2017). Estas simulaciones se evaluaron a partir de diversas bases de datos con observaciones o reanálisis climáticos empleados como referencia. Además, se analizaron las proyecciones para los tres períodos considerados en la Tercera CNCC a partir de cada una de las cuatro RCP, y se compararon con el promedio multiescenario, así como con las proyecciones presentadas en la Tercera CNCC. A manera de análisis exploratorio del efecto de la reducción de escala

en las simulaciones climáticas, se compararon las provenientes de los MCG con aquellas provenientes del experimento *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX) (Giorgi & Gutowski, 2015) para los modelos con información disponible en la región de análisis.

## Datos y metodología

### *Datos observacionales*

Los datos de referencia para la evaluación de las simulaciones históricas de los modelos CMIP5 incluyeron la información mensual de temperatura del aire en superficie provenientes del reanálisis climático ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020), con una resolución horizontal de 30 km para el período 1979-2005, y la de precipitación proveniente de las estimaciones satelitales de la Misión de Medición de Lluvia Tropical (*Tropical Rainfall Measuring Mission*, TRMM) (Huffman *et al.*, 2007), con una resolución horizontal de 0,25 ° para el período 1998-2005. Estos datos se sometieron a interpolación bilineal con la resolución horizontal de cada uno de los modelos CMIP5 considerados (Tabla 2) para estimar los sesgos de cada modelo con respecto a la base de datos de referencia.

Es importante resaltar que el objetivo principal de este estudio no fue la evaluación del desempeño de los diferentes modelos en sus simulaciones históricas para Colombia, aunque sí se buscaba presentar un contexto general sobre qué tan adecuados son para hacer proyecciones ante escenarios de cambio climático. Trabajos anteriores se han enfocado en la evaluación del desempeño de estos modelos para la simulación del clima en la región (Yin *et al.*, 2013; Palomino-Lemus *et al.*, 2015, 2017; Sierra *et al.*, 2015, 2018, 2021; Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017; Pabón-Cacedo *et al.*, 2020; Arias *et al.*, 2021b; Ortega *et al.*, 2021). En muchos de estos estudios se emplearon datos de referencia provenientes de reanálisis climáticos, estimaciones satelitales y productos interpolados para evaluar el desempeño de los modelos, en tanto que algunos pocos recurrieron a la información de estaciones *in situ*. Por ejemplo, Arias *et al.* (2021b) evaluaron estas simulaciones con respecto a las estaciones del IDEAM y encontraron que los 49 modelos CMIP5 evaluados fueron capaces de simular adecuadamente el ciclo anual de la temperatura superficial del aire en las estaciones consideradas (457 estaciones para el período 1979-2005). Sin embargo, presentaron mayores sesgos en la simulación del ciclo anual de precipitación para las estaciones del IDEAM consideradas (1.710 estaciones para el período 1979-2005), lo que coincide con la evaluación de Bonilla-Ovallos & Mesa-Sánchez (2017), quienes también consideraron registros de estaciones del IDEAM para la evaluación de 16 modelos CMIP5.

### *Simulaciones y proyecciones CMIP5*

Se utilizaron 20 modelos CMIP5 para la temperatura superficial del aire y 15 para la precipitación, con el fin de lograr comparaciones lo más cercanas posible a lo presentado en la Tercera CNCC de Colombia a partir de los mismos modelos. Las simulaciones y proyecciones de estos modelos se obtuvieron del *World Climate Research Programme* (WCRP: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>). El promedio multimodelo, que considera la totalidad de los modelos con simulaciones disponibles para cada variable, se estimó mediante interpolación bilineal de la resolución horizontal más gruesa entre modelos (2,8°x 2,8°) (Tabla 2).

En el análisis de proyecciones se consideraron tres períodos futuros: 2011-2040 (corto plazo), 2041-2070 (mediano plazo) y 2071-2100 (largo plazo) siguiendo una metodología similar a la usada en la Tercera CNCC de Colombia. Por lo tanto, se empleó el mismo número de modelos considerado en la evaluación de sesgos de las simulaciones históricas y el mismo procedimiento de cambio de resolución y estimación del promedio multimodelo. Este procedimiento se siguió para las cuatro RCP presentadas en el AR5 (RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0 y RCP 8,5). Además, se estimó un promedio multiescenario para cada uno de los períodos considerados y se comparó con las proyecciones de la Tercera

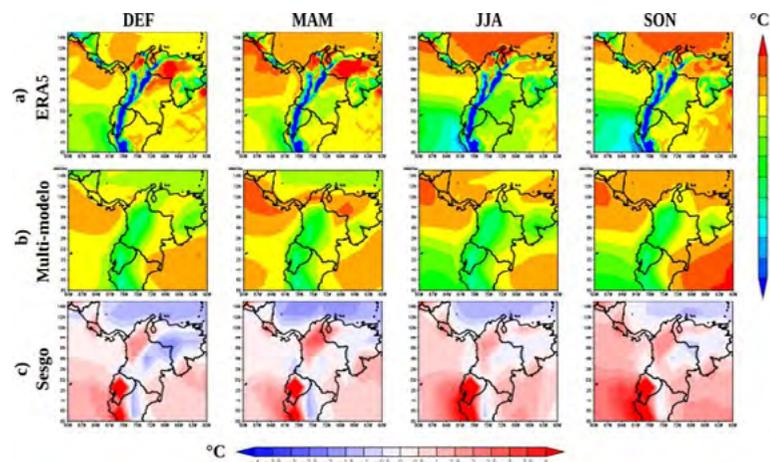
CNCC en ambas variables. Este conjunto multiescenario se obtuvo mediante el promedio de los promedios multimodelo de las cuatro RCP. Los cambios proyectados se estimaron con respecto al promedio multimodelo (considerando los mismos modelos) para el período histórico 1976-2005.

### **Simulaciones CORDEX**

Las proyecciones provenientes del escenario de cambio climático planteado en la Tercera CNCC se compararon con las proyecciones de modelos incluidas en el experimento CORDEX (Giorgi & Gutowski, 2015), correspondientes a simulaciones de modelos regionales con condiciones iniciales y de frontera provenientes de modelos CMIP5. Para la comparación entre las simulaciones CORDEX y sus modelos originales, se obtuvieron los datos de cinco de ellas para temperatura del aire en superficie y tres modelos para precipitación, cuidando de que coincidieran con los modelos utilizados en los promedios multimodelo de la Tercera CNCC (Tabla 2). La cantidad de modelos CORDEX es mucho menor a la cantidad de modelos CMIP5 debido a la limitada disponibilidad de estas simulaciones. Estos datos se tomaron del WCRP (<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cordex-ipsl/>). En este análisis empleamos el dominio CAM44 (Central América) después de un remapeo para llevar los datos de coordenadas del modelo a una malla regular, y de un procedimiento similar para llevar las bases de datos de referencia a la resolución horizontal de cada modelo. Posteriormente, se estimaron los promedios multimodelo mediante una interpolación bilineal a  $0,44^\circ$ . Los cambios proyectados se obtuvieron con respecto al promedio de los mismos modelos para el período histórico 1976-2005.

### **Simulaciones históricas de la temperatura superficial del aire y la precipitación**

*Temperatura superficial del aire.* La figura 1 muestra los campos espaciales de promedios trimestrales de temperatura superficial del aire para el reanálisis ERA5 (paneles superiores) y el promedio del promedio de los 20 modelos CMIP5 considerados (paneles centrales), así como los sesgos de este promedio multimodelo con respecto al reanálisis (paneles inferiores). Los promedios trimestrales del ERA5 para el periodo histórico 1979-2005 (Figura 1a) exhibieron temperaturas más bajas ( $<20^\circ\text{C}$ ) sobre la cordillera de los Andes y la Sierra Nevada de Santa Marta, temperaturas medias ( $21^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C}$ ) en la región Pacífica, y temperaturas más altas ( $23^\circ\text{C} - 29^\circ\text{C}$ ) en las regiones Caribe, Orinoquía y Amazonas. Según el ERA5, las mayores temperaturas en la región Caribe se observaron de diciembre a febrero (DEF) y de marzo a mayo (MAM), y en las regiones Orinoquía y Amazonas en

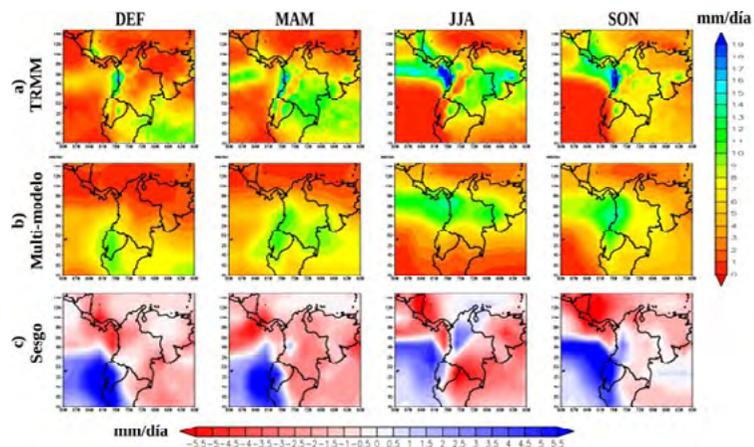


**Figura 1.** Promedio trimestral multianual de temperatura superficial del aire ( $^\circ\text{C}$ ) para: **a)** el reanálisis ERA5 y **b)** el promedio de 20 modelos CMIP5 para el periodo 1979-2005. **c)** Sesgo de temperatura, estimado como el promedio de las diferencias entre la climatología de la simulación histórica de cada modelo y la climatología de ERA5

DEF. A lo largo del año, las mayores temperaturas se registraron en La Guajira, en tanto que las más bajas se observaron a lo largo de la cordillera de los Andes y en la Sierra Nevada de Santa Marta.

El promedio multimodelo de las simulaciones históricas (**Figura 1b**) muestra las temperaturas más bajas (21 °C – 24 °C) en la región Andina, y temperaturas similares para la región Pacífico, con un máximo de 26 °C. Las regiones Caribe, Orinoquía y Amazonas presentaron valores entre los 24 °C y los 29 °C. Las temperaturas más altas para el Caribe y la Orinoquía se simularon en MAM, en tanto que para el Amazonas se registraron en Septiembre a Noviembre (SON). Los sesgos del promedio multiescenario (**Figura 1c**) muestran sobreestimaciones de los modelos en áreas de la región andina del orden de 1 a 2 °C, lo que revela la dificultad de los modelos para representar las temperaturas en esta región, lo que podría asociarse con una inadecuada representación orográfica debido a la baja resolución espacial de estos modelos (Sheridan *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2017; Posada-Marín *et al.*, 2019). En contraste, los sesgos negativos de hasta 1,5 °C en la Orinoquía y el Caribe indican la dificultad de los modelos considerados para representar las altas temperaturas de estas regiones. La discusión de tales diferencias se presenta en detalle en Arias *et al.* (2021b), quienes evaluaron el desempeño de modelos CMIP5 con respecto al reanálisis ERA5 y a las estaciones del IDEAM.

**Precipitación.** La **figura 2** presenta los promedios trimestrales de precipitación provenientes de la TRMM y del promedio de las simulaciones históricas de los 15 modelos CMIP5 considerados para esta variable (promedio multimodelo), así como su sesgo con respecto a las estimaciones satelitales. En DEF, las estimaciones de la TRMM (**Figura 2a**) mostraron bajas precipitaciones en la región Caribe, con valores entre 0 y 4 mm/día, seguidas de la región Orinoquía, con valores de 2 a 6 mm/día. La región Andina presentó tasas de precipitación entre 4 y 8 mm/día, mientras que la región Amazonía presentó valores entre 6 y 12 mm/día, siendo más altos hacia el sur. La región con mayores precipitaciones durante el primer trimestre del año fue la Pacífica, con valores entre 9 y 18 mm/día, incluida la parte oceánica más próxima al continente. En MAM, los valores más bajos siguieron presentándose en el Caribe colombiano (3-7 mm/día), seguido de las regiones Andina (4-9 mm/día), Orinoquía (7-11 mm/día), Amazonas (9-13 mm/día) y Pacífica, la cual presenta los valores más altos en todo el dominio analizado (10-18 mm/día). En junio-agosto (JJA) se mantuvieron los valores bajos del Caribe (0-6 mm/día) y se observaron precipitaciones bajas sobre la cordillera de los Andes (1-8 mm/día), seguida por Amazonas (7-10 mm/día) y Orinoquía (9-13 mm/día). Se mantuvieron los valores más altos sobre la región



**Figura 2.** Promedio trimestral multianual de precipitación (mm/día) para: **a)** estimados satelitales de TRMM (1998-2005) y **b)** el promedio de 15 modelos CMIP5 (1979-2005). **c)** Sesgo de precipitación estimado como el promedio de las diferencias entre la climatología de la simulación histórica de cada modelo y la climatología de TRMM

Pacífica, con más de 19 mm/día, incluida la parte oceánica, es decir, las precipitaciones más altas de todo el ciclo anual. En SON, la mayor parte del país presentó valores bajos de precipitación (2-9 mm/día), siendo mayores en la alta Guajira y los Andes, y más altos en la región Pacífica y el Pacífico tropical, con valores similares a los del trimestre anterior. Se observa, entonces que, a nivel general, las estimaciones satelitales de la TRMM registraron las menores precipitaciones en la región Caribe y los Andes colombianos y las más altas en la región Pacífico.

Sin embargo, es importante señalar que el régimen de precipitación en Colombia exhibe una alta complejidad debido a los múltiples procesos hidroclimáticos que se observan en la región, así como a las características topográficas debido a la presencia de los tres ramales de la cordillera de los Andes, la diversidad de fuentes de humedad atmosférica provenientes de regiones oceánicas (Pacífico oriental, Mar Caribe y Atlántico norte) y continentales (cuencas de los ríos Magdalena, Orinoco y Amazonas), la migración latitudinal de la zona de convergencia intertropical, la influencia de fenómenos de interacción océano-atmósfera como El Niño-Oscilación del Sur y de las variaciones de temperaturas sobre el mar Caribe y el océano Atlántico, y el papel activo de la vegetación, entre otros (Mejía *et al.*, 1999; Jaramillo-Robledo & Chaves-Córdoba, 2000; Poveda, 2004; Poveda & Mesa, 1999, 2000; Poveda *et al.*, 2005, 2006, 2011; Bedoya-Soto *et al.*, 2019; Posada-Marín *et al.*, 2019; Urrea *et al.*, 2019; Cai *et al.*, 2020; Espinoza *et al.*, 2020; Arias *et al.*, 2021a; Loaiza-Cerón *et al.*, 2021; Vallejo-Bernal *et al.*, 2021).

El promedio multimodelo (Figura 2b) arrojó bajas precipitaciones en todo el país en DEF, con valores entre 0 y 7 mm/día para el centro, norte y nororiente del territorio, y de 5 a 9 mm/día para las regiones de Amazonas, sur de la región Andina y Pacífico. En MAM, las precipitaciones más bajas se registraron en el Caribe, entre 0 y 7 mm/día, mientras que en el resto del país oscilaron entre 7 y 12 mm/día, siendo mayores en el centro y sur de la región Pacífica y el oriente de la región Amazónica. En JJA, las precipitaciones simuladas al sur y al norte del país fueron de 1 a 8 mm/día, siendo más altas hacia el interior del territorio. En la Orinoquía, los valores fluctuaron entre 9 y 13 mm/día, en tanto que al centro y norte de las regiones Andina y Pacífica se obtuvieron valores entre 9 y 15 mm/día. En SON, las precipitaciones más bajas se presentaron en el Caribe, con valores desde los 2 mm/día sobre el océano y la zona continental. En las regiones Orinoquía y Amazonas, los valores simulados estuvieron entre los 6 y los 9 mm/día al oriente de la Orinoquía. Las regiones Andina y Pacífico obtuvieron valores de 10 a 15 mm/día, siendo más altas en el centro de la región Pacífica, con valores de hasta 17 mm/día sobre el océano.

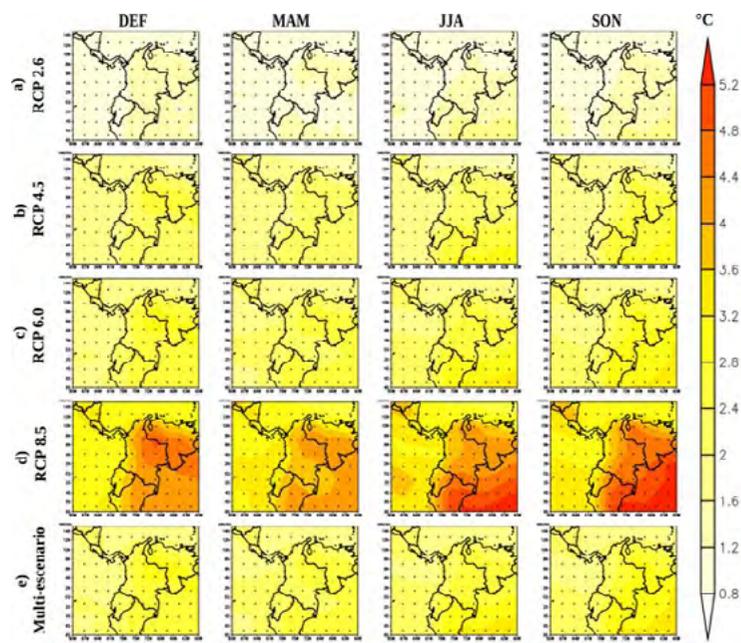
Las diferencias entre el promedio multimodelo y el de la TRMM (Figura 2c) evidencian sesgos negativos para todo el territorio en DEF, principalmente en la región Pacífica, incluida su zona oceánica, y al oriente de la región de la Amazonía, lo que indica que hay dificultades en los modelos considerados para representar la precipitación en estas zonas, las cuales estarían asociadas con la resolución espacial de los conjuntos de datos que se comparan: las observaciones son representativas de escalas espaciales más finas mientras que los modelos, al tener resoluciones más gruesas, no reflejan las señales de menor escala, por ejemplo, aquellas relacionadas con la topografía que pueden generar gradientes verticales de temperatura y aumentos locales de precipitación (Sheridan *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2017; Posada-Marín *et al.*, 2019).

Durante MAM, los sesgos negativos más altos se presentaron para la región de la Orinoquía y al suroccidente del país, principalmente, lo que evidencia una subestimación en los datos arrojados por los modelos. Los sesgos positivos se presentaron en el centro de la región Pacífico, donde las simulaciones sobreestimaron la precipitación con respecto a los datos satelitales. Durante JJA, las diferencias negativas se dieron al sur del país, sobre la región Amazónica y parte de la Orinoquía, lo que indica que las simulaciones subestimaron la precipitación registrada por la TRMM, en tanto que las diferencias positivas se dieron en el centro y norte de la región Andina, donde las simulaciones sobreestimaron la precipitación con respecto a la TRMM. En SON, las mayores diferencias negativas se dieron en la región Caribe, mientras que las diferencias positivas se presentaron al sur de

las regiones Andina y Pacífico, donde las simulaciones sobreestimaron la precipitación en comparación con las estimaciones satelitales. Estos patrones de sesgo son similares a los discutidos por **Arias et al.** (2021b), quienes consideran 49 modelos CMIP5. Por su parte, **Bonilla-Ovalle & Mesa-Sánchez** (2017) señalaron que los modelos CMIP5 (16 modelos) arrojaron subestimaciones de precipitación en las regiones Pacífico y Amazónica y sobreestimaciones en los Andes.

### **Proyecciones de temperatura superficial del aire y precipitación para el siglo XXI**

**Temperatura superficial del aire.** La **figura 3** presenta los cambios proyectados de temperatura superficial del aire para finales de siglo (2071-2100) según el promedio multimodelo para cada una de las cuatro RCP consideradas. Las **figuras 1S y 2S** del material suplementario, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>, presentan los cambios proyectados para inicios (2011-2040) y mediados (2041-2070) de siglo, respectivamente. Los cambios proyectados se estimaron en comparación con las simulaciones del periodo histórico 1976-2005. Se resalta que el promedio multimodelo fue muy concordante entre los modelos en cuanto a los aumentos de temperatura en todo el territorio colombiano a lo largo del siglo XXI, independientemente del horizonte de proyección o la temporada del año, lo que indica que se trata de una característica sólida. Para inicios de siglo se proyectan aumentos de temperatura por debajo de los 1,6 °C en todo el territorio colombiano (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>), así como para mediados de este siglo en todo el territorio colombiano, con los mayores incrementos en las RCP 4,5 y RCP 8,5 (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>). Para finales de siglo, el promedio multimodelo proyecta menores incrementos de temperatura para la RCP 2,6 (**Figura 3a**), con aumentos de 1,6 a 2,4 °C. Los incrementos proyectados aumentan conforme se agudiza el forzamiento radiativo, y son muy similares en las RCP 4,5 (**Figura 3b**) y RCP 6,0

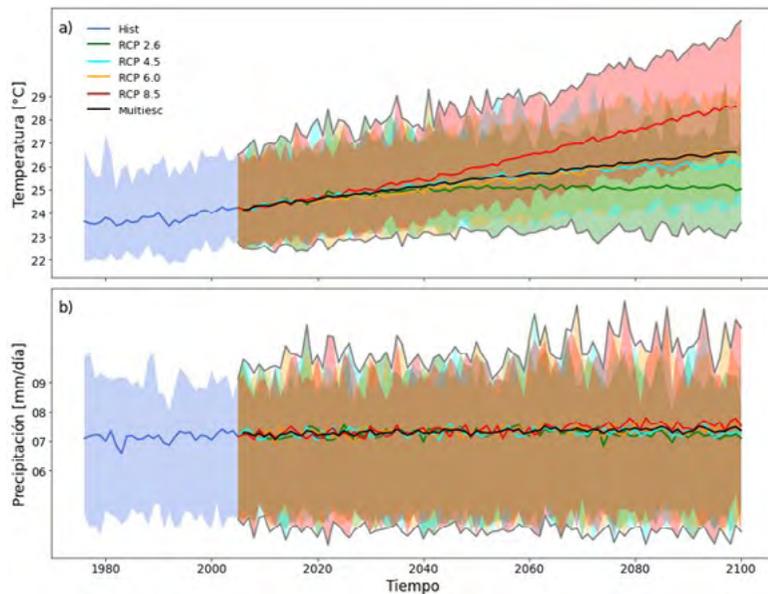


**Figura 3.** Cambios proyectados de temperatura superficial del aire (°C) para el período 2071-2100 (largo plazo) con respecto al período histórico (1976-2005) y para el promedio multimodelo de las cuatro RCP consideradas: **a)** RCP 2,6; **b)** RCP 4,5; **c)** RCP 6,0, y **d)** RCP 8,5. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican un consenso del 80 % entre modelos en el signo del cambio proyectado. **e)** Cambios proyectados según el promedio multiescenario (e.g., de las cuatro RCP). En e), los puntos indican consenso del 80 % entre la RCP en el signo del cambio proyectado.

(Figura 3e): entre 2,4 y 3,6 °C. Los mayores incrementos de temperatura se presentan en la RCP 8,5 (Figura 3d), con aumentos de temperatura de 3,2 a 4,0 °C en las regiones Pacífico, Andina y Caribe, de 3,2 a 4,8 °C en la región de la Orinoquía (principalmente en los trimestres DEF y SON), y de 3,2 a 4,4 °C en la región de la Amazonía (principalmente durante JJA y SON) (Figura 3d).

La figura 3e muestra que los cambios proyectados para el promedio de las cuatro RCP son similares a lo planteado en la Tercera CNCC de Colombia. Se observa que el promedio multiescenario atenúa particularmente los cambios proyectados en las RCP menos optimistas, en especial los cambios planteados en la RCP 8,5. Las proyecciones del promedio multiescenario propuesto por la Tercera CNCC se asemejan a las de la RCP 6,0, lo cual constituye una subestimación considerable del riesgo climático, dado que la RCP 8,5 entrega resultados que deben considerarse como una herramienta fundamental en la cuantificación del riesgo climático en el corto y mediano plazos (Schwalm *et al.*, 2020), en especial para un país como el nuestro con una alta vulnerabilidad social y ecológica en todas sus regiones (Roncancio *et al.*, 2020).

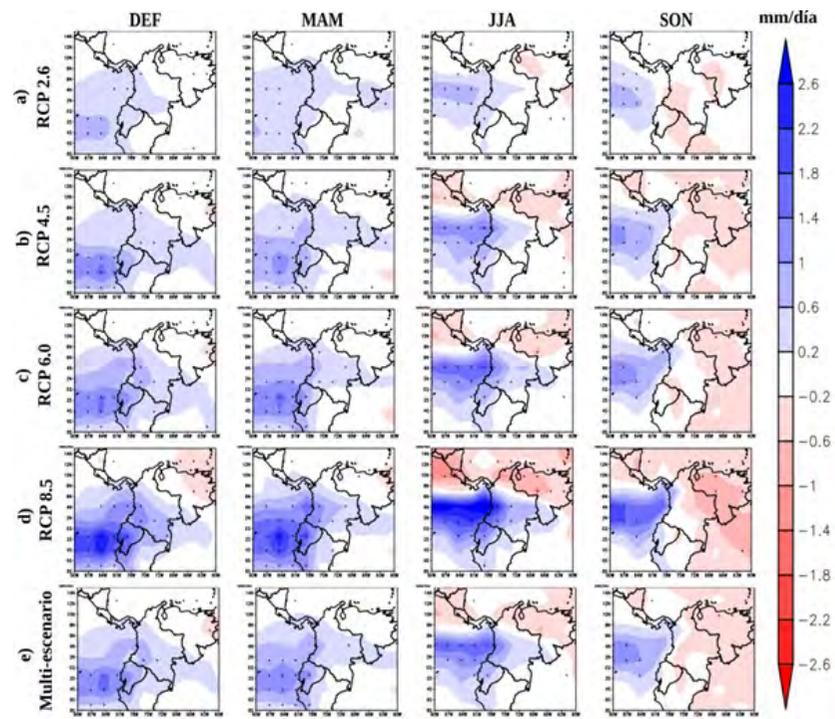
Para ilustrar mejor lo que implica un escenario proyectado a partir del promedio de las diversas RCP (promedio multiescenario), la figura 4a presenta la evolución temporal de la temperatura superficial del aire promedio en Colombia durante el periodo 1979-2005 según el promedio multimodelo para las simulaciones históricas, y durante el periodo 2005-2100 según el promedio multimodelo para cada una de las RCP consideradas y el promedio multiescenario. Se observa que la temperatura promedio en Colombia presenta un comportamiento de aumento a lo largo del siglo XXI para todas las RCP, como lo ilustran, además, las figuras 1S y 2S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1705/3284>, y la figura 3. Sin embargo, las tendencias de aumento varían considerablemente entre las RCP, con temperaturas que alcanzarían un promedio de 28 °C



**Figura 4.** Series de tiempo de: a) temperatura superficial del aire (°C) y b) precipitación (mm/día) promedio en Colombia durante el periodo 1979-2100 según los promedios multimodelo y multiescenario de los modelos CMIP5 considerados (20 para temperatura y 15 para precipitación). La serie de tiempo para el periodo 1979-2005 corresponde al promedio multimodelo de las simulaciones históricas (línea azul). Las series de tiempo para el período 2005-2100 corresponden al promedio multimodelo para cada una de las RCP consideradas (RCP 2,6 en línea verde, RCP 4,5 en línea turquesa, RCP 6,0 en línea naranja y RCP 8,5 en línea roja). Para comparación, se presenta la serie de tiempo correspondiente al promedio multiescenario (línea negra). Las áreas sombreadas representan la envoltura correspondiente a la simulación histórica o la RCP respectiva.

en el 2100 según la RCP 8,5, en tanto que la RCP 2,6 proyecta temperaturas promedio de aproximadamente 24,5 °C para finales de siglo. El promedio multiescenario muestra un comportamiento cercano al proyectado por las RCP 4,5 y 6,0, aunque más similares a la RCP 6,0, con temperaturas promedio de 25 °C para el año 2100.

**Precipitación.** La **figura 4b** presenta la serie de tiempo de los cambios proyectados en la precipitación promedio en Colombia. Se observa un leve incremento en la precipitación promedio para todas las RCP, con mayores aumentos para la RCP 8,5 a finales del siglo XXI, aunque el cambio proyectado no excede la variabilidad anual histórica. Con respecto a la distribución espacial, la **figura 5** presenta los cambios de precipitación proyectados para finales de siglo (2071-2100) según el promedio multimodelo bajo las cuatro RCP. Las **figuras 3S y 4S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>, presentan los cambios proyectados para inicios (2011-2040) y mediados (2041-2070) de siglo, respectivamente. Para inicios de siglo, el promedio multimodelo proyecta incrementos de precipitación en el occidente de Colombia y el oriente del Pacífico que no sobrepasan 1 mm/día, en tanto que las disminuciones observadas en JJA y SON en la Orinoquía tienen un valor de -0,6 mm/día, con distribuciones espaciales que varían trimestralmente entre las RCP (**Figura 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>). Los cambios proyectados para el período 2041-2070 muestran incrementos de precipitación con una distribución espacial, a nivel general, similar a los observados en el corto plazo, pero con disminuciones sobre la Orinoquía de hasta -1,0 mm/día. En general, los mayores incrementos de precipitación proyectados se dan en el oriente del Pacífico (**Figura 4S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>).



**Figura 5.** Cambios proyectados de precipitación (mm/día) para el período 2071-2100 (largo plazo) con respecto al período histórico (1976-2005) en el promedio multimodelo de las cuatro RCP consideradas: **a)** RCP 2,6, **b)** RCP 4,5, **c)** RCP 6,0, y **d)** RCP 8,5. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80 % entre modelos en el signo del cambio proyectado. **e)** Cambios proyectados para el promedio de las cuatro RCP. En e), los puntos indican consenso del 80 % entre las RCP en el signo del cambio proyectado.

En la **figura 5** se observan diferencias mayores en el largo plazo que para los horizontes prospectivos de corto y mediano plazo. En DEF se observan incrementos de precipitación en todo el dominio por debajo de 1 mm/día en todas las RCP, excepto para la RCP 8,5, con valores que alcanzan 1,4 mm/día en el centro y sur de la región Pacífico. En MAM los mayores cambios se dan también en el centro y sur del Pacífico en la RCP 8,5, con valores de 1,4 mm/día, pero con menor extensión que la observada durante DEF. En JJA, se observan diferencias negativas en la región Caribe, alcanzando valores de -1,4 mm/día en la RCP 8,5, en tanto que las mayores diferencias positivas se dan en el centro y sur de las regiones Andina y Pacífico, alcanzando valores de 2,6 mm/día en la costa pacífica. Por su parte, en SON se proyectan cambios negativos en la precipitación, principalmente al sur de las regiones Pacífico y Andina para la RCP 2,6, en la Orinoquía y parte de la región Andina en la RCP 4,5, al oriente de la Orinoquía y sur del Pacífico para la RCP 6,0, y al centro y oriente de la Orinoquía y sur del Amazonas para la RCP 8,5, donde se alcanzan valores de -1,4 mm/día. En las proyecciones de largo plazo los modelos coinciden en cuanto a los aumentos de precipitación de hasta 1,4 mm/día en la zona suroccidental del país bajo la RCP 8,5.

Los cambios de precipitación proyectados correspondientes al promedio multiescenario (**Figura 5e**) muestran un patrón espacial similar al exhibido por cada una de las cuatro RCP, aunque los valores estimados se asemejan a los de la RCP 6,0, similares a lo observado para la temperatura (**Figura 3e**). Al promediar las proyecciones de precipitación en el territorio colombiano, se observó una menor variación entre las RCP en comparación con lo encontrado para la temperatura (**Figura 4a**). Esto se debe a la compensación en el promedio de las proyecciones opuestas de incremento de precipitación para el centro-occidente del país y oriente del Pacífico (**Figura 4b**) y de disminución para el oriente y sur del país (**Figura 5**), así como a una posible subestimación de la variabilidad espacial (**Arnell & Gosling, 2013**). Este patrón espacial de cambios de precipitación proyectados en Colombia también se observa en el promedio multiescenario presentado en la figura 12 de la Tercera CNCC (**IDEAM et al., 2017**).

### ***Efecto de la reducción de escala***

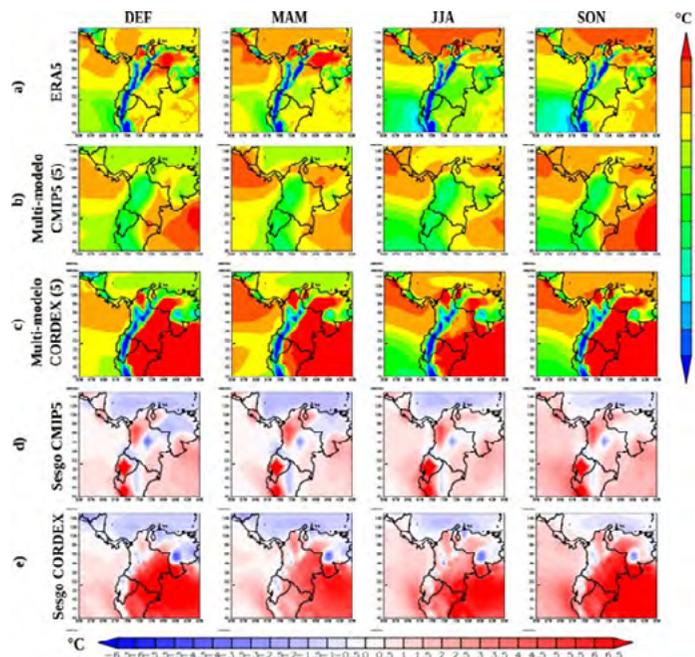
El escenario de cambio climático planteado en la Tercera CNCC para Colombia aplica la reducción estadística de escala mediante el uso de estaciones meteorológicas (**IDEAM et al., 2017**). La reducción de escala es una metodología ampliamente empleada para la regionalización de simulaciones y proyecciones de cambio climático (**Doblas-Reyes et al., 2021**), como se constata en las CNCC de 35 países revisadas en este artículo (**Tabla 1S**, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/1705/3284>). Lo anterior se debe a que los MCG empleados para las proyecciones globales presentan escalas horizontales gruesas (del orden de 100 a 200 km) y, además, generalmente exhiben sesgos marcados en su representación de la diversidad de los climas regionales. Los sesgos encontrados en la representación del clima presente mediante los MCG utilizados en el presente artículo (**Figuras 1 y 2**) evidencian las dificultades que tienen este tipo de modelos para representar la temperatura del aire en superficie y la precipitación en Colombia, algo que se ha reportado y analizado previamente con más detalle en múltiples estudios (**Yin et al., 2013; Palomino-Lemus et al., 2015, 2017; Sierra et al., 2015; Bonilla-Ovallos & Mesa-Sánchez, 2017; Posada-Marín et al., 2019; Arias et al., 2021b; Ortega et al., 2021**).

Como un acercamiento al efecto de la reducción de escala en las proyecciones obtenidas, se comparó el promedio histórico de cinco de los modelos CMIP5 para temperatura utilizados en la Tercera CNCC y sus simulaciones CORDEX correspondientes (**Tabla 2**). La **figura 6** muestra que tanto las simulaciones CORDEX como las de los modelos globales CMIP5 sobreestimaron la temperatura del aire en superficie, principalmente en las regiones de la Orinoquía y la Amazonía. Los sesgos en torno a dichas regiones son de mayor magnitud para el conjunto CORDEX (**Figura 6e**), con valores de hasta 6,5 °C, en comparación con los sesgos del conjunto CMIP5 (**Figura 6d**), que llegan hasta los 2 o 3 °C. Las proyecciones de estos modelos CORDEX para finales de siglo (**Figura 5S**, <https://www.raccefn.co>).

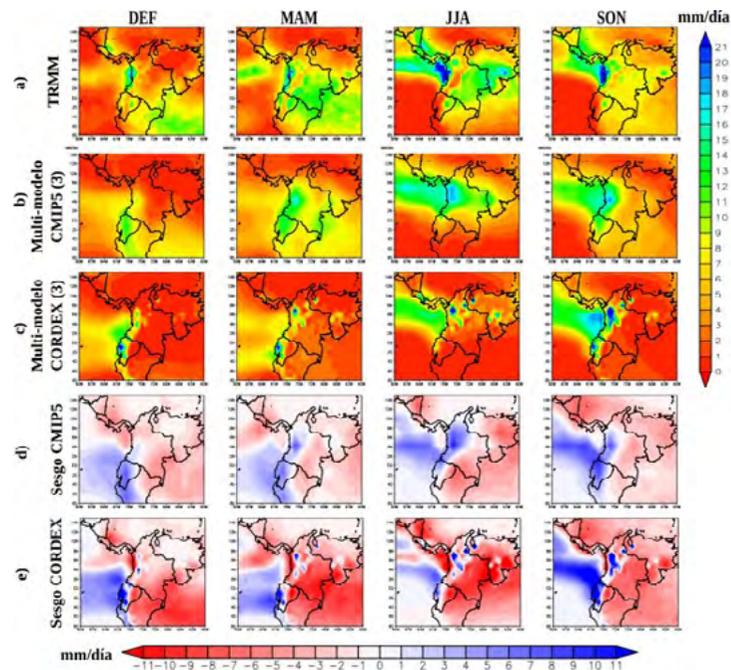
co/index.php/racefyn/article/view/1705/3284) indican que, en general, los aumentos de temperatura de mayor magnitud se proyectan para las regiones de la Amazonía y la Orinoquía (con un calentamiento de hasta 5,2 °C), y que, particularmente para el conjunto CORDEX, se proyectan aumentos de magnitud similar al sur de la región Caribe.

Para la precipitación, este análisis se hizo mediante el uso de simulaciones CORDEX disponibles correspondientes a tres de los modelos empleados en la Tercera CNCC (Tabla 2). La figura 7 muestra que los sesgos de ambos promedios tuvieron una distribución espacial similar y subestimaron la precipitación en las regiones de la Amazonía, la Orinoquía y el Caribe, en tanto que la sobreestimaron en los Andes. En la región Pacífico se observa que, mientras el promedio de CMIP5 sobreestimó la precipitación, el promedio de CORDEX la subestimó tanto en la zona continental como en el océano. Las proyecciones de estos modelos para finales del siglo XXI (Figura 6S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/1705/3284>) muestran aumentos superiores a los 3,8 mm/día en el océano Pacífico y disminuciones de 2,2 mm/día al noroccidente del país durante JJA en el promedio de CMIP5, y disminuciones superiores a 3,8 mm/día en los Andes colombianos con el conjunto CORDEX, principalmente en los últimos dos trimestres del año. Además, en DEF se observa una disminución proyectada en las precipitaciones al sur de la región Pacífico de alrededor de 3 mm/día.

Las simulaciones CORDEX consideradas muestran que no necesariamente se obtienen mejoras en las representaciones de las variables y sus patrones espaciales al emplear una reducción de escala, ya que se observaron mayores sesgos en la representación del clima de referencia para el territorio colombiano con las simulaciones CORDEX que con los correspondientes modelos CMIP5. Cabe resaltar que la resolución de las simulaciones CORDEX utilizadas fue de 0,44 ° (48,9 km, aproximadamente). En el caso de Colombia recientemente se hicieron algunos estudios utilizando modelos con resoluciones más finas (Oglesby et al., 2016; Martínez et al., 2019, 2022; Posada-Marín et al., 2019; Manciu et al., 2020). Específicamente, Oglesby et al. (2016) encontraron una representación adecuada de las zonas con topografía baja y regiones insulares con una resolución de 12 km,



**Figura 6.** Climatología trimestral de temperatura superficial del aire (°C) para a) ERA5, b) simulaciones históricas de los cinco modelos CMIP5 CORDEX (Tabla 2), c) promedio de las simulaciones CORDEX de estos modelos, y d) y e) sus sesgos con respecto a ERA5



**Figura 7.** Climatología trimestral de precipitación (mm/día) para **a)** TRMM, **b)** simulaciones históricas de los tres modelos CMIP5 CORDEX (**Tabla 2**), **c)** promedio de las simulaciones CORDEX de estos modelos, y **d)** y **e)** sus sesgos con respecto a TRMM.

en tanto que para las zonas con topografía compleja es necesario el uso de resoluciones de alrededor de 4 km. Ello resalta la necesidad de desarrollar ejercicios de reducción de escala dinámica que mejoren la representación de la precipitación (**Bonilla-Ovallos & Mesa-Sánchez, 2017; Posada-Marín et al., 2019; Pabón-Caicedo et al., 2020; Arias et al., 2021b**) y la temperatura del aire en superficie (**Gutowski et al., 2020; Pabón-Caicedo et al., 2020**), máxime en regiones topográficamente complejas como Colombia.

En general, se espera que las mejoras en el desempeño de los modelos regionales, objetivo de los experimentos CORDEX, provean mayor confianza en su representación de escenarios históricos de temperatura y precipitación y las proyecciones de cambio en el futuro. En este sentido, el desarrollo y la evaluación de más simulaciones regionales, conjuntamente con su representación de proyecciones climáticas, es una tarea que debe sumarse a las actividades que podrían proporcionar mayor información sobre el rango de cambios posibles en el clima colombiano.

### **Comparación con la Tercera Comunicación Nacional de Colombia**

Con el objeto de analizar la evolución de los escenarios de cambio climático para Colombia en las diferentes CNCC, en nuestro artículo se consideró una revisión exhaustiva de la Segunda y la Tercera CNCC comparando sus metodologías y resultados. Para la temperatura, la Segunda CNCC (**IDEAM, 2010, pp 2007-2011**) y la Tercera CNCC (**IDEAM et al., 2017, pp 25-28**) concuerdan en los aumentos de sus promedios multiescenario para los períodos 2011-2040 y 2041-2070. Sin embargo, en el largo plazo (2071-2100) se encuentran diferencias entre ambas: en la Segunda se proyectan los mayores aumentos de temperatura en la región Andina y el Caribe (3-4 °C), con mayores cambios en Tolima y Norte de Santander (>4 °C) (**IDEAM, 2010, figura 4.7**). Por su parte, la Tercera CNCC arroja aumentos de menor magnitud proyectados en las regiones Andina y Caribe (0,5-1,5 °C), en tanto que para el resto del país se proyectan aumentos de temperatura media de alrededor de 3,0 °C (**IDEAM et al., 2017, figura 11**). Al comparar las proyecciones bajo cada RCP, la Tercera CNCC y este artículo concuerdan en lo proyectado en el corto plazo (2011-2040) y,

aunque se obtienen magnitudes similares de los cambios proyectados en el mediano y largo plazo, difieren en la distribución espacial de los cambios de temperatura, ya que mientras los máximos aumentos de la Tercera CNCC se dan en la región Andina y el oriente del país (parte de Vichada, Arauca y Casanare), con hasta 5,0 °C de calentamiento proyectado (IDEAM *et al.*, 2015a, figura 25), los máximos aumentos de temperatura determinados en nuestro estudio se observan en toda la región de la Orinoquía y la Amazonía (>5,2 °C) (Figura 3). Llama la atención que pese a que la Tercera CNCC muestra aumentos de temperatura proyectados en la región Andina, con magnitudes superiores a los proyectados en otras regiones bajo todas las RCP, el promedio multiescenario exhibe los menores aumentos en esta región (IDEAM *et al.*, 2017, figura 11; IDEAM *et al.*, 2015a, figura 92).

En cuanto a la precipitación, la Segunda CNCC (IDEAM, 2010, pp 2007-2011) y la Tercera CNCC (IDEAM *et al.*, 2017, pp 25-28; IDEAM *et al.*, 2015a, pp 224-226) no concuerdan en cuanto a las proyecciones de sus promedios multiescenario. En particular, la Segunda CNCC proyecta disminuciones de aproximadamente 10 % de la precipitación en la mayor parte de la región Andina para el período 2011-2040, y reducciones de 20 a 30 % en algunos de los departamentos de esta región para el período 2071-2100 (IDEAM, 2010, figura 4.8), mientras que en la Tercera CNCC se proyectan reducciones de 10 a 40 % en el Caribe y la Amazonía y aumentos de hasta 30 % en algunas zonas de la región Andina en los tres horizontes temporales considerados (IDEAM *et al.*, 2017, figura 12). Por otra parte, la Tercera CNCC presenta aumentos de precipitación de 10 a 40 % en la región Andina consistentes en todas las RCP y disminuciones de hasta 40 % en las regiones Caribe, Orinoquía y Amazonía (IDEAM *et al.*, 2015a, figura 84), en tanto que en nuestro estudio se determinaron cambios de precipitación (aumentos generalizados en DEF y MAM, y reducciones en la mayor parte del territorio nacional en SON) que se incrementan en la medida en que avanzamos hacia finales del siglo XXI (Figuras 3S y 4S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>) (Figura 5). Además, las proyecciones analizadas en este artículo sugieren los cambios más marcados hacia finales de siglo en la RCP 8,5, especialmente aumentos de precipitación en la región Pacífica (>2,6 mm/día) y disminuciones en la Orinoquía (-1,4 mm/día) y el Caribe (-1,8 mm/día) (Figura 5). También llama la atención en la Tercera CNCC que los cambios de precipitación en el corto plazo (2011-2040) proyectados según el promedio multiescenario tengan magnitudes similares a los cambios proyectados en el mediano (2041-2070) y largo (2071-2100) plazo (IDEAM *et al.*, 2017, figura 12). Esto es algo que no está respaldado por los promedios de los modelos CMIP5 analizados en este artículo (Figura 5) (Figuras 3S y 4S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>).

## Discusión

El IPCC tiene como objetivo proporcionar una base científica a los gobiernos para la toma de decisiones sobre cambio climático, sus implicaciones y posibles riesgos futuros, así como presentar opciones de adaptación y mitigación. Las CNCC son un elemento fundamental en el proceso de toma de decisiones en materia de cambio climático en cuanto a adaptación y mitigación (IDEAM, 2001), por lo que es crítico que las metodologías empleadas para su elaboración sigan los lineamientos establecidos por el IPCC, como lo recomienda la CMNUCC en su decisión 17/CP.8 (CMNUCC, 2003).

En este artículo se hace una revisión de las proyecciones de temperatura media del aire y de precipitación media en las diferentes CNCC de Colombia; se encontraron proyecciones de precipitación opuestas entre la Segunda y la Tercera CNCC para las regiones Andina y Caribe. Estas proyecciones de precipitación contradictorias para la región Andina tienen graves implicaciones en la estimación del riesgo de desastres en una región altamente deforestada y vulnerable (ecológica y socialmente) (Hoyos *et al.*, 2013), con los niveles más altos de erosión del suelo en el país (<http://www.ideam.gov.co/web/siac/erosion>).

La Tercera CNCC plantea un escenario de cambio climático para Colombia estimado a partir del promedio aritmético de las proyecciones obtenidas para cuatro trayectorias de desarrollo socioeconómico (RCP) diferentes que dan lugar a una gama diferente de

emisiones de GEI. En este artículo se evidencia que la obtención de un escenario mediante un promedio aritmético de proyecciones bajo diferentes escenarios socioeconómicos no está conceptual ni metodológicamente fundamentado. Utilizar un escenario promedio tiene sentido cuando los escenarios son indistinguibles. Para el problema en cuestión, cada uno de los escenarios es cualitativamente distinguible y, además, conducen a realizaciones bien diferenciadas de la evolución del clima. De esta manera, el uso del promedio de las proyecciones correspondientes a diferentes escenarios elimina la posibilidad de evaluar la posible respuesta del sistema climático ante diferentes forzamientos radiativos y concentraciones de GEI, evaluación que es la razón fundamental para considerar diferentes escenarios en el proyecto CMIP (ver FAQ 12.1 en **Collins et al.**, 2013).

Las proyecciones de temperatura media en Colombia varían significativamente entre las cuatro RCP planteadas en el quinto informe del IPCC (**Figuras 1S y 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>) (**Figuras 3 y 4a**). Además, pese a que la Tercera CNCC muestra aumentos de temperatura proyectados para la región Andina con magnitudes superiores a los proyectados en otras regiones, bajo todas las RCP el promedio multiescenario exhibe los menores aumentos en esta región (**IDEAM et al.**, 2017, figura 11; **IDEAM et al.**, 2015a, figura 92), lo que puede repercutir en aspectos agrícolas, sociodemográficos, de política pública y de biodiversidad, entre otros. Por ejemplo, la atenuación de los cambios de temperatura proyectados bajo las RCP de mayores emisiones mediante un promedio de RCP podría inducir cambios importantes en los usos del suelo, por ejemplo por la exacerbación de sequías e incendios y la muerte de la vegetación (**Allen et al.**, 2010). Por otra parte, el promedio aritmético de la precipitación proyectada para diferentes escenarios afecta notoriamente la representatividad obtenida debido a la alta dispersión de las proyecciones de esta variable.

Esto indica que los promedios multiescenario para la estimación de proyecciones de cambio climático no se debería aplicar, dado que constituyen un error conceptual y metodológico. Cada RCP está condicionada por distintos factores de índole económica, política, demográfica y tecnológica, así como de tipos de uso del suelo y de uso y obtención de energía (**IPCC**, 2014), incluidas decisiones de alimentación de la población (**Thomson et al.**, 2011) a tono con las características de diferentes conjuntos y resultado de procesos no lineales y complejos que no se podrían sumar o promediar. Promediar las RCP confunde las señales de cada una y distorsiona el posible impacto que realmente puede tener el cambio climático sobre un territorio, especialmente porque el escenario peor representado por los promedios de escenarios es el correspondiente a la RCP 8,5, lo cual constituye una considerable subestimación de la amenaza climática, dada la importancia de considerar los escenarios de mayores emisiones de GEI en la toma de decisiones (**McInerney et al.**, 2012; **Schwalm et al.**, 2020). Es importante enfatizar que subestimar esta amenaza presenta graves implicaciones para la toma de decisiones, ya que la RCP 8,5 es la ruta más cercana a las emisiones actuales y, posiblemente, a las emisiones observadas a mediados de siglo (**Schwalm et al.**, 2020).

Cabe señalar que no se ha encontrado ningún artículo en la literatura científica, ni en las CNCC de otros países (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>), que estime promedios multiescenario. Hacerlo constituye, entonces, una amenaza a la adecuada elección de alternativas ante el cambio climático para el país, dada su alta vulnerabilidad social, ambiental y económica (**Patt et al.**, 2010; **Magrin et al.**, 2014; **Roncancio et al.**, 2020; **Castellanos et al.**, 2022), pues se puede promover la implementación de medidas de adaptación inadecuadas e insuficientes, poniendo en riesgo vidas humanas, la riqueza ecosistémica de la nación (**IPCC**, 2014) y su desarrollo económico (**Bruckner**, 2012). Por ejemplo, en el informe conjunto de la Plataforma Intergubernamental de la Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES) y el IPCC (**Otto-Portner et al.**, 2021), se subraya la incidencia de la variabilidad climática sobre el funcionamiento de los ecosistemas y su capacidad de contribuir al bienestar de la sociedad. Las respuestas de ambos sistemas, el ecológico y el social, así como sus interacciones, dependen de la magnitud de los eventos considerados, por lo tanto, una mayor incertidumbre en los escenarios

abordados derivará en medidas inadecuadas para la mitigación o adaptación frente a esta amenaza. Existe aún el reto de analizar para Colombia el efecto de las diferentes RCP sobre los escenarios de cambio de la biodiversidad y su contribución al bienestar, de forma que puedan considerarse para el ordenamiento del territorio (**Chaves *et al.*, 2021**).

Algunas regiones colombianas son particularmente vulnerables a desastres, especialmente las poblaciones humanas establecidas en zonas con alta frecuencia y magnitud de desastres relacionados con el clima, muchas de las cuales presentan, además, una gran vulnerabilidad social y económica (**Banco Mundial, 2012; UNDP, 2010**). Esto genera impactos que afectan la calidad de vida de los habitantes de estas regiones, especialmente en las zonas rurales afectadas también por el desplazamiento interno y la migración (**UNDP, 2010; McAdam, 2016; Salazar *et al.*, 2018**). Es fundamental, entonces, contar con herramientas rigurosas de apoyo a la gestión territorial que orienten la adecuada toma de decisiones basada en análisis de riesgos presentes y futuros y permitan planificar acciones e inversiones en las diferentes regiones del país.

Todo lo anterior representa un llamado de atención sobre el escenario promedio planteado en la Tercera CNCC para la toma de decisiones relacionadas con la adaptación y mitigación orientadas a la reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático en Colombia, pues, dada la alta vulnerabilidad del país, el uso de un escenario de este tipo puede generar subestimaciones del riesgo climático actual y futuro para sus poblaciones humanas y ecosistemas (**Magrin *et al.*, 2014; Castellanos *et al.*, 2022**). En este sentido, son necesarios nuevos estudios que utilicen técnicas de corrección de sesgos de los promedios multimodelo a partir de conjuntos de datos observacionales de referencia, con el fin de proporcionar proyecciones climáticas sólidas para los estudios de impacto climático que requieren información de alta resolución horizontal.

En el Informe Especial del IPCC presentado en el 2018 (**IPCC, 2018**) se discuten los impactos de un aumento de la temperatura media global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales (periodo comprendido entre 1850 y 1900) sobre la disponibilidad y la calidad del agua, la aparición de eventos hidrometeorológicos extremos, y las afectaciones a otras especies y ecosistemas, particularmente en los trópicos, incluyendo su deterioro y extinción, entre otros. El informe evidencia que el riesgo asociado con el aumento de las temperaturas globales en 1,5 °C es inferior al asociado con un calentamiento de 2,0 °C (**Hoegh-Guldberg *et al.*, 2018**), lo que realza la importancia de analizar detalladamente las proyecciones asociadas con cada RCP de forma individual y no mediante su promedio aritmético, tal como se corroboró en el más reciente reporte de evaluación del IPCC (AR6) (**IPCC, 2021, 2022a**). Además, es importante señalar que, al igual que en los diferentes informes del IPCC, en las CNCC se debe involucrar el concepto de incertidumbre, elemento fundamental para la toma de decisiones.

No sobra reiterar que el reto de anticipar los efectos del cambio climático en un país complejo como Colombia es inmenso y requiere la cooperación de todos los sectores capaces de aportar. Este desafío requiere investigación que solo puede llevarse a cabo con la financiación adecuada. La importancia social y económica de esta tarea es reconocida, pero necesita materializarse. Es claro que la elaboración de una CNCC requiere una gran cantidad de recursos humanos y técnicos dada la complejidad de los aspectos que se abordan y que van más allá del análisis de simulaciones y proyecciones de cambio climático. Las CNCC de Colombia han mostrado un avance notable en cuanto a la claridad y el detalle metodológico empleado, así como a la integralidad de los diferentes aspectos abordados. La academia y la sociedad civil podrían ser grandes aliadas en la elaboración de estos documentos. Esta es una invitación para que la Cuarta CNCC de Colombia considere la participación de un mayor número de científicas y científicos del país que representen los grupos de investigación con experiencia en el uso e implementación de modelos climáticos y sus simulaciones, así como en el análisis de riesgo y los procesos de toma de decisiones, para que aporten tanto en el planteamiento de metodologías como en la obtención y el análisis de resultados.

En este sentido, la elaboración de un escenario de cambio climático requiere un análisis desde muchas disciplinas en las que nuestra academia tiene experiencia y puede apoyar las labores lideradas por el Gobierno Nacional. El alto número y la amplia diversidad disciplinaria de las autoras y autores de este artículo es una muestra de la consolidación de una comunidad científica nacional que puede participar en la elaboración de una próxima CNCC, no solo en lo que tiene que ver con los aspectos físicos del clima en el país, sino también con el análisis del impacto, la vulnerabilidad, la adaptación y la mitigación frente al cambio climático a escala nacional. En este sentido, existen numerosas instituciones universitarias y de investigación en Colombia con reconocida trayectoria nacional e internacional que pueden apoyar y generar alianzas para esta labor. Más aun, el conocimiento tradicional de las comunidades debería ser incorporado en estos documentos.

De otro lado, las CNCC de Colombia podrían verse enormemente fortalecidas con la revisión por pares externos, como ocurre, por ejemplo, con los Reportes de Evaluación del IPCC, que son revisados por pares de múltiples disciplinas y experticias mediante un proceso transparente y abierto. Sin duda, la incorporación de estos componentes en la elaboración de las CNCC sería una manera de robustecerlas, lo que es fundamental en la gestión del cambio climático en un país de tan alta vulnerabilidad como Colombia.

Por último, debe resaltarse la necesidad de: (i) generar información y conocimiento climático; (ii) traducir este conocimiento en información relevante para el proceso de toma de decisiones; (iii) transferir esta información a los beneficiarios y usuarios finales en formatos y medios que sean compatibles con sus plataformas, y (iv) poner esta información al servicio de los usuarios para su implementación en los procesos de toma de decisiones, así como en la formulación de planes y políticas (**Grossi & Dinku, 2022**).

## Conclusión

En este estudio se comparan las tres CNCC de Colombia publicadas en el 2001, el 2010 y el 2017. Las CNCC son un mecanismo para que los países informen sobre sus avances en mitigación y adaptación, y constituyen un elemento de base para las políticas frente al cambio climático a escala nacional. Por lo tanto, la información presentada en ellas es un insumo fundamental que tiene impacto en las políticas sectoriales a nivel nacional (por ejemplo, en el campo energético) y aportan al planteamiento e implementación de estrategias orientadas al cumplimiento de los objetivos de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático, el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, así como en la preparación para afrontar los efectos del cambio climático en nuestro país.

Nuestro análisis y la comparación de la información sobre los escenarios de cambio climático generada para la Segunda y la Tercera CNCC de Colombia evidencian coincidencias entre ambos documentos, así como diferencias que necesitan ser aclaradas para la implementación efectiva de políticas climáticas en el país. Específicamente, se observaron resultados en regiones del territorio nacional cuyo signo de cambio en la lámina total anual de precipitación es opuesto. Estas contradicciones pueden inducir errores en la evaluación del riesgo frente al cambio climático y, por ende, en la formulación y la implementación de estrategias locales y regionales de adaptación en las diferentes dimensiones (biofísica, recursos hídricos, salud humana, riesgo de desastres, y sectores productivos, entre otros) de las regiones y territorios del país, todas ellas urgentes y fundamentales, particularmente en la gestión integral de recursos hídricos y ecosistemas y de los riesgos asociados.

En la exploración de la Tercera CNCC se estableció que el único escenario planteado se consolidó a partir de las proyecciones de diversos modelos CMIP5 estimado como el promedio de las proyecciones correspondientes a las cuatro RCP del quinto reporte de evaluación del IPCC. Cada una de estas RCP representa una trayectoria de concentración de GEI para un escenario particular de crecimiento poblacional, económico y tecnológico, que conduce a una posible trayectoria de evolución del sistema climático. Con el análisis individual de las diversas RCP fue posible demostrar que al utilizar un escenario estimado como promedio aritmético de estas RCP, se pierde la oportunidad de evaluar posibles

condiciones futuras, anulando la utilidad de plantear diversas trayectorias de emisiones de GEI y eliminando, así, la posibilidad de que los formuladores de política dispongan de un umbral de incertidumbre para adoptar sus decisiones sobre las acciones de adaptación al cambio climático.

La revisión exhaustiva de más de 35 CNCC de diferentes países del mundo evidenció que la aproximación del “promedio multiescenario” no es una práctica implementada anteriormente para la obtención de un escenario de cambio climático. Más aún, la metodología usada en la Tercera CNCC de Colombia va en contra de lo analizado y sugerido por el IPCC. Lo anterior es de particular importancia, pues el escenario de cambio climático planteado en esa Tercera CNCC es un escenario de referencia para la toma de decisiones en materia de cambio climático a nivel nacional, además de constituir la información base para muchas investigaciones, para la evaluación de los riesgos territoriales y sectoriales frente al cambio climático, y para diversas aplicaciones en los proyectos de diseño, implementación y consultoría que orientan la adaptación al cambio climático en el país.

Cabe señalar la complejidad que entraña preparar la información sobre los posibles climas del futuro o los escenarios de cambio climático, así como la rigurosidad que debe observarse en su elaboración, aspectos que pueden abordarse en el marco de programas de largo aliento que comprometan la participación de los organismos estatales pertinentes, la academia y la sociedad civil. La academia colombiana cuenta con científicas y científicos con amplio conocimiento en las temáticas abordadas en las CNCC y probada disposición a colaborar en esta materia.

### Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Antioquia, proyecto CODI PRG2017-16264, y por MINCIENCIAS, programa No. 80740-490-2020. Agradecemos a todas las instituciones a las que pertenecen los autores del manuscrito, así como a los dos revisores anónimos y al editor por sus comentarios y sugerencias para mejorarlo.

### Contribución de los autores

PAA: diseño de la investigación; LDV: procesamiento y análisis de los datos y elaboración de las figuras. Todos los autores aportaron a la escritura y la discusión del manuscrito y están de acuerdo con su contenido final.

### Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener conflictos de intereses.

### Referencias

- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684.
- Arias, P.A., Garreaud, R., Poveda, G., Espinoza, J.C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., Scaff, L., van Oevelen, P.J. (2021a). Hydroclimate of the Andes. Part II: Hydroclimate variability and sub-continental patterns. *Frontiers in Earth Science*, 8(505467), 1-25. doi: 10.3389/feart.2020.505467

- Arias, P.A., Ortega, G., Villegas, L.D., Martínez, J.A.** (2021b). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 100, 75-96, DOI: 10.17533/udea.redin.20210525
- Arnell, N.G., Gosling, S.N.** (2013). The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology*, 486, 351-364.
- Banco Mundial.** (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial Región de América Latina y El Caribe.
- Bedoya-Soto, J.M., Aristizábal, E., Carmona, A.M., Poveda, G.** (2019). Seasonal Shift of the Diurnal Cycle of Rainfall Over Medellín's Valley, Central Andes of Colombia (1998-2005). *Frontiers in Earth Science*, 7. doi: 10.3389/feart.2019.00092
- Bonilla-Ovallos, C.A., Mesa-Sánchez, O.J.** (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 107-118. doi: 10.18257/raccefn.427
- Bruckner, M.** (2012). Climate change vulnerability and the identification of least developed countries. United Nations, Department of Economics and Social Affairs.
- Cai, W., McPhaden, M.J., Grimm, A.M., Rodrigues, R.R., Taschetto, A.S., Garreaud, R.D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.G., Santos, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H.S., Marengo, J.A., Alves, L.M., Osman, M., Li, S., Wu, L., Karamperidou, C., Takahashi K., Vera C.** (2020). Climate impacts of El Niño-Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 215-231. doi:10.1038/s43017-020-0040-3
- Castellanos, E., Lemos, M.F., Astigarraga, L., Chacón, N., Cuvi, N., Huggel, C., Miranda, L., Moncassin Vale, M., Ometto, J.P., Peri, P.L., Postigo, J.C., Ramajo, L., Roco, L., Rusticucci, M.** (2022). Central and South America. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Chaves, M. E., Gómez, S.R., Ramírez, W., Solano, C.** (Eds.). (2021). Evaluación Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos de Colombia. Resumen para Tomadores de Decisión. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y el Centro Mundial de Monitoreo para la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania. Bogotá D. C., Colombia. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/35942>
- CMNUCC.** (2003). Informe de la Conferencia de las Partes sobre su octavo período de sesiones, celebrado en Nueva Delhi del 23 de octubre al 1 de noviembre de 2002 (p. 2). Descargado de <http://rcc.marn.gov.sv/xmlui/bitstream/handle/123456789/97/17cp8.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J., Wehner, M.** (2013). Chapter 12 - Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC Working Group I Contribution to AR5. Eds. IPCC, Cambridge: Cambridge University Press
- Doblas-Reyes, F.J., Sörensson, A.A., Almazroui, M., Dosio, A., Gutowski, W.J., Haarsma, R., Hamdi, R., Hewitson, B., Kwon, W.T., Lamptey, B.L., Maraun, D., Stephenson, T.S., Takayabu, I., Terray, L., Turner, A., Zuo, Z.** (2021). Linking Global to Regional Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change}, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press. In Press.
- Eslava, J.A., Pabón, J.D.** (2001). Proyecto "Proyecciones climáticas e impactos socioeconómicos del cambio climático en Colombia". *Meteorología Colombiana*, 3, 1-8.
- Espinoza, J. C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P.A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., Scaff, L.** (2020). Hydroclimate of the Andes. Part I: main climatic features. *Frontiers Earth Sciences*, 8, 64. doi:10.3389/feart.2020.00064
- Gao, L., Bernhardt, M., Schulz, K., Chen, X.** (2017). Elevation correction of ERA-Interim temperature data in the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 37, 3540-3552. <https://doi.org/10.1002/joc.4935>

- Giorgi, F., Gutowski, W.J.** (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), 467-490. doi: 10.1146/annurev-environ-102014-021217
- Grossi, A., Dinku, T.** (2022). Enhancing national climate services: How systems thinking can accelerate locally led adaptation. *Perspective*, 5(1), 74-83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.007>
- Gutowski, W.J., Ullrich, P.A., Hall, A., Leung, L.R., O'Brien, T.A., Patricola, C. M., Zarzycki, C.** (2020). The Ongoing Need for High-Resolution Regional Climate Models: Process Understanding and Stakeholder Information. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(5), E664–E683. doi: 10.1175/BAMS-D-19-0113.1
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biaviti, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Thépaut, J.-N.** (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, 146, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K.L., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S.I., Thomas, A., Warren, R., Zhou, G.** (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J.C., Arango, A.M., Ortiz, J.C.** (2013). Impact of the 2010–2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: the human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 39, 16-25.
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Wolff, D.B., Adler, R.F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K.P., Stocker, E.F.** (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38-55.
- Hulme, M., Sheard, N.** (1999). Escenarios de Cambio Climático para Países de los Andes del Norte, Unidad de Investigación Climática (Climate Research Unit – CRU), Norwich, Reino Unido, 6pp
- IDEAM.** (2001). Colombia Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Colombia. Trade Link Ltda. Descargado de <http://www.ideam.gov.co/documents/40860/219937/primer-comunicacion--nacional/b99663bb-9023-47d1-b54a-41f74cca0b1e>
- IDEAM.** (2010). República de Colombia Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Bogotá, Colombia. Editorial Scripto Ltda. Descargado de <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Segunda%20comunicacion%20nacional%20Espanol%20Colombia.pdf>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA.** (2015a). Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Bogotá, Colombia. Unatintamedios. ISBN 978-958-8902-56-2. Descargado de [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022963/escenarios\\_cambioclimaticodepartamental/Estudio\\_tecnico\\_completo.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022963/escenarios_cambioclimaticodepartamental/Estudio_tecnico_completo.pdf)
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA.** (2015b). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional - Regional: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (pp. 9). ISBN 978-958-8902-57-9. Descargado de [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022965/documento\\_nacional\\_regional.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022965/documento_nacional_regional.pdf)
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA.** (2017). Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia. Descargado de [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023731/TCNUCC\\_COLOMBIA\\_CMNUCC\\_2017\\_2.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023731/TCNUCC_COLOMBIA_CMNUCC_2017_2.pdf)

- IPCC.** (2000). Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Nebojsa Nakicenovic y Rob Swart, Eds.). Cambridge; New York: Cambridge University Press. (OCLC: ocm44652561)
- IPCC.** (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)] (pp. 9 y 13). IPCC, Ginebra, Suiza, 157 pp. Descargado de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf)
- IPCC.** (2018). Summary for Policymakers. In Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. ([Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)])
- IPCC.** (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32, doi:10.1017/9781009157896.001
- IPCC.** (2022a). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- IPCC.** (2022b). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001. In Press
- Jaramillo-Robledo, A., Chaves-Córdoba, B.** (2000). Distribución de la precipitación en Colombia mediante conglomeración estadística. *Cenicafé*, 51(2), 102-113.
- Kiehl, J.T., Hack, J.J., Bonan, G.B., Boville, B.A., Williamson, D.L., Rasch, P.J.** (1998). The National Center for Atmospheric Research Community Climate Model: CCM3, *Journal of Climate*, 11(6), 1131-1149.
- Loaiza-Cerón, W, Kayano, M.T., Andreoli, R.V., Avila-Diaz, A., de Souza, I.P, Souza R.A.F.** (2021). Pacific and Atlantic Multidecadal Variability Relations with the Choco and Caribbean Low-Level Jets during the 1900–2015 Period. *Atmosphere*, 12(9), 1120. <https://doi.org/10.3390/atmos12091120>
- Magrin, G.O., Marengo, J., Boulanger, J.P., Buckeridge, M.S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F.R., Vicuña, S.** (2014). Central and South America. In: Barros, V.R., et al., Eds., Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part B: Regional Aspects, Cambridge University Press, Cambridge, 1499-1566
- Manciu, A., Krause, A., Rammig, A., Quesada, B.** (2020). Impacts of land cover changes and global warming on climate in Colombia using the regional climate model WRF, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7093, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7093>
- Martínez, J.A., Arias, P.A., Castro, C., Chang, H.I., Ochoa-Moya, C.A.** (2019). Sea surface temperature-related response of precipitation in northern South America according to a WRF multi-decadal simulation. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2136-2155. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.5940>
- Martínez, J.A., Arias, P.A., Junquas, C., Espinoza, J.C., Condom, T., Dominguez, F., Morales, J.S.** (2022). The Orinoco low-level jet and the cross-equatorial moisture transport over tropical South America: lessons from seasonal WRF simulations. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, <https://doi.org/10.1029/2021JD035603>, in press.

- Masui, T., Matsumoto, K., Hijioka, Y., Kinoshita, T., Nozawa, T., Ishiwatari, S., Kato, E., Shukla, P.R., Yagamata, Y., Kainuma, M.** (2011). An emission pathway for stabilization at 6 Wm<sup>-2</sup> radiative forcing. *Climatic Change*, 109(1-2), 59-76. doi: 10.1007/s10584-011-0150-5
- McAdam, J.** (2016). Climate Change-related Displacement of Persons. In: The Oxford Handbook of 2 International Climate Change Law [Gray, K.R., R. Tarasofsky, and C. Carlarne, (eds.)], Oxford 3 University Press, Oxford, p. pp. 519.
- McInerney, D., Lempert, R., Keller, K.** (2012). What are robust strategies in the face of uncertain climate threshold responses? *Climatic change*, 112(3), 547-568.
- Mejía, J.F., Mesa, O.J., Poveda, G., Vélez, J.I., Hoyos, C.D., Mantilla, R.I., Barco, J., Cuartas, A., Montoya, M.I., Botero, B.A.** (1999). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *Dyna*, 127, 7-26.
- Oglesby, R., Rowe, C., Grunwaldt, A., Ferreira, I., Ruiz, F., Campbell, J., Alvarado, L., Argenal, F., Olmedo, B., del Castillo, A., Lopez, P., Matos, E., Nava, Y., Perez, C., Perez, J.** (2016). A High-Resolution Modeling Strategy to Assess Impacts of Climate Change for Mesoamerica and the Caribbean. *American Journal of Climate Change*, 5(2), 202-228. doi: 10.4236/ajcc.2016.52019
- Ortega, G., P.A. Arias, P.A., Villegas, J.C., Marquet, P.A., Nobre, P.** (2021). Present-day and future climate over Central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, 41(15), 6713-6735. doi: 10.1002/joc.7221
- Otto-Portner, H., Scholes, B., Agard, J., Archer, J., Arneth, E., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W.L., Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M.A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, K., Ngo, H.T.** (2021). IPBES-IPCC co-sponsored workshop report synopsis on biodiversity and climate change. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4782538>
- Pabón J.D., Eslava J.A., Pelkowski J., Montoya G.J., Vega E.E.** (2001). Resultados de la simulación del clima por CCM3. *Meteorología Colombiana*, 4, 61-64.
- Pabón-Caicedo, J.D., Arias, P.A., Carril, A.F., Espinoza, J.C., Fita-Borrel, L., Goubanova, K., Lavado, W., Masiokas, M., Solman, S., Villalba, R.** (2020). Observed and projected hydroclimate changes in the Andes. *Frontiers Earth Sciwncwa*, 8, 61. doi:10.3389/feart.2020.00061
- Pabón-Caicedo, J.D., Eslava-Ramírez, J.A., Gómez-Torres, R.E.** (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 4, 47-59. (Bogotá, D.C. – Colombia).
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J.** (2015). Summer precipitation projections over northwestern South America from CMIP5 models. *Global Planetary Change*, 131, 11-23.
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J.** (2017). Climate change projections of boreal summer precipitation over tropical America by using statistical downscaling from CMIP5 models. *Environmental Research Letters*, 12 124011.
- Patt, A.G., Tadross, M., Nussbaumer, P., Asante, K., Metzger, M., Rafael, J., Goujon, A., Brundrit, G.** (2010). Estimating least-developed countries' vulnerability to climate-related extreme events over the next 50 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(4), 1333-1337. doi: 10.1073/pnas.0910253107
- Posada-Marín, J.A., Rendón, A.M., Salazar, J.F., Mejía, J.F., Villegas, J.C.** (2019). WRF downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. *Climate Dynamics*, 52(5), 3609-3629. doi: 10.1007/s00382-018-4403-0
- Poveda, G.** (2004). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 28, 201-222.
- Poveda, G., Álvarez, D.M., Rueda, O.A.** (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics* 36 (11-12), 2233-2249. doi:10.1007/s00382-010-0931-y
- Poveda, G., Jaramillo, L., Vallejo, L.F.** (2014). Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. *Water Resources Research*, 50(1), 98-118. doi: <https://doi.org/10.1002/2013WR014087>

- Poveda, G., Mesa, O.** (1999). La Corriente de Chorro Superficial del Oeste (“del CHOCÓ”) y otras dos corrientes de chorro atmosféricas sobre Colombia: Climatología y Variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 23, 517-528.
- Poveda, G., Mesa, O.J.** (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11), 1675-1678. doi: <https://doi.org/10.1029/1999GL006091>
- Poveda, G., Mesa, O.J., Salazar, L.F., Arias, P.A., Moreno, H.A., Vieira, S.C., Alvarez, J.F.** (2005). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228-240. doi: 10.1175/MWR-2853.1
- Poveda, G., Waylen, P.R., Pulwarty, R.** (2006). Modern climate variability in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 234, 3-27. doi: 10.1016/j.palaeo.2005.10.031
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafaj, P.** (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1-2), 33-57. doi: 10.1007/s10584-011-0149-y
- Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O’Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J.C., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Tavoni, M.** (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Roncancio, D., Cutter, S., Nardocci, A.** (2020). Social vulnerability in Colombia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101872. doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101872
- Salazar, A., Sánchez-Andrade, A., Villegas, J.C., Salazar-Villegas, J.F., Ruiz-Carrascal, D., Sitch, S., Restrepo, J.D., Poveda, G., Feeley, K., Mercado, L., Arias, P.A., Sierra, C., Uribe, M., Pérez, J., Rendón, A.M., Murray-Tortarolo, G., Mercado-Bettín, D., Posada-Marín, J., Zhuang, Q., Qianlai, X., Dukes, J.** (2018). The ecology of peace: Preparing Colombia for new political and planetary climates. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(9), 525-531, doi:10.1002/fee.1950
- Schwalm, C. R., Glendon, S., Duffy, P.B.** (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33), 19656-19657. doi: 10.1073/pnas.2007117117
- Sheridan, P., Smith, S., Brown, A., Vosper, S.** (2010). A simple height-based correction for temperature downscaling in complex terrain. *Meteorological Applications*, 17: 329-339. <https://doi.org/10.1002/met.177>
- Sierra, J.P., Arias, P.A., Durán-Quesada, A.M., Tapias, K.A., Vieira, S.C., Martínez, J.A.** (2021) The Choco low-level jet: past, present and future. *Climate Dynamics*, 56, 2667-2692. doi: 10.1007/s00382-020-05611-w
- Sierra, J.P., Arias, P.A., Vieira, S.C.** (2015). Precipitation over northern South America and its seasonal variability as simulated by the CMIP5 models. *Advances in Meteorology*, 1-23. doi: 10.1155/2015/634720
- Sierra, J.P., Arias, P.A., Vieira, S.C., Agudelo, J.** (2018). How well do CMIP5 models simulate the low-level jet in western Colombia? *Climate Dynamics*, 51(5-6), 2247-2265. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4010-5>
- Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J., Kyle, G.P., Volke, A., Patel, P., Edmonds, J.A.** (2011). RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109(1-2), 77-94, doi: 10.1007/s10584-011-0151-4
- UNDP** (United Nations Development Program). (2010). Mainstreaming climate change in Colombia screening for risks and opportunity. Decargado de: [www.undp.org/content/dam/aplaws/publication/en/publications/environment-energy/www-ee-library/climate-change/mainstreaming-climatechange-in-colombia/CC%20risk%20Mainstreaming%20Climate%20Change%20in%20ColombiaEN.pdf](http://www.undp.org/content/dam/aplaws/publication/en/publications/environment-energy/www-ee-library/climate-change/mainstreaming-climatechange-in-colombia/CC%20risk%20Mainstreaming%20Climate%20Change%20in%20ColombiaEN.pdf)
- Urrea, V., Ochoa, A., Mesa, O.** (2019). Seasonality of rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55, 4149-4162, <https://doi.org/10.1029/2018WR023316>
- Vallejo-Bernal, S.M., Urrea, V., Bedoya-Soto, J.M., Posada, D., Olarte, A., Cárdenas-Posso, Y., Ruiz-Murcia, F., Martínez, M.T., Petersen, W., Huffman, G.J., Poveda, G.** (2021). Ground Validation of TRMM 3B43 V7 Precipitation Estimates over Colombia. Part I: Monthly and Seasonal Timescales. *International Journal of Climatology*, 41(4), 601–624, doi: 10.1002/joc.6640

- 
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, Smith, S.J., Rose, S. K.** (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1), 5. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z
- Van Vuuren, D.P., Stehfest, E., den Elzen, M.G.J., Kram, T., van Vliet, J., Deetman, S., Isaac, M., Goldewijk, K.K., Hof, A., Beltran, A.M., Oosternrikj, R., van Ruijven, B.** (2011). RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change*, 109(1-2), 95-116, doi: 10.1007/s10584-011-0152-3
- Yin, L., Fu, R., Shevliakova, E., Dickinson, R.E.** (2013). How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America? *Climate Dynamics*, 41(11-12), 3127-3143, doi: 10.1007/s00382-012-1582-y

Artículo original

## El huracán que pasó sobre la Isla de San Andrés en 1911

### The hurricane that affected San Andrés Island in 1911

Juan C. Ortiz<sup>1,\*</sup>, Mario Conde<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de investigación en Geociencias-GEO4, Departamento de Física y Geociencias, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

<sup>2</sup> Grupo de investigación en Geociencias-GEO4, Departamento de Física y Geociencias, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

### Resumen

En el presente estudio se analizó la dinámica de vientos y del oleaje durante el paso del huracán de 1911 sobre la Isla de San Andrés. A partir de un modelo paramétrico de viento acoplado al modelo de generación y propagación de olas SWAN, se generaron los campos de vientos y oleaje durante el paso de este huracán por el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Los modelos de viento y de oleaje se calibraron y validaron con datos de campo registrados por una boya oceanográfica durante el paso del huracán Matthew en el 2016. Se encontró que los vientos de mayor intensidad (cerca de los 200 km/h) generados por el huracán se ubicaron a 22 km de la costa norte de San Andrés y a 65 km de la costa sur de Providencia. En cuanto al oleaje, este fue de menor intensidad que el generado por el huracán Iota en el 2020 y el Joan en 1988. La extensión de la plataforma costera de San Andrés y la dirección del oleaje producido por el huracán de 1911 podrían haber provocado que la marejada ciclónica asociada fuera más significativa que la de otros huracanes. Por último, la metodología aquí descrita puede utilizarse para reconstruir huracanes en cualquier lugar con información escasa y así mejorar nuestra habilidad para predecir la respuesta costera al potencial impacto de futuros huracanes.

**Palabras clave:** Huracanes históricos; Mar Caribe; Oleaje extremo; Vientos extremos.

### Abstract

This study examined the winds and wave dynamics over the Island of San Andrés during the passage of the unnamed hurricane of 1911. Wind and wave fields were generated using a parametric wind model coupled to the wave generation and propagation model SWAN. The wind and wave models were calibrated and validated with field data recorded by an oceanographic buoy during the passage of Hurricane Matthew in 2016. We found that the highest intensity winds (close to 200 km/h) were produced 22 km from the north coast of San Andrés and 65 km from the south coast of Providencia. Moreover, we found that the waves were smaller than those generated by hurricanes Iota in 2020 and Joan in 1988. Due to the extension of the coastal platform of San Andrés and the direction of the waves produced by the hurricane, the storm surge associated with the 1911 hurricane may have been more significant than other hurricanes. This methodology can be used to reconstruct hurricanes where information is scarce and, thus, improve our ability to predict the coastal response to the potential impact of future hurricanes.

**Keywords:** Historical hurricane; Caribbean Sea; Extreme waves; Extreme winds.

**Citación:** Ortiz JC, Conde M. El huracán que pasó sobre la Isla de San Andrés en 1911. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):795-806, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1743>

**Editor:** Horacio Torres Sánchez

**\*Correspondencia:**

Juan Carlos Ortiz;  
[jortiz@uninorte.edu.co](mailto:jortiz@uninorte.edu.co)

**Recibido:** 9 de agosto de 2022

**Aceptado:** 8 de septiembre de 2022

**Publicado en línea:** 22 de septiembre de 2022



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

### Introducción

Las regiones costeras continentales de Colombia no suelen verse afectadas por los efectos devastadores de los huracanes. De hecho, en los últimos 100 años, menos de 15 tormentas importantes han impactado la porción de 1.600 km de línea de costa continental (Ortiz, 2012). La península de La Guajira, situada en el extremo noreste, usualmente es la más

afectada, en tanto que las áreas menos afectadas son la zona central y la zona suroeste del litoral en límites con Panamá. Hasta la fecha, los huracanes Joan en 1998 y Mathew en el 2016 han sido los de mayor impacto en nuestra costa caribe (Ortiz *et al.*, 2022).

En contraste, el área insular de Colombia en el Mar Caribe, es decir, el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, vive una situación muy diferente; allí el paso de tormentas y huracanes es un fenómeno más común. La isla de San Andrés, con una superficie de 27 km<sup>2</sup>, es la más grande y poblada del archipiélago y sus 75.000 habitantes se concentran principalmente a lo largo de la costa noreste, donde también se sitúa el aeropuerto. Ubicada entre los 12,48° y los 12,60° N y los 81,50° y los 81,74° O, la isla se caracteriza por sus playas de arena blanca y aguas cristalinas. El Archipiélago recibe aproximadamente unos 500.000 turistas al año. Las islas de Providencia y Santa Catalina, que tienen una población conjunta de solo 5.000 habitantes, tienen una superficie total de 17 km<sup>2</sup> y están rodeadas por un conjunto de pequeños cayos y un complejo coralino de 22 km de longitud que es el segundo más largo del mar Caribe después del arrecife de Belice. Por sus atributos culturales, naturales e históricos, la UNESCO declaró el archipiélago como Reserva de la Biosfera Seaflower (Ortiz *et al.*, 2015; Vargas, 2004; Meisel, 2003; UNESCO, 2022).

En estudios anteriores se ha informado de las tormentas y huracanes que se han acercado lo suficiente a la isla de San Andrés en los últimos 100 años como para causar algún tipo de impacto (Ortiz *et al.*, 2015). El centro de ojo de los eventos se ha localizado por lo menos a 150 km de la isla. Según Wornom *et al.* (2002), esta distancia, medida desde el ojo de un huracán, debe considerarse como límite para que se den efectos significativos en una zona costera. En orden cronológico, los huracanes que han cumplido con este criterio son el Hattie (1961), el Alma (1970), el Irene (1971), el Joan (1988), el Cesar (1996), el Katrina (1999), el Beta (2005), y el Iota (2020) (Tabla 1), de los cuales cerca del 40 % pasó por el sur de la isla, en tanto que el 60 % restante pasó por el oriente. Por lo menos un huracán afecta a la isla cada 10 años, en promedio (Ortiz *et al.*, 2015).

Durante la primera mitad del siglo XX, a los huracanes no se les asignaban nombres, sino que se numeraban secuencialmente y, en general, se los denominaba tormentas. La *Historical Hurricane Tracks* de la *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA) posee el registro de las tormentas y huracanes que han atravesado el océano Atlántico y el mar Caribe desde 1851 (Historical Hurricane Tracks-NOAA, 2022). Según esta base de datos, el ojo de un huracán sin nombre asignado pasó en 1911 sobre la isla de San Andrés en algún momento entre el 9 y el 10 de septiembre, sin embargo, no hay registros en la literatura científica sobre sus características (velocidad del viento, oleaje, marejada ciclónica), ni sobre sus efectos.

**Tabla 1.** Tormentas y huracanes cuyo ojo ha estado a menos de 150 km de San Andrés (Historical Hurricane Track-NOAA, 2022; Ortiz, 2012)

Nombre	Categoría	Fecha	Distancia entre San Andrés y el ojo de la tormenta (km)	Vientos máximos (km/h)
'Sin nombre' 1911	H2	1911-09-09	A determinar	A determinar
Hattie	Tormenta tropical	1961-09-17	60	101,8
Alma	Tormenta tropical	1970-05-18	131	46,3
Joan	H3	1988-19-21	82	203,7
Cesar	Tormenta tropical	1996-07-28	63	120,4
Beta	Tormenta tropical	2005-10-28	70	92
Iota	H4	2020-11-16	103	250

En términos generales, el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina tiene un clima tropical húmedo influenciado por los vientos alisios del noreste. A lo largo del año, los regímenes de vientos en el archipiélago y en la mayor parte de la costa continental colombiana están condicionados por las oscilaciones de alta presión de las Azores, por las fluctuaciones en la zona de convergencia intertropical (ZCIT), y por el tránsito de frentes fríos y tormentas (Ortiz *et al.*, 2013; Vargas, 2004).

La magnitud del viento oscila entre 6,3 y 7,0 m/s de diciembre a marzo y entre 4,5 y 6,2 m/s durante abril y noviembre. Dentro del tramo de 2,5 km que separa la playa de la barrera arrecifal, las olas son de poca altura (0,30 a 0,60 m), con un período de 4 a 5 segundos (IDEAM, 2001). En contraste, el régimen de olas en las aguas profundas que rodean a San Andrés (es decir, las aguas más allá de la barrera arrecifal) se caracteriza por olas de alturas entre los 0,4 y los 3,0 m provenientes del noreste. Como resultado de la estrecha plataforma de la isla, ubicada en el sureste, esta área está expuesta a la mayor parte de la energía de las olas, por lo que presenta una gran erosión.

En términos de oleaje extremo, San Andrés se clasifica como el lugar más expuesto a huracanes en esa zona de Colombia (Ortiz, 2012) y, aunque ninguno de los huracanes previamente reportados con centro localizado por lo menos a 150 km pasó por la isla, un par de ellos fueron muy destructivos (el Joan en 1998 y el Iota en el 2020). A pesar de su poca frecuencia, la gran capacidad destructiva de los huracanes que pasan cerca del área insular de Colombia, así como su mayor intensidad debido a los fenómenos del calentamiento global (Knutson *et al.*, 2020), la compresión de los parámetros de viento y oleaje de los huracanes del pasado resulta de gran importancia para prever la respuesta costera al potencial impacto de los que ocurran en el futuro.

Con el fin de comprender los impactos de los huracanes en áreas vulnerables al cambio climático, y dado que la velocidad del viento y el oleaje del huracán de 1911 (único evento conocido cuyo centro pasó sobre la isla de San Andrés), no quedaron registrados, el objetivo del presente trabajo fue reconstruir dicha dinámica durante a partir de un modelo paramétrico de viento acoplado al modelo de generación y propagación de olas SWAN. La información que así se recopiló aporta a la comprensión de estos fenómenos en esa área del Caribe colombiano.

## Materiales y métodos

### Modelamiento matemático

Para la reconstrucción del campo de vientos se utilizó el modelo paramétrico de viento de huracanes de Lizano (1990, 2006). Según este modelo, el campo de vientos desde el centro y distribuido radialmente, se puede calcular de acuerdo a las siguientes ecuaciones paramétricas:

$$V(r) = V_{max} \frac{2Rr}{r^2 + R^2} \quad r < R \quad (1a)$$

$$V(r) = V_{max} \frac{V_{max}}{C_1 r^k} \log \frac{R}{C_2 r^m} \quad r > R \quad (1b),$$

donde  $R$  es el radio de vientos máximo, y  $C_1$ , igual a 3.354,  $C_2$  a 0.001265,  $k$  a 0.115128 y  $m$  a 1.607, son constantes. Esta parametrización se construyó a partir de los trabajos originales de Holland (1980), Collins & Viehman (1971) y Jeleznianski (1974). La velocidad máxima del viento,  $V_{max}$  (en la pared del ojo), se calculó utilizando la siguiente ecuación paramétrica:

$$V_{max} = K [(P_n - P_o)^{1/2} - fR_{max}] + 0.5 V_F \quad (2),$$

donde  $K$  es igual a 0,885 (Lizano, 2006),  $P_o$  es la presión en el centro de la tormenta,  $P_n$  la presión ambiental y  $f$  el parámetro de Coriolis ( $f = 2\Omega \sin\phi$ , donde  $\Omega$  es la rapidez angular terrestre y  $\phi$  es la latitud), variables meteorológicas que provienen de la base de datos HURDAT2.  $V_F$  es la velocidad de avance del huracán y es importante para simular la asimetría del viento en el cuadrante derecho (Young, 2003).

El modelo utilizado para la generación y propagación del oleaje producto del campo de viento fue el modelo SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) de **Booij et al.** (1999), versión 41.31. SWAN es un modelo espectral de oleaje de tercera generación que permite calcular, entre otras cosas, la altura significativa de las olas ( $H_s$ ), y el período y la dirección forzadas por el viento, y es ampliamente utilizado en la comunidad científica por la gran variedad de procesos físicos que incluye, siendo además de libre acceso. Según **Ortiz & Mercado** (2008), el modelo SWAN es una buena opción para simular la propagación de las olas desde aguas profundas hasta la costa. Por otro lado, el uso del modelo de viento paramétrico de **Lizano** (2006) acoplado al modelo SWAN, se validó con los datos de las boyas oceanográficas de la *National Data Buoy Center* (NDBC) en las escalas oceánica y costera (**Lizano et al.**, 2001; **Lizano**, 2006; **Ortiz & Mercado**, 2008; **Dietrich et al.**, 2011). La batimetría utilizada provino del ETOPO1 Global Relief.

### Validación de la metodología

Aunque el acople de ambos modelos fue validado en trabajos previos, en este se hizo una validación propia del modelo paramétrico de vientos acoplado con el modelo SWAN durante el paso del huracán Matthew. Este huracán pasó por el mar Caribe entre el 30 de septiembre y el 4 de octubre del 2016 afectando varias islas en el Caribe y la costa continental de Colombia. Los resultados de ambos modelos (vientos y olas) se compararon con los datos de la boya direccional No. B42058 de la NDBC en el centro del mar Caribe ( $-74,575^\circ$  O y  $14,888^\circ$  N). Para el caso de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) también se compararon los valores con el modelo de la NOAA, Wave Watch III o WWIII (**Tolman**, 1999). El dominio computacional se definió entre los  $-78^\circ$  y  $-66^\circ$  O y los  $8^\circ$  y  $19^\circ$  N.

Para la correlación entre los resultados numéricos de viento y oleaje y los datos de la boya B42058, se usó el índice  $D$  de Willmott y el índice de sesgo promedio (*bias*) (**Willmott**, 1981). Estos índices se usan frecuentemente para la comparación de resultados numéricos con datos experimentales de boyas oceanográficas y están definidos por:

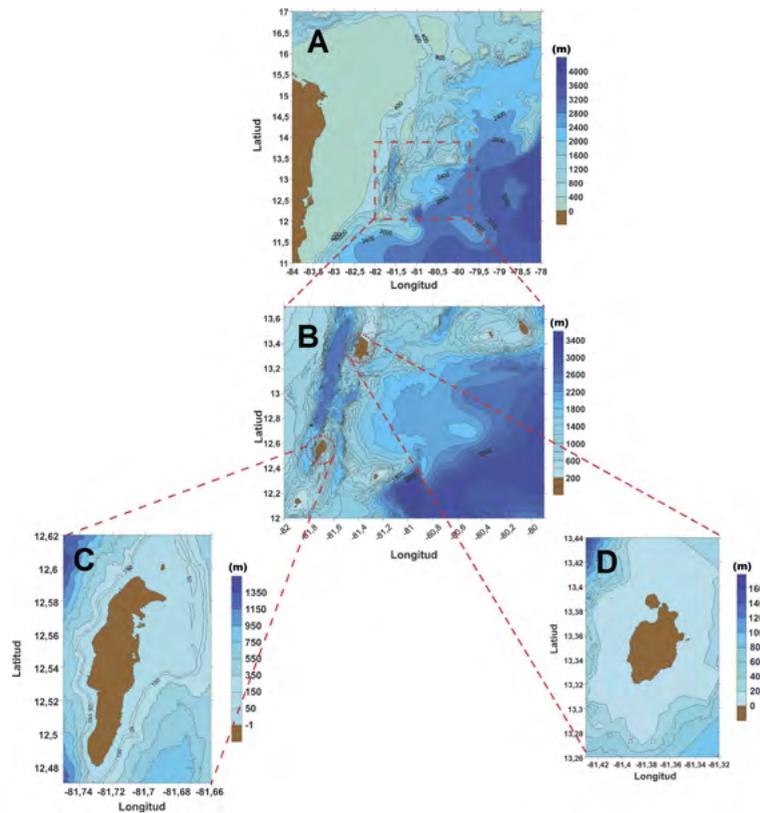
$$D(P) = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (P_n - O_n)^2}{\sum_{n=1}^N (|P_n - O| + |O_n - O|)^2} \quad (3)$$

$$Bias(P) = \frac{\sum_{n=1}^N (P_n - O_n)}{\sum_{n=1}^N O_n} \quad (4),$$

donde  $N$  es el número de valores evaluados,  $P_n$  representa los valores numéricos,  $O_n$  los datos observados y  $O$  el valor medio de los datos. A manera de ejemplo, un sesgo de  $-0,15$  indica que los datos numéricos están subestimados en un 15 %, en promedio. Asimismo, un índice  $D$  más cercano a 1 indica una mayor correlación entre los resultados numéricos y los datos medidos.

Para modelar con mejor precisión los campos de viento y olas en los dominios locales, se utilizó el proceso de mallas anidadas (*nested grids*). Se diseñaron las siguientes cuatro mallas: la principal, que incluyó la batimetría a escala oceánica (**Figura 1A**), la intermedia, que incluyó la batimetría de la plataforma insular de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (**Figura 1B**), la malla local para San Andrés (**Figura 1C**) y la malla local para Providencia y Santa Catalina (**Figura 1D**).

La validación permitió escoger una resolución espacial de  $0,08333^\circ$  y un paso de tiempo de 30 min para la malla principal, y una resolución de  $0,05^\circ$  y un paso de tiempo de 30 min para la malla intermedia. Para la batimetría se utilizó la información de la cartas náuticas 201 y 200 de la isla de San Andrés. Para las mallas locales se escogió una resolución de  $0,0005^\circ$  y un paso de tiempo de 30 min. Todas las características y dominios computacionales utilizados en el modelamiento, se muestran en la **tabla 2**. Los gráficos se generaron en la plataforma MATLAB. Por último, se compararon los valores de magnitud del viento y la altura significativa del huracán de 1911 con los valores reportados del huracán Joan y del Iota.



**Figura 1.** Mallas computacionales usadas en el modelamiento con SWAN: **A)** malla principal; **B)** malla intermedia; **C)** malla local para San Andrés, y **D)** malla local para Providencia y Santa Catalina con resoluciones de 0,08333°, 500 m, 5 m y 5 m, respectivamente.

**Tabla 2.** Características de las mallas computacionales usadas en el modelamiento con SWAN

Malla	Longitud (grados)	Latitud (grados)	Tamaño de celda (grados)	Paso de tiempo
Principal	-84 -78 O	11 - 17 N	0,08333°	30 min
Intermedia	-82,0 -79,9 O	12,0 – 13,7 N	0,05°	30 min
Local-San Andrés	-81,74 -81,67 O	12,47 – 12,62 N	0,005°	30 min
Local-Providencia y Santa Catalina	-81,75 -81,68 O	13,26 – 13,44 N	0,005°	30 min

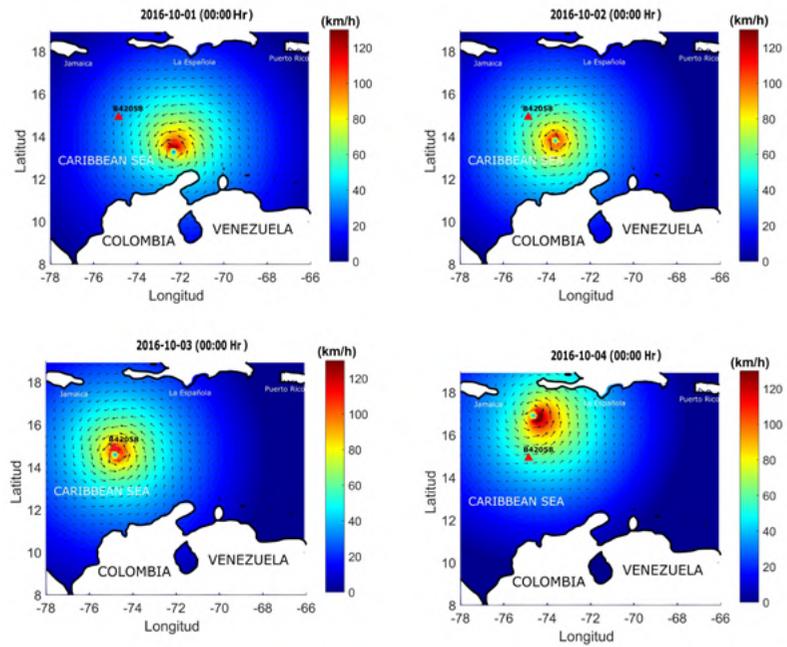
## Resultados y discusión

Presentamos primero los resultados de la calibración propia del modelo paramétrico de vientos acoplado al modelo SWAN para después describir la dinámica de los vientos y el oleaje en el área del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina durante el paso del huracán de 1911.

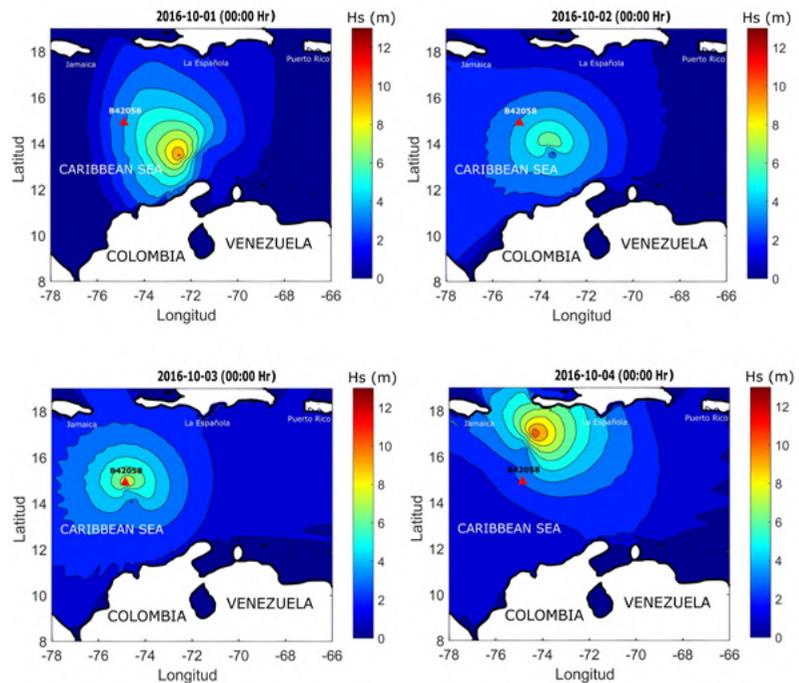
### Calibración y validación

Los campos de viento del huracán Matthew (**Figura 2**) durante los cuatro días de su paso por el mar Caribe revelan variaciones temporales de las velocidades máximas. Particularmente en el área adyacente al ojo, las mayores intensidades oscilaron entre los 80 km/h (**Figura 2, panel 2**) y más de 130 km/h (**Figura 2, panel 4**). Durante su paso cerca a la boya B42058 (**Figura 2, triángulo**), las velocidades registradas fueron de más de 130 km/h.

En cuanto al campo de oleaje, los mayores valores de altura significativa durante el paso del huracán Matthew oscilaron entre 6 m y 9 m (**Figura 3**). Como era de esperarse, la variación temporal de las máximas alturas significativas de oleaje coincidió con la variación temporal de los máximos valores de vientos. Además, se observó que en el área cercana a la boya B42058 los valores de altura significativa de ola alcanzaron magnitudes de hasta 8 m.



**Figura 2.** Campo de vientos durante el paso del huracán Matthew usando el modelo paramétrico.

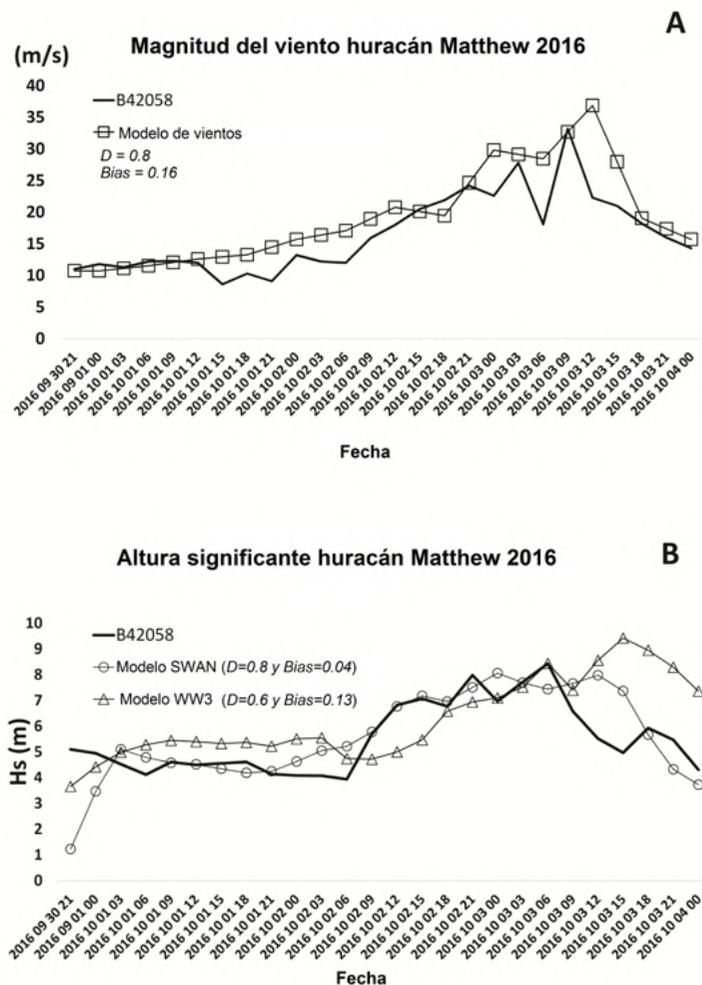


**Figura 3.** Campo de altura significativa (Hs) durante el paso del Huracán Matthew usando el modelo SWAN

El análisis de correlación entre los datos del modelo de vientos y los datos medidos por la boya B42058 arrojó un índice  $D$  y un sesgo de 0,8 y 0,16 (**Figura 4A**), respectivamente, lo que indica que los datos del modelo de vientos fueron consistentes con los datos de la boya experimental, pero sobreestimaron la magnitud del viento en un 16 %, en promedio. Para la simulación del oleaje, se hizo un análisis de sensibilidad utilizando valores de resolución espacial de  $0,16667^\circ$  y  $0,08333^\circ$  y pasos de tiempo de 3 h, 1 h y 30 min. Se eligió una resolución espacial de  $0,08333^\circ$  y un paso de tiempo de 30 min; los resultados fueron consistentes con los datos de la boya B42058, pero sobreestimaron los valores de  $H_s$  en un 4 % en el SWAN (**Figura 4B**). Estos resultados fueron coherentes con los obtenidos anteriormente por **Lizano (2006)**, **Ortiz et al. (2008)**, **Ortiz & Mercado (2008)** y **Dietrich et al. (2011)**.

### El Huracán de 1911

De acuerdo con la base de datos del *National Hurricane Center* (NHC), el huracán de 1911 ingresó al área de estudio delimitada por el dominio principal de análisis (**Figura 1A**) el 9 de septiembre de 1911 a las 06:00 HR (UTC) como un huracán de categoría 1 y la abandonó en algún momento después de las 06:00 HR (UTC) del 10 de septiembre como huracán de categoría 2. Probablemente el ojo tocó tierra en San Andrés en algún momento entre la noche del 9 de septiembre y las primeras horas del 10 de septiembre, con vientos



**Figura 4.** Comparación de las series de tiempo de los datos del modelo de vientos y los datos medidos por la boya B42058. **A.** Magnitud del viento (m/s); **B.** altura significativa  $H_s$  (m)

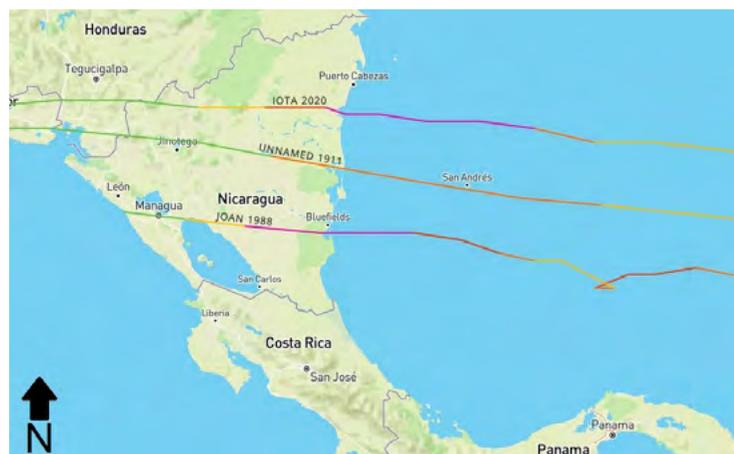
máximos de cerca de 157 km/h (categoría 2). Este caso sería el primer huracán reportado en la literatura cuyo ojo pasó directamente sobre la Isla de San Andrés. Con respecto a Providencia y Santa Catalina, el ojo estuvo a unos 96 km durante las últimas horas del 9 de septiembre. Los parámetros del huracán de 1911 se pueden ver en la **tabla 3**, en tanto que su trayectoria y la de los huracanes Joan de 1988 e Iota del 2020 se presentan en la **figura 5**.

Los resultados del modelamiento de la magnitud del viento del huracán de 1911 (**Figura 6**) muestran que las zonas norte (N) y noreste (NE) de la Isla de San Andrés sufrieron los embates más fuertes en la noche del 9 de septiembre, con vientos del noreste de magnitudes de 100 km/h (**Figura 6B, C**). En cuanto a las islas de Providencia y Santa Catalina, estas fueron principalmente afectadas por vientos del este con magnitudes de alrededor de 115 km/h.

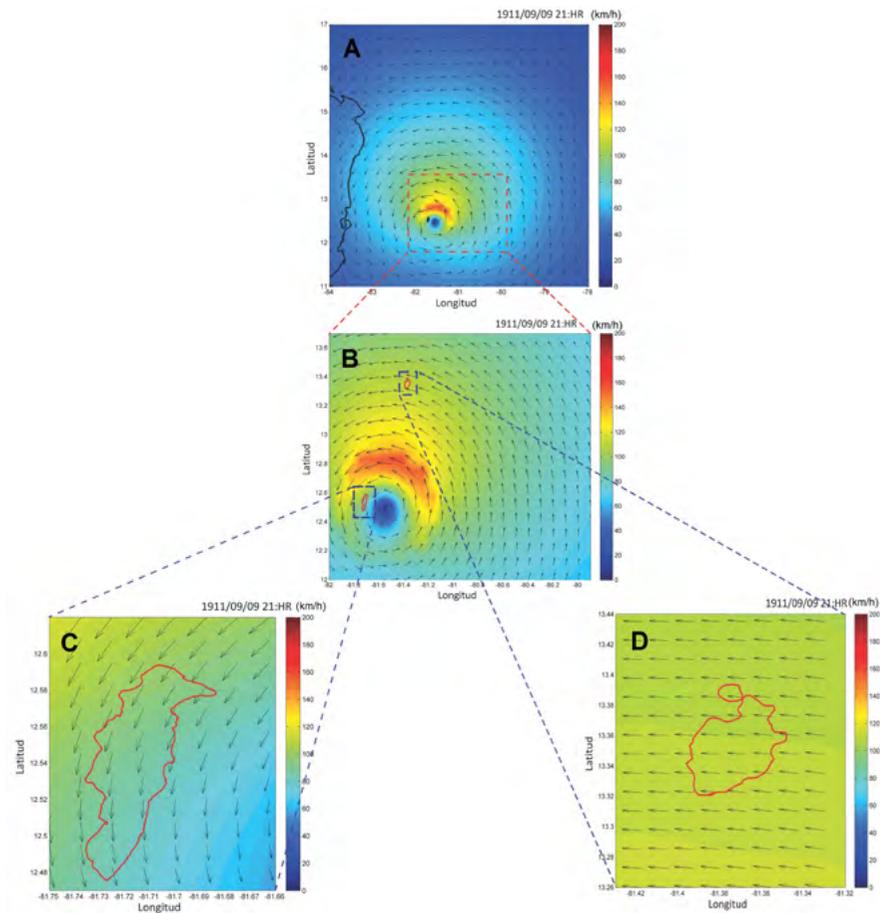
El modelamiento del oleaje muestra que, en general, el oleaje más alto generado por el huracán de 1911 afectó a toda la costa este del archipiélago. La costa oeste de la Isla de San Andrés, por el contrario, permaneció protegida en una zona de sombra creada por la refracción de las olas en la parte norte y sur de la isla (**Figura 7**). La altura significativa de mayor valor en San Andrés fue de 3,5 m con dirección noreste en las primeras horas del 9 de septiembre de 1911 y la altura significativa más alta en Providencia y Santa Catalina fue de 5,0 m con dirección este. Al igual que lo ocurrido en San Andrés, la parte oeste de la isla de Providencia también quedó protegida en una zona de sombra creada por el bloqueo directo del campo de oleaje.

**Tabla 3.** Características del huracán de 1911 reconstruido a partir de los datos históricos del Centro Nacional de Huracanes (NHC) y la Escala Saffir-Simpson

Fecha	Categoría	Distancia estimada entre San Andrés y el ojo de la tormenta (km)	Vientos máximos (km/h)	Presión central (mb)
1911-09-09_00 HR	H1	438	139	990
1911-09-09_06 HR	H1	328	148	992
1911-09-09_12 HR	H2	219	149	979
1911-09-09_18 HR	H2	89	150	969
1911-09-10_00 HR	H2	53	157	970
1911-09-10_06 HR	H2	185	157	975



**Figura 5.** Trayectorias estimadas del huracán de 1911, el huracán Joan de 1988 y el huracán Iota de 2020. (Imagen tomada y modificada de: **Historical Hurricane Track-NOAA**, 2022).

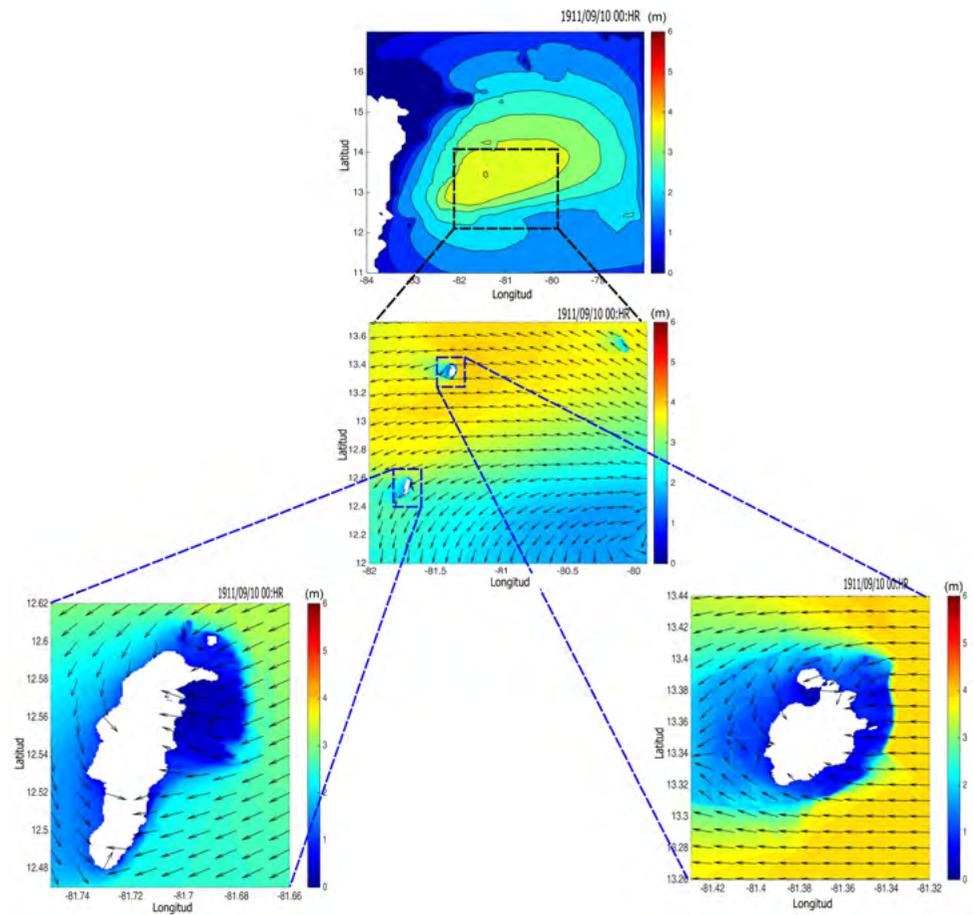


**Figura 6.** Campo de vientos del huracán de 1911 para cada malla computacional usada en el modelo paramétrico de vientos

Es importante destacar que, aunque el ojo del huracán de 1911 estuvo más cerca de la Isla de San Andrés que otros eventos reportados (el huracán Joan y el Iota), los vientos más intensos se localizaron al noreste y no sobre la isla misma, ya que tiene unos 14 km de largo de norte a sur y unos 3 km de ancho de este a oeste y el ojo del huracán se estimó en 24 km.

La longitud de la plataforma ubicada frente a la costa noreste de San Andrés sugiere que la marejada ciclónica asociada con el huracán de 1911 pudo haber sido más significativa que la de otros huracanes debido a la cercanía del centro de baja presión. Las **tablas 4 y 5** resumen los parámetros del huracán de 1911 calculados en el presente estudio y comparados con los de los huracanes Joan e Iota. En San Andrés los vientos máximos históricos fueron los del Iota, en el 2020, que alcanzaron los 170 km/h, en tanto que el oleaje generado por el huracán Joan fue el mayor (10 m). El huracán de 1911 tuvo probablemente vientos de hasta 110 km/h y generó olas de hasta 3,0 m. Los vientos más fuertes del Joan, por su parte, ubicados en el cuadrante derecho, tuvieron suficiente alcance para generar grandes olas capaces de afectar directamente a las islas. En el caso del huracán Iota, la elevada categoría (categoría 4) (**Figura 5**) que adquirió durante su recorrido por la zona del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina fue el principal causante de los altos oleajes registrados en las islas.

Puede concluirse, entonces, que la metodología utilizada en el presente trabajo representa una buena alternativa para la reconstrucción de huracanes históricos cuando no se dispone de los datos experimentales completos.



**Figura 7.** Campo de altura significativa ( $H_s$ ) del Huracán de 1911 para cada dominio o malla computacional usando el modelo SWAN

**Tabla 4.** Resultados del huracán de 1911 comparados con los huracanes Joan de 1988 e Iota de 2020 en San Andrés (**Historical Hurricane Track-NOAA, 2022; Ortiz et al., 2015**)

Nombre	Fecha	Vientos máximos sobre la Isla de SA (km/h)	Valor más alto del oleaje en aguas profundas (m)
Huracán de 1911	1911-09-09	110	3,0
Joan	1988-10-21	120	10,0
Iota	2020-11-16	170	5,0

**Tabla 5.** Resultados del huracán de 1911 comparados con los huracanes Joan e Iota en las islas de Providencia y Santa Catalina (**Historical Hurricane Track-NOAA; Ortiz et al., 2015**).

Nombre	Fecha	Vientos máximos sobre las islas de Providencia y Santa Catalina (km/h)	Valor más alto del oleaje en aguas profundas (m)
Huracán de 1911	1911-09-09	110	4,0
Joan	1988-10-21	100	8,0
Iota	2020-11-16	230	7,0

## Conclusiones

Se aplicó un modelo paramétrico de huracanes acoplado a uno de oleaje para reconstruir los probables campos de viento y olas generados por el huracán de 1911, el cual no había sido reportado en la literatura y cuyo ojo pasó sobre la Isla de San Andrés. La metodología fue validada con datos medidos por la boya B42058 de la NDBC durante el paso del huracán Matthew en el mar Caribe en el 2016.

Los resultados mostraron que el ojo del huracán de 1911 pasó sobre la Isla de San Andrés en algún momento de la noche del 9 de septiembre de 1911 con vientos máximos de 110 km/h. Los vientos más extremos de este huracán (casi 200 km/h) se ubicaron a 22 km de la costa norte de San Andrés y a 65 km de la costa sur de Providencia. Si bien esta tormenta afectó directamente a San Andrés, los resultados de las modelaciones muestran que su impacto habría sido menor que el del huracán Joan en 1988 y el Iota en el 2020. En el caso del Joan, su gran impacto se debió a la dinámica del campo de vientos y oleaje, en tanto que en el caso del Iota, la afectación a la Isla de San Andrés se debió a su intensidad.

La longitud de la plataforma frente a la costa noreste de San Andrés indica que la marejada ciclónica del huracán de 1911 habría sido significativa y probablemente mayor que la del huracán Joan, pero no mayor que la del Iota, por lo que sería importante calcular la marejada ciclónica de estos eventos históricos y compararlas con estudios recientes sobre inundación como el de **Rey et al.** (2021). En países como Colombia, donde la población costera ha aumentado, aunque los huracanes no son tan frecuentes, es de gran interés establecer las características de los eventos históricos para ayudar a comprender y predecir los impactos de futuras amenazas. Esto es especialmente importante hoy, cuando el calentamiento global ha comenzado a afectar la intensidad de los huracanes en el océano Atlántico y el mar Caribe.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Centro de Investigación Oceanográfico e Hidrográfico de la Armada Nacional de Colombia (CIOH) de La Dirección Marítima Nacional de Colombia (DIMAR).

## Contribución de los autores

MC: modelación mediante SWAN del huracán de 1911. JCO: modelación del campo de vientos del huracán de 1911. Ambos autores diseñaron las figuras, redactaron el texto e hicieron el análisis de los resultados y las conclusiones.

## Conflicto de intereses

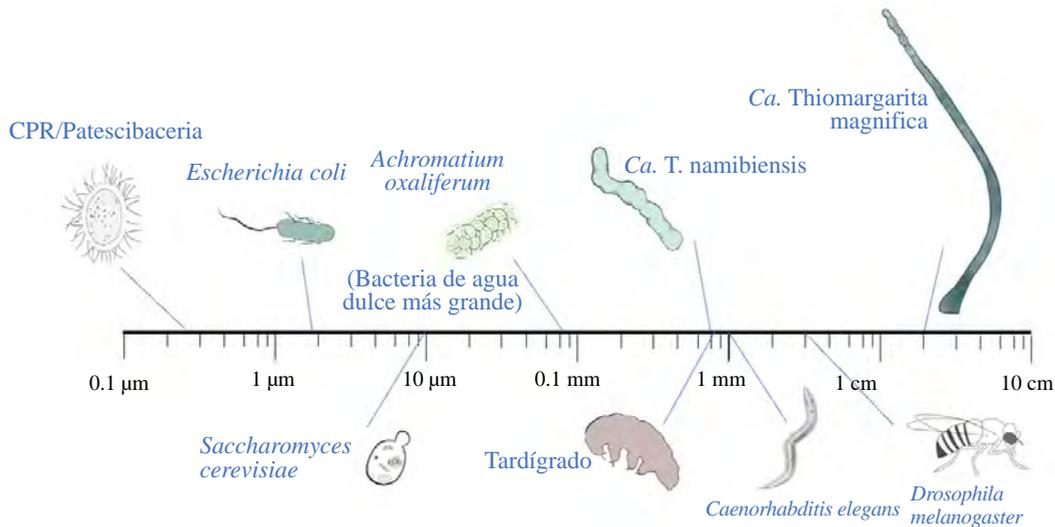
Ninguno

## Referencias

- Booij, N., Ris R.C., Holthuijsen, L.H.** (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research, C4* (104): 7649-7666.
- Collins, J.J., Viehnaman, J.** (1971). A simplified empirical model for hurricane wind fields. Paper No. OTC 1346. *Offshore Technology Conference*.
- Dietrich, J.C., Tanaka, S., Westerink, J.J., Dawson, C.N., Luettich, J.J., Zijlema, M., Holthuijsen, L.M., Smith, J.M., Westerink, L.G., Westerink, H.J.** (2012). Performance of the Unstructured-Mesh, SWAN+ADCIRC Model in Computing Hurricane Waves and Surge. *Journal of Scientific Computing, 52* (2): 468-497.
- Historical Hurricane Tracks-NOAA.** Interactive mapping tool. Fecha de consulta: entre enero y mayo de 2022. Disponible en: <https://coast.noaa.gov/hurricanes/#map=4/32/-80>.
- Holland, J.** (1980). An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review, 108* (8), 1212-1218.

- IDEAM.** (2001). *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2001 Colombia*, 217p. <http://www.ideam.gov.co/documents/40860/219937/primera-comunicacion--nacional/b99663bb-9023-47d1-b54a-41f74cca0b1e>
- Jelesnianski, C.P.** (1974). Special program to list amplitudes of surges from hurricanes (SPLASH), Landfall Storms, TM-46 (COM-72-10807). National Weather Service. NOAA: p.52.
- Knutson, T., Camargo, S., Chan, J., Emanuel, K., Ho, Ch., Kossin J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., Wu, L.** (2020): Tropical Cyclones and Climate Change Assessment Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, E303-E322.
- Lizano, O.** (1990). Un modelo de viento ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico de oleaje de huracanes. *Geofísica*, 33, 75-103.
- Lizano, O.** (2001). Evaluación de modelos numéricos de tercera generación para el pronóstico de oleaje en Centroamérica y México. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 8, 40-49.
- Lizano, O.G.** (2006). Simulación de oleaje de huracán usando modelos de viento paramétricos en un modelo de olas de Tercera Generación. *Boletín Científico CIOH*, 24, 36-47.
- Meisel, A.** (2003). *The Continentalization of the San Andrés Island, Colombia: Panyas, raizales and tourism, 1953-2003*. (2003). Working Documents on Local, N° 37, Banco de la República, 44p.
- NOAA National Geophysical Data Center.** (2009). ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model. NOAA National Centers for Environmental Information. Fecha de consulta: enero y mayo de 2022. Disponible en: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>
- National Data Buoy Center (NDBC).** Station 42058 - Central Caribbean. Fecha de consulta: entre enero y mayo de 2022. Disponible en: <http://www.ndbc.noaa.gov>
- National Hurricane Center. (NHC).** (2022). Educational Resources and Archives. Fecha de consulta: entre enero y mayo de 2022. Disponible en <https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>
- Ortiz, J.C. & Mercado A.** (2008). An Intercomparison of SWAN and WAVEWATCH III models with data from NDBC-NOAA buoys at oceanic scales. *Coastal Engineering Journal*, 50 (1), 47-73.
- Ortiz, J.C.** (2012). Exposure of the Colombian Caribbean Coast, including San Andrés Island, to Tropical Storms and Hurricanes, 1900–2010. *Natural Hazards Journal*, 61, 815-827.
- Ortiz, J.C., Otero, L.J., Restrepo, J.C., Ruiz, J., Cadena, M.** (2013). Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events. *Natural Hazards and Earth System Science*, 13, 2797-2804.
- Ortiz, J.C., Plazas, J., Lizano, L.** (2015). Evaluation of extreme waves associated with cyclonic activity in San Andrés Island on the Caribbean Sea since 1900. *Journal of Coastal Research*, 31 (3), 557-568.
- Ortiz J.C., Henríquez, S., Gomes, H.** (2022). Coastal meteo-marine parameters during the pass of Hurricane Matthew in the Colombian Caribbean Coast in 2016: Establishing a Baseline of Knowledge. *Journal of Coastal Research*, 38 (1), 66-76.
- Rey, W., Ruiz-Salcines, P., Salles, P., Urbano-Latorre, C.P., Escobar-Olaya, G., Osorio, A.F., Ramírez J.P., Cabarcas-Mier, A., Jigena-Antelo, B., Appendini, C.M.** (2021). Hurricane Flood Hazard Assessment for the Archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina, Colombia. *Front. Mar. Sci.* 8, (766258), 1-18.
- Simulating Waves Nearshore Model (SWAN).** (2022). Latest stable version for Windows. Fecha de consulta: entre enero y mayo de 2022. Disponible en: <https://swanmodel.sourceforge.io/>
- Tolman, H.** (1999). *User manual and system documentation of WAVEWATCH- III version 1.18*. Tech. Note 166, Ocean Modeling Branch, NCEP, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce.
- UNESCO.** (2022). MBA Biosphere Reserve Directory. Fecha de consulta: entre enero y mayo de 2022. Disponible en: <https://en.unesco.org/mab>
- Vargas, G.** (2004). Geología de la Isla de San Andrés, Colombia. *Geología Colombiana*, 29, 71-87.
- Willmott, C.J.** (1981). On the validation of models. *Physical Geography Journal*, 2, 184-194.
- Wornom, S. & Welsh, D.** (2002). An MPI quasi time-accurate approach for nearshore wave prediction using SWAN code Part I. *Coastal engineering Journal*, 44 (3), 247-256; Part II. *Coastal Engineering Journal*, 44 (3), 257-280.
- Young, I.R.** (1999). *Wind generated ocean waves*. Elsevier Science Ltd, Oxford, UK. 289 pp.

## Club de revistas



Comparación de tamaños de bacterias (parte superior) y eucariotas (parte inferior) usando una escala logarítmica. Adaptada de Volland *et al.*, 2022 y Chimileski & Kolter, 2017. CPR, Candidate Phyla Radiation.



Volland, J.M., González-Rizzo, S., Gros, O., Tymi, T., Ivanova, N., Schulz, F., Goudeau, D., Elisabeth, N.H., Nath N., Udvary, D., Malmstrom, R.R., Guidi-Rontani, C., Bolte-Kluge, S., Davies, K.M., Jean, M. R., Mansot, J.L., Mouncey, N.J., Angert, E.R., Woyke, T., Date, S.V. (2022). A centimeter-long bacterium with DNA contained in metabolically active, membrane-bound organelles. *Science*, 376, 1453-1458. <https://doi.org/10.1126/science.abb3634>

### Un microorganismo que no lo es: *Candidatus Thiomargarita magnifica*

Los que trabajamos en microbiología tenemos muy claro que un microorganismo es, por definición, un organismo microscópico. Esto significa que se requiere de un microscopio para su visualización, puesto que nuestro ojo no tiene la suficiente capacidad de resolución para discernir estas minúsculas formas de vida. Incluimos en esta categoría bacterias, arqueas y virus, desde fagos que infectan bacterias hasta virus que atacan células eucariotas, como el SARS-CoV2, así como algunos organismos eucariotas unicelulares. Algunos ejemplos son los hongos microscópicos, las levaduras, las microalgas y protozoarios como el agente causante de la malaria, *Plasmodium falciparum*, entre otros.

La biología, sin embargo, no deja de sorprendernos. En junio de este año salió una publicación que reta nuevamente nuestra definición de lo que constituye un microbio. Jean-Marie Volland *et al.* describen una bacteria perteneciente al género *Thiomargarita* de un tamaño realmente magnífico (Volland *et al.*, 2022). Con una longitud celular promedio cercana a 1 cm, y en algunos casos casi a 2 cm, esta bacteria se puede observar a simple vista y supera el tamaño de bacterias grandes descritas anteriormente como *Thiomargarita namibiensis* y *T. nelsonii* (Schulz, 1999). Los autores la denominaron *Candidatus* (*Ca.*, puesto que aún no ha sido cultivada) *Thiomargarita magnifica*. La bacteria crece sobre la superficie de hojas sumergidas de *Rhizophora mangle* en ambientes marinos sulfídicos de Guadalupe en las Antillas francesas. *Ca. T. magnifica* pertenece al grupo de bacterias grandes sulfurosas (*large sulfur bacteria*, LSB), las cuales oxidan especies reducidas de azufre para obtener energía y por ello se conocen como bacterias quimiolitótrofas. Bajo condiciones anaeróbicas estos microbios pueden utilizar nitrato, que acumulan en una gran vacuola, como aceptor terminal de electrones.

*Ca. T. magnifica* se asemeja a otras bacterias del mismo género, pero en este caso los filamentos son más largos e, inesperadamente, están libres de epibiontes, u organismos adheridos a su superficie. Su visualización microscópica utilizando el tinte fluorescente

para membranas FM 1-43X evidenció que los filamentos forman una sola célula continua en lugar de ser una serie de células concatenadas. Solo en la sección apical más distante del sitio de unión a la superficie, se vio constricción y formación de células pequeñas que parecen desprenderse para dispersarse. La formación de estas células en el extremo apical podría considerarse como parte del ciclo de desarrollo, un estilo de vida denominado dimórfico que se asemeja al de la bacteria *Caulobacter crescentus*, en el cual se liberan células hijas en el extremo libre del tallo sésil y elongado de la célula madre.

En contraste con células pequeñas, una bacteria de gran tamaño debe superar algunas limitaciones para poder crecer y multiplicarse eficientemente. Uno de los factores limitantes es la capacidad para movilizar por difusión moléculas como nutrientes y productos de desecho. Las células eucariotas, que tienden a ser de mayor tamaño, han resuelto este problema utilizando organelos y sistemas de transporte especializados. Las bacterias grandes también tienen estrategias para vencer estas restricciones fisiológicas y *Ca. T. magnifica* no es la excepción. Como otras de sus parientes, esta bacteria contiene una vacuola con nitrato que utiliza para la oxidación de sulfito de hidrógeno en condiciones anaeróbicas. Dicha vacuola ocupa aproximadamente el 75 % del volumen de la célula, lo cual reduce sustancialmente el espacio citoplasmático y facilita la difusión de moléculas.

Otra característica de *Ca. T. magnifica* es la presencia de una red membranal en el citoplasma. En particular, los investigadores observaron la presencia de compartimientos, aparentemente rodeados de membranas, que denominaron *pepins*, por su pequeño tamaño y por analogía con las pequeñas semillas (*pips* en inglés) de varias frutas. Estos compartimientos contienen material genético, ADN y ARN, según observaciones microscópicas al teñir el ADN con DAPI (4',6-diamidino-2-fenilindole) y hacer hibridación *in situ* con sondas fluorescentes dirigidas al ARN ribosomal, una técnica conocida como *fluorescence in situ hybridization* (FISH). Los autores proponen, por consiguiente, que *Ca. T. magnifica* alberga ADN y ARN en organelos metabólicamente activos y rodeados por una membrana. Estructuras similares se han reportado en otras LSB, aunque su función todavía debe verificarse. Además, la capacidad para separar el material genético del resto de la célula en una especie de nucleoide también se ha observado anteriormente en bacterias pertenecientes a los taxones Atribacteria y Planctomycetes, que son distantes al género *Thiomargarita*. Aunque las bacterias se consideran células libres de compartimentación, en nuevos estudios se sugiere que en algunos casos pueden poseer organelos que cumplen funciones importantes para su fisiología. Algunos ejemplos son los anamoxosomas y los magnetosomas en bacterias anammox, que realizan oxidación anaerobia de amonio, y bacterias magnetotácticas, respectivamente (Greening, 2020).

La producción de energía es otra limitación para el funcionamiento de una célula. En las bacterias la enzima encargada de sintetizar ATP, la ATP sintasa, se encuentra localizada en la envoltura celular. Por lo tanto, la producción de ATP se ve limitada por la superficie disponible y la relación de esta superficie con el volumen celular. En contraste con otras bacterias, *Ca. T. magnifica* tiene la ATP sintasa distribuida alrededor de los *pepins* en una red de membranas en el citoplasma, mas no en la envoltura externa. Los autores sugieren que esta distribución amplía la capacidad energética y permite suplir las necesidades en estas células de gran tamaño. La síntesis proteica, evaluada con una tecnología llamada *bioorthogonal noncanonical amino acid tagging* (BONCAT), se restringe a pequeñas áreas, en algunos casos también asociada a los *pepins*. Estos análisis sugieren que la actividad metabólica en estas bacterias se localiza en sitios específicos en el citoplasma.

Al igual que otras bacterias grandes, *Ca. T. magnifica* es poliploide, es decir, una célula contiene múltiples copias del genoma. Sin embargo, este microorganismo supera a otras bacterias grandes, puesto que contiene más de medio millón de copias de su genoma en una célula de 2 cm y un promedio de 37 mil copias por milímetro de filamento. Las múltiples copias del genoma pueden satisfacer necesidades de forma local,

como la síntesis de maquinarias moleculares. También ayudan a reducir el efecto de mutaciones y a conservar la integridad de la información. La secuenciación genómica, hecha a partir de cinco células individuales, indicó una población homogénea con pocos polimorfismos. Estos genomas son grandes, con un tamaño entre 11,5 y 12,2 Mb, que supera los reportados anteriormente para bacterias. *Ca. T. magnifica* también tiene una gran capacidad metabólica relevante para su fisiología y funcionamiento. Como es de esperar, contiene genes para la utilización del sulfuro, pero carece de los requeridos para la reducción asimilatoria, desasimilatoria y desnitrificación de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (**Moreno-Vivián**, 1999), lo que sugiere que el nitrato sirve solo como aceptor de electrones. Se identificaron numerosos grupos de genes para la síntesis de metabolitos secundarios, como péptido sintetasas no-ribosomales y policétido sintetasas. Estos sistemas son importantes y numerosos en genomas de actinobacterias conocidas por la producción de metabolitos especializados con actividad antimicrobiana. Es muy posible, por lo tanto, que las moléculas derivadas de estos genes biosintéticos contribuyan a la ausencia de epibiontes en la superficie celular de *Ca. T. magnifica*. Por último, los autores notaron un arreglo inusual de genes importantes para la división celular: en tanto que solo algunos de aquellos cruciales para la división en otras bacterias están presentes, otros involucrados en la elongación están duplicados, como si estuvieran cumpliendo un papel importante en la formación de filamentos largos.

El descubrimiento de bacterias grandes como *Ca. T. magnifica* nos hace cuestionar algunos de los conceptos y definiciones que usamos para describir el mundo microbiológico. Además de estas bacterias, existen también virus eucariotas gigantes, cuyo tamaño puede incluso ser mayor al de algunos microbios (**Abergel et al.**, 2015). En contraste, algunos animales que se consideran más complejos son invisibles al ojo y pueden ser más pequeños que las LSB. Tal es el caso de los mixozoos, parásitos microscópicos pertenecientes al filo Cnidaria, el cual incluye también organismos como los corales. Además, las bacterias pueden contener organelos, antes asociados solo con organismos eucariotas, y en algunos casos realizar funciones que implican un alto nivel de complejidad, como la multicelularidad y la cooperación celular (**Chimileski & Kolter**, 2017). *Ca. T. magnifica* representa la bacteria más grande hallada hasta el momento y muestra adaptaciones necesarias para su estilo de vida, como su red membranal y la separación del material genético en *pepins*. Mientras esperamos a que estas observaciones se verifiquen con cultivos del microorganismo en el laboratorio, lo cual representa todavía un reto experimental, reconocemos plenamente que estas bacterias son excepcionales. Tanto por su tamaño como por su inusual biología, expanden la frontera del conocimiento y nos animan a mantener los ojos y la mente abiertos. Solo así podemos examinar el mundo natural más objetivamente para aprender y aceptar expresiones de vida antes inimaginables.

**María Mercedes Zambrano**

Directora Científica  
Corporación Corpogen

## Referencias

- Abergel, C., Legendre, M., Claverie, J.M.** (2015). The rapidly expanding universe of giant viruses: Mimivirus, Pandoravirus, Pithovirus and Mollivirus. *FEMS Microbiology Reviews*, 39, 779–796. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuv037>
- Chimileski S. & Kolter R.** (2017). *Life at the Edge of Sight. A Photographic Exploration of the Microbial World*. Cambridge, Massachusetts, United States: Harvard University Press.
- Greening, C. & Lithgow, T.** (2020). Formation and function of bacterial organelles. *Nature Review Microbiology*, 18, 677-689. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0413-0>. Epub 2020 Jul 24.
- Kolter, R.** (2021). Small Animals Considered. Fecha de consulta: julio 8, 2022. Disponible en: <https://schaechter.asmblog.org/schaechter/2021/06/small-animals-considered.html>

- Moreno-Vivián, C., Cabello, P., Martínez-Luque, M., Blasco, R., Castillo, F.** (1999). Prokaryotic nitrate reduction: molecular properties and functional distinction among bacterial nitrate reductases. *Journal of Bacteriology*, *181*, 6573-6584. <https://doi.org/10.1128/JB.181.21.6573-6584.1999>
- Schulz, H.N., Brinkhoff, T., Ferdelman, T.G., Mariné, M.H., Teske, A., Jorgensen, B.B.** (1999) Dense populations of a giant sulfur bacterium in Namibian shelf sediments. *Science*, *284*, 493-495. <https://doi.org/10.1126/science.284.5413.493>
- Volland, J.M., González-Rizzo, S., Gros, O., Tyml, T., Ivanova, N., Schulz, F., Goudeau, D., Elisabeth, N.H., Nath N., Udvary, D., Malmstrom, R.R., Guidi-Rontani, C., Bolte-Kluge, S., Davies, K.M., Jean, M. R., Mansot, J.L., Mouncey, N.J., Angert, E.R., Woyke, T., Date, S.V.** (2022). A centimeter-long bacterium with DNA contained in metabolically active, membrane-bound organelles. *Science*, *376*, 1453-1458. <https://doi.org/10.1126/science.abb3634>

## Club de revistas

### Comentario sobre los artículos

**Pekar, J.E., Magee, A., Parker, E., Moshiri, N., Izhikevich, K., Havens, J.L., Gangavarapu, K., Malpica Serrano, L.M., Crits-Christoph, A., Matteson, N.L., Zeller, M., Levy, J.I., Wang, J.C., Hughes, S., Lee, J., Park, H., Park, M.S., Ching, K.Z.Y., Lin, R.T.P., Mat Isa, M.N., ... Wertheim, J.O.** (2022). The molecular epidemiology of multiple zoonotic origins of SARS-CoV-2. *Science*, 26 Jul 2022. <https://doi.org/10.1126/science.abp8337>

**Worobey, M., Levy, J.I., Serrano, L.M., Crits-Christoph, A., Pekar, J.E., Goldstein, S.A., Rasmussen, A.L., Kraemer, M.U.G., Newman, C., Koopmans, M.P.G., Suchard, M.A., Wertheim, J.O., Lemey, P., Robertson, D.L., Garry, R.F., Holmes, E.C., Rambaut, A., Andersen, K.G.** (2022). The Huanan Seafood Wholesale Market in Wuhan was the early epicenter of the COVID-19 pandemic. *Science*, 26 Jul 2022, abp8715

## Las evidencias que sitúan el origen del SARS-CoV-2 en el Mercado Mayoritario de Mariscos de Huanan, Wuhan

El origen del SARS-CoV-2, el coronavirus causante de la pandemia de COVID-19, se desconoce y ha sido objeto de varias hipótesis (**Bloom et al.**, 2021) y algunas especulaciones. La comunidad científica ha considerado las hipótesis del origen animal y el origen humano: según la primera, el reservorio del ancestro viral es un animal, en el caso del SARS-CoV-2, probablemente el murciélago, ancestro que luego salta a un intermediario mamífero no humano, en tanto que, según la segunda hipótesis, la diseminación del virus se origina en un laboratorio, probablemente en el curso de los llamados experimentos virales de ganancia de función. Dado que los primeros casos de COVID-19 se detectaron en la ciudad de Wuhan (provincia de Hubei, China), se han tenido en cuenta el Mercado Mayorista de Mariscos de Huanan (Mercado de Huanan) y el Instituto de Virología de Wuhan como posibles lugares de origen del virus.

La determinación del origen del SARS-CoV-2 es importante para anticipar la futura introducción de nuevos virus, implementar nuevas políticas de salud pública y evitar prácticas riesgosas (ciertos experimentos de ganancia de función), entre otros.

La recopilación de las evidencias relevantes para establecer el origen del virus causante de una epidemia o una pandemia requiere una acción coordinada, estratégica y sostenida de las autoridades de salud locales y nacionales. Inicialmente, las autoridades chinas fueron reticentes a compartir los hallazgos, pero después han puesto a disposición de la comunidad científica algunos hallazgos (**Maxmen**, 2022). Los autores de dos artículos recientes (**Pekar et al.**, 2022; **Worobey et al.**, 2022) examinaron las evidencias disponibles (epidemiológicas y virales) y concluyeron que la mejor interpretación de la información disponible apuntaba a que el SARS-CoV-2 se originó en el Mercado de Huanan mediante dos saltos independientes ocurridos en noviembre de 2019 de virus presentes en los animales del mercado a los humanos, los cuales originaron los linajes virales B y A. Comentamos a continuación los hallazgos y conclusiones de estos estudios.

Los “mercados húmedos”, donde miles de animales se comercializan de manera ilegal y, por ende, sin ninguna certificación de salud, se han asociado con el origen de otros patógenos, por ejemplo, el SARS-CoV-1 en el 2002, así como nuevas cepas del virus de la influenza, en años recientes. Varios de estos mercados, incluido el de Huanan, han sido objeto de vigilancia activa (**Xiao et al.**, 2021). Cuando se empezaron a detectar los casos de neumonía de origen desconocido en Wuhan, fue evidente que varias de las personas afectadas estaban relacionadas con el Mercado de Huanan, lo habían visitado, o habían tenido contacto previo con personas que lo habían visitado. Usando información generada por la misión conjunta OMS-China de 2021 (**Worobey et al.**, 2022; **WHO**, 2021), Worobey et al. analizaron las historias de los 155 casos bien documentados detectados en la provincia de Hubei hasta diciembre de 2019. El análisis del lugar de residencia de las personas con COVID-19 (casos) situó en un punto geográfico centrado en el mercado tanto los casos relacionados con este, como aquellos sin relación, y estableció que estos últimos vivían incluso más cerca del mercado que quienes sí estaban relacionados. Varias estrategias para controlar el sesgo de verificación sugieren que es poco probable que esta asociación geográfica entre los casos de COVID-19 y el Mercado de Huanan respondiera al azar. Es decir, en la ciudad de Wuhan el único epicentro de los casos iniciales determinado a partir de la información epidemiológica fue dicho mercado, el cual no se cuenta entre los lugares más concurridos de la ciudad, por lo que su asociación con los casos no se debía a la gran circulación de personas.

Para evitar el riesgo de una mayor diseminación de la infección, dicho mercado fue cerrado el 1 de enero de 2020 y en él se hicieron varias rondas de “desinfección” (**Gao et al.**, 2022). El personal del Centro Chino para la Prevención y Control de Enfermedades

y de otras instituciones recogieron múltiples muestras del ambiente del mercado en varias oportunidades desde el día del cierre (**Gao et al., 2022**). **Worobey et al.** analizaron estos resultados y adicionaron información de otras fuentes, lo que les permitió establecer que muchas de las muestras que contenían material genético de SARS-CoV-2 estaban asociadas con la sección suroeste del mercado. Allí registraron varios puestos que probablemente vendían animales mamíferos vivos o recientemente sacrificados ilegalmente. Cinco de las muestras positivas provenían de objetos asociados con la venta de animales (cajas metálicas, carros de transporte de animales y un instrumento para eliminar pelos/plumas) encontrados en un puesto específico. Sin embargo, no se conocen casos de COVID-19 asociados con dicho puesto, aunque la mayoría de los casos del mercado se asociaron con el ala oeste.

Las secuencias de los virus encontrados fueron similares a las presentes en los humanos, por lo tanto, era fundamental establecer si había en el mercado animales infectados con SARS-CoV-2 o con secuencias virales ancestrales que hubieran podido saltar a los humanos. **Gao et al. (2022)** tomaron muestras de animales guardados en los refrigeradores y congeladores después del cierre del mercado, así como de animales callejeros, y no encontraron muestras positivas para los ácidos nucleicos del virus. Hasta el momento, no se han hallado muestras de animales vivos infectados con el virus o el progenitor viral que saltó a los humanos.

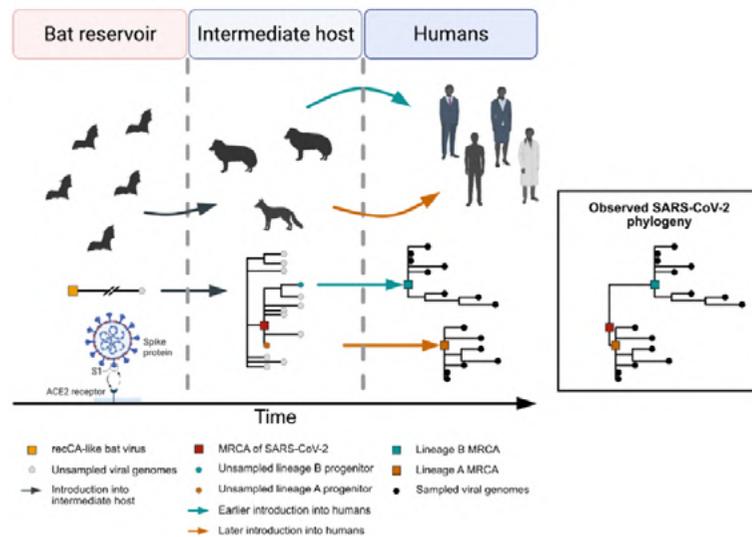
Al principio de la pandemia circularon simultáneamente los linajes A y B del SARS-CoV-2, cuyo análisis aportó información relevante para establecer el origen del virus. El linaje A es más cercano a los coronavirus de murciélagos que el linaje B, por al menos dos mutaciones, lo que indica que el ancestro del SARS-CoV-2 se originó del linaje A, pero los virus del linaje B predominaron en el inicio de la pandemia (**Pekkar et al., 2022**). Así pues, los virus del linaje B parecen haberse diseminado en los humanos antes que los derivados del linaje A, a pesar de que este último pareciera ser un ancestro más temprano. Inicialmente, en los casos asociados con el Mercado de Huanan y en las muestras provenientes de su ambiente solo se identificó el linaje B. Después se identificó el linaje A en dos personas que no reportaron contacto con el mercado, aunque una residía cerca y la otra se había hospedado en un hotel cercano en los días previos al inicio de los síntomas. Recientemente se reportó la presencia del linaje A en muestras del ambiente del mercado (**Gao et al., 2022**), lo que respalda la circulación simultánea de ambos linajes en el Mercado de Huanan al inicio de la pandemia.

Una alternativa considerada inicialmente fue la evolución secuencial del linaje A al B, la cual se fundamentaba en la identificación de secuencias virales intermedias, pero **Pekkar et al. (2022)** analizaron dichas secuencias y concluyeron que eran artefactos “técnicos”, por lo que desestimaron la opción de la evolución viral secuencial del linaje A al B. Además, la evidencia del reloj molecular del SARS-CoV-2 en humanos no concuerda con una sola introducción del linaje A de los animales a los humanos, sino con dos introducciones separadas, una para el linaje A y otra para el B (**Pekkar et al., 2022**). Considerando el Mercado de Huanan como el lugar de origen del SARS-CoV-2, los autores concluyen que los ancestros de los linajes A y B probablemente circulaban simultáneamente en mamíferos no humanos en el mercado antes de su introducción en los humanos. Calcularon que para lograr dos introducciones virales exitosas ocurrieron ocho fallidas, con pocos casos y hospitalizaciones que pasaron desapercibidas, y que los virus no necesitaron adaptarse a los humanos para lograr la transmisión entre estos.

Teniendo en cuenta estas evidencias epidemiológicas y virales, seguramente se pueden plantear varios escenarios posibles, entre ellos, que animales infectados provenientes de criaderos con circulación viral permanecieran en el mercado suficiente tiempo para generar las múltiples oportunidades de introducción viral en los humanos, o que en diferentes momentos se diera el tránsito por el mercado de animales infectados. Los principales animales mamíferos propuestos como intermediarios del SARS-CoV-2 en el origen son el zorro rojo (*Vulpes vulpes*), el tejón porcino (*Arctonyx albobularis*) y el perro mapache (*Nyctereutes procyonoides*), los cuales se vendían vivos en el mercado de Huanan hasta noviembre de 2019, pero no se han encontrado ancestros virales o el SARS-CoV-2 en estos animales (**Worobey et al., 2022; He et al., 2022**).

Otro posible escenario concordante con estos hallazgos es que una persona relacionada con los criaderos de animales silvestres, o con un laboratorio de experimentación, pudo infectarse con el virus y transmitirlo a las personas del mercado. Dado que todos los análisis realizados por **Worobey et al.** (2022) sitúan únicamente al Mercado de Huanan como epicentro de las infecciones, ello implicaría que esta persona infectada solamente transmitió el virus en su visita a dicho mercado y no en otros lugares ([https://twitter.com/angie\\_rasmussen/status/1551937826580824070?s=20&t=CiiXm-Z\\_5PMQwAmL29pc1A](https://twitter.com/angie_rasmussen/status/1551937826580824070?s=20&t=CiiXm-Z_5PMQwAmL29pc1A)). Además, esta circunstancia probablemente tendría que haberse repetido para dos personas, una infectada con el linaje B y otra infectada con el linaje A.

Los autores de estos artículos analizaron la información disponible cuidadosamente e implementaron varias estrategias para evitar los sesgos. No hay pistas sobre otras muestras de animales o de humanos tomadas en el mercado al inicio de la pandemia, pero podría surgir nueva evidencia de muestras de animales silvestres. No obstante, a diferencia de las civetas infectadas con SARS-CoV-1 detectadas en el 2003-2004 en la provincia de Hubei, varios meses después de la detección de los casos humanos, en esta oportunidad las autoridades cerraron el mercado y se presume que los animales fueron “desaparecidos” rápidamente de los mercados y los criaderos, dificultando, así, la identificación del progenitor viral y el mamífero intermediario (**Worobey et al.**, 2022). Las autoridades chinas anunciaron que iban a analizar muestras tomadas antes de la pandemia del banco de sangre de Wuhan (**Maxmen**, 2022), las cuales podrían aportar nueva información. En cuanto a si el virus se originó en un laboratorio experimental, no hay evidencias que respalden tal hipótesis. Worobey, quien fue uno de los autores de la carta del 2021 que promovía la exploración de todas las hipótesis pertinentes sobre el origen del SARS-CoV-2, incluido el humano, parece haber desestimado esta hipótesis (**Worobey et al.**, 2022). Dado que no se ha identificado el ancestro común más reciente (*most recent common ancestor*, MRCA) ni una secuencia viral en un candidato mamífero, las conclusiones planteadas por los autores se podrán respaldar, ajustar o refutar si aparece nueva información.



**Figure S30.** Esquema que representa el origen zoonótico múltiple del SARS-CoV-2. Un virus similar al “Ancestro recombinante común” (recCA) circuló en murciélagos, y probablemente después de obtener la capacidad de unirse al receptor viral humano ACE2, saltó a un huésped intermediario. En este huésped intermediario, aparecieron los linajes A y B y se introdujeron por separado en humanos poco después. En la figura se presentan ejemplos de la filogenia del virus en el huésped intermediario, que llevó a los linajes A y B. La filogenia del SARS-CoV-2 con los linaje A y B combinados se presenta en el cuadro de la derecha. Este escenario contempla un haplotipo ancestral del linaje A. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abp8337>

✉ **Juana Ángel**, ✉ **Manuel Franco**

Instituto de Genética Humana, Facultad de Medicina, Pontificia Universidad Javeriana

## Referencias

- Bloom, J.D., Chan, Y.A., Baric, R.S., Bjorkman, P.J., Cobey, S., Deverman, B.E., Fisman, D.N., Gupta, R., Iwasaki, A., Lipsitch, M., Medzhitov, R., Neher, R.A., Nielsen, R., Patterson, N., Stearns, T., van Nimwegen, E., Worobey, M., Relman, D.A.** (2021). Investigate the origins of COVID-19. *Science*, 372 (6543), 694.
- Gao, G., Liu, W., Liu, P., Lei, W., Jia, Z., He, X., Liu, L-L, ... Xu, W., Wu, G.** (2022). Surveillance of SARS-CoV-2 in the environment and animal samples of the Huanan Seafood Market, February. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1370392/v1>
- Wan-Ting, H., Hou, X., Zhao, J., Sun, J., He, H., Jing-Wang, W.S., ... Shi, M., Su, S.** (2022). Virome characterization of game animals in China reveals a spectrum of emerging pathogens. *Cell*, 185(7), 11171129.e8.
- Maxmen, A.** (2022). Scientists Struggle to Probe COVID's Origins amid Sparse Data from China. Nature Publishing Group UK. March 17, 2022. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00732-0>.
- Pekar, J.E., Magee, A., Parker, E., Moshiri, N., Izhikevich, K., Havens, J.L., Gangavarapu, K., Malpica Serrano, L.M., Crits-Christoph, A., Matteson, N.L., Zeller, M., Levy, J.L., Wang, J.C., Hughes, S., Lee, J., Park, H., Park, M.S., Ching, K.Z.Y., Lin, R.T.P., Mat Isa, M.N., ... Wertheim, J.O.** (2022). The molecular epidemiology of multiple zoonotic origins of SARS-CoV-2. *Science*, 26 Jul 2022. <https://doi.org/10.1126/science.abp8337>
- WHO.** (2021). WHO-Convened Global Study of Origins of SARS-CoV-2: China Part. World Health Organization. March 30, 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/who-convened-global-study-of-origins-of-sars-cov-2-china-part>
- Worobey, M., Levy, J.L., Serrano, L.M., Crits-Christoph, A., Pekar, J.E., Goldstein, S.A., Rasmussen, A.L., Kraemer, M.U.G., Newman, C., Koopmans, M.P.G., Suchard, M.A., Wertheim, J.O., Lemey, P., Robertson, D.L., Garry, R.F., Holmes, E.C., Rambaut, A., Andersen, K.G.** (2022). The Huanan Seafood Wholesale Market in Wuhan was the early epicenter of the COVID-19 pandemic. *Science*, 26 Jul 2022, abp8715.
- Xiao, X., Newman, C., Buesching, C.D., Macdonald, D.W., Zhou, Z-M.** (2021). Animal sales from Wuhan Wet Markets immediately prior to the COVID-19 pandemic. *Scientific Reports*, 11(1), 11898.

## Club de revistas

### Comentario sobre los artículos

**Andrades-Valtueña, A., Neumann, G.U., Spyrou, M.A., Musralina, L., Aron, F., Beisenov, A., Belinskiy, A.B., Bos, K.I., Buzhilova, A., Conrad, M., Djansugurova, L.B., Dobeš, M., Ernée, M., Fernández-Eraso, J., Frohlich, B., Furmanek, M. Haluszko, A., Hansen, S., Harney, É., Hiss, A. N., ... Herbig, A.** (2022). Stone Age *Yersinia pestis* genomes shed light on the early evolution, diversity, and ecology of plague. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 119. e2116722119. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2116722119>

**Spyrou, M.A., Musralina, L., Gnechi Ruscone, G.A., Kocher, A., Borbone, P.G., Khartanovich, V.I., Buzhilova, A., Djansugurova, L., Bos, K.I., Kühnert, D., Haak, W., Slavin, P., Krause, J.** (2022). The source of the Black Death in fourteenth-century central Eurasia. *Nature*, 606, 718-724. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04800-3>

## La paleomicrobiología molecular permite dilucidar el origen de la plaga

Una de las pandemias más importantes en la historia de la humanidad fue la plaga, también conocida como peste bubónica o muerte negra, causada por la infección con la bacteria *Yersinia pestis*, un coccobacilo Gram negativo anaeróbico facultativo que transmiten las pulgas de las ratas y otros roedores. La enfermedad se presenta en tres formas diferentes dependiendo de la ruta de infección: la forma bubónica es la más frecuente y se transmite por la picadura de pulgas infectadas, en tanto que las formas septicémica y neumónica se transmiten de persona a persona y son menos frecuentes, pero producen una mayor mortalidad.

Aunque existe evidencia de que la infección por *Y. pestis* afectó al *Homo sapiens* desde el neolítico, se considera que han ocurrido tres grandes pandemias causadas por la infección con esta bacteria (**Piret & Boivin, 2021**): la primera, conocida como la plaga de Justiniano, ocurrió entre el 541 y el 543 durante el mandato del emperador Justiniano y se diseminó por la parte oriental del Imperio Romano y Egipto; se estima que causó 100 millones de muertes, especialmente en Constantinopla, y se la responsabiliza por la caída del imperio Bizantino.

La segunda pandemia, denominada muerte negra o peste bubónica, comenzó en Asia Oriental y siguió la Ruta de la Seda hasta diseminarse por Asia Central y luego en toda Europa. Se dice que en 1347, durante el asedio de los mongoles al puerto de Caffa en el mar Negro (hoy Feodosia, Crimea), en ese entonces bajo el dominio de los genoveses, los cuerpos infectados de los soldados fallecidos en el ejército mongol eran catapultados a la ciudad para contagiar a sus habitantes. Expuestos a estas condiciones, los navegantes genoveses que comerciaban con Caffa trajeron la peste a la península itálica, de donde se diseminó en toda Europa entre 1346 y 1353 y causó la muerte del 30 % de su población. La epidemia que azotó a Florencia en esos años fue descrita por Giovanni Boccaccio (1313-1375) en su libro "El Decamerón" (1349). Entre los siglos XIV y XVII se presentaron brotes muy graves, como el de Milán (1629-1631), relatado por Alessandro Manzoni (1785-1873) en "Los Novios" (1827), y el de Londres (1665-1666), descrito por Daniel Defoe (1660-1731) en "El Año de la Plaga" (1722) (**García, 2021**).

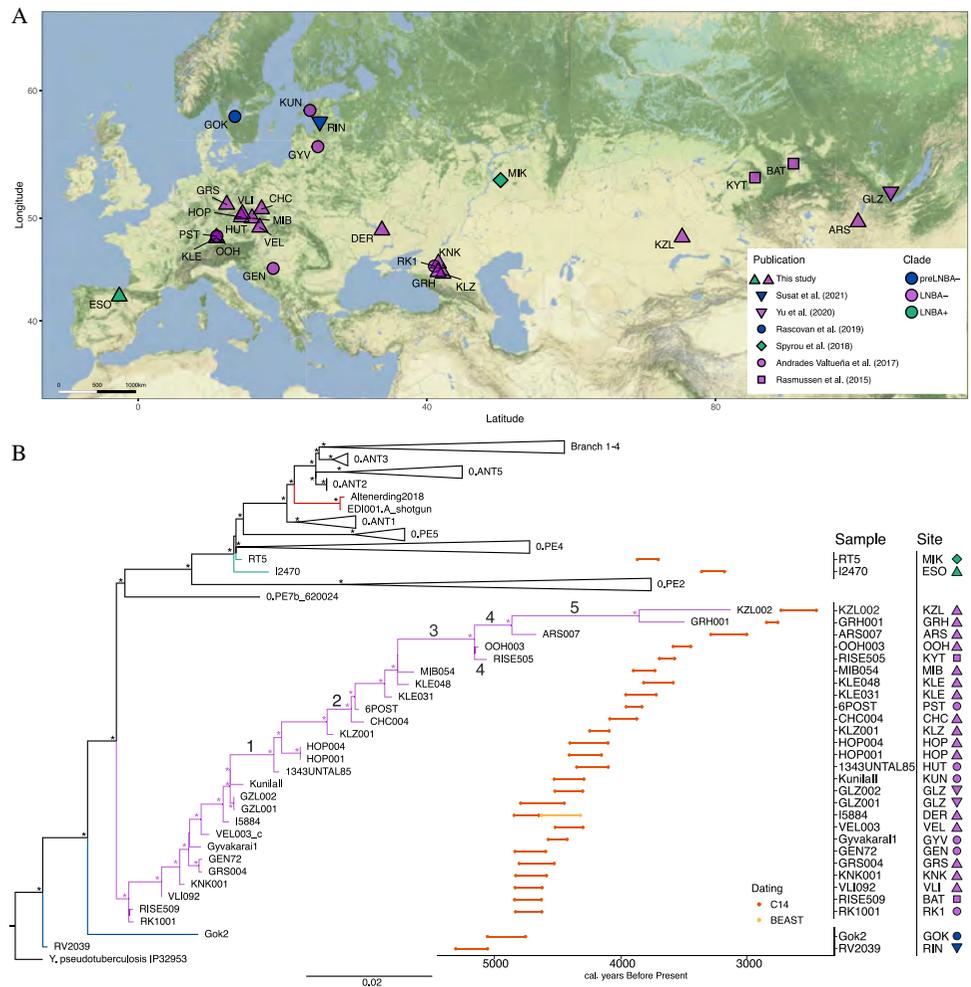
Se considera que la tercera pandemia se inició en China a mediados del siglo XIX, y fue precisamente con muestras provenientes de afectados residentes entonces en Hong Kong que Alexandre Yersin identificó en 1894 la bacteria causante de la peste. Desde entonces la plaga se ha hecho endémica en muchos países y actualmente la Organización Mundial de la Salud la considera una infección reemergente (**WHO, 2017**).

En dos artículos publicados este año se investiga el origen de la bacteria (**Andrades-Valtueña et al., 2022**) y la localización geográfica del origen de la segunda pandemia de peste bubónica (**Spyrou et al., 2022**). Dichos estudios fueron posibles gracias a la identificación de genomas de *Y. pestis* en la pulpa dental (sitio anatómico en que mejor se conserva el ADN) de restos humanos con cientos y miles de años de antigüedad encontrados en cementerios de diferentes regiones de Asia y Europa.

En el artículo de **Andrades-Valtueña et al. (2022)** comentado por **Slavin & Sabbane (2022)**, los autores lograron reconstruir 17 genomas (incluidos el cromosoma y tres plásmidos) de *Y. pestis* provenientes de diferentes partes de Euroasia con 2.500 a 5.000 años de antigüedad, correspondientes al Neolítico tardío y la Edad de Bronce temprana, lo que les permitió proponer una nueva clasificación de los linajes basada en la antigüedad (LNBA) y en su transmisibilidad por la pulga de las ratas (-/+): los dos genomas más antiguos (preLNBA-) tienen entre 5.300 y 5.050 y 5.040 y 4.867 años, respectivamente, y provienen de Suecia y Latvia. El segundo linaje (LNBA-) logró diseminarse por Asia

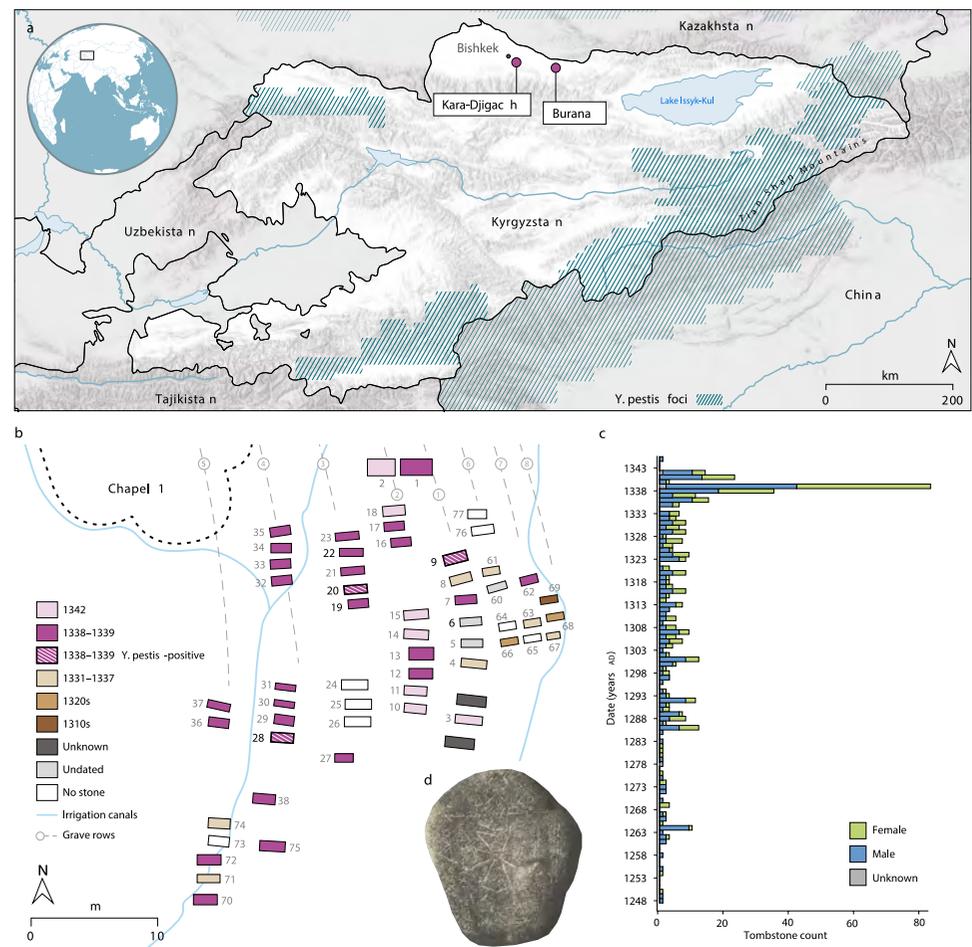
Central y llegar a Europa central hace 5.100, donde persistió hasta hace 2.457 años, cuando se extinguió por causas desconocidas. La transmisión de este linaje, no dependiente de las pulgas, es un misterio, aunque el tiempo de su aparición coincide con la de los carros tirados por bueyes y la domesticación de los caballos y los camellos, lo que facilitó el desplazamiento de Asia Central a Europa. El tercer linaje, el LNBA+, que aún existe, se originó a partir de la adquisición del gen *ymt*, el cual le permitió a la bacteria ampliar el número de reservorios y transmitirse en las pulgas de los roedores. Uno de los hallazgos más importantes de este artículo es el reporte de un genoma de este linaje en España con 3.361 a 3.181 años de antigüedad, lo que indica que este fue responsable de una pandemia que se expandió desde el centro de Asia hasta la península ibérica.

Según **Slavin & Sabbane (2022)**, la importancia del artículo de **Andrades-Valtueña et al. (2022)** radica en que permite preguntarse cuándo, dónde y cómo emergieron los linajes ancestrales de *Y. pestis*, cómo evolucionaron y se diseminaron durante milenios y por qué algunos se extinguieron mientras otros sobrevivieron, causaron nuevas pandemias y han persistido hasta nuestros días.



**Figura 1.** (A) Sitios arqueológicos donde se recuperaron los genomas de *Yersinia pestis* de acuerdo con el periodo LNBA. (B) Árbol ML de todos los SNPs de *Yersinia pestis* (n = 7506) y los intervalos de tiempo correspondientes a cada genoma. Andrades Valtueña et al., (2022) Proc Nat Acad Sci USA, 119, e2116722119. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2116722119>.

En el artículo de **Spyrou *et al.*** (2022), comentado esta vez por **Gibbons** (2022), los autores estudiaron el origen de la segunda pandemia de la plaga, la llamada muerte negra o peste bubónica, que afectó a Asia y Europa entre 1346 y 1353 y se perpetuó luego con otros brotes importantes en el siglo XVII. Los investigadores estudiaron los cráneos encontrados en tumbas de los cementerios de Kara-Djigach y Burana, cercanos al lago Issyk-Kul en el actual Kirgistán, que fueron excavadas entre 1895 y 1892 y cuyos restos fueron depositados en el Museo Pedro El Grande de Antropología y Etnografía en San Petersburgo. Las inscripciones de las lápidas indicaban que las personas allí enterradas murieron de “pestilencia” en 1338 y 1339. Los investigadores lograron recuperar datos del genoma humano de siete de estos individuos utilizando la técnica de captura por hibridación (*hybridization capture*) de 1,24 millones de marcadores SNP (*single nucleotide polymorphism*) informativos de ancestría, lo que les permitió demostrar que los individuos pertenecían a las poblaciones humanas que hoy habitan en Asia Central. Además, mediante secuenciación metagenómica de tiro de escopeta (*shotgun metagenomics*) lograron identificar ADN de *Y. pestis* en la pulpa dental de tres de siete cráneos y generar genomas de alta



**Figura 1.** Descripción del sitio arqueológico del siglo XIV investigado en el Valle Chü en el actual Kirgistan. (A) Localización de los cementerios de Kara-Djigach y Burana; (B) Área dentro del cementerio de Kara-Djigach, llamada “Capilla 1”, con el mayor número de tumbas excavadas de los años 1338 y 1339; (C) Número anual de tumbas de los cementerios de Kara-Djigach y Burana; (D) Lápida del cementerio de Kara-Djigach con la inscripción asociada con la “pestilencia”. Spyrou *et al.*, (2022) *Nature*, 606, 718-724. doi:10.1038/s41586-022-04800-3.

calidad. La comparación de estos genomas con 203 genomas cromosómicos modernos y 46 genomas cromosómicos históricos de la bacteria les permitió inferir la existencia de cinco ramas filogenéticas en la historia evolutiva de *Y. pestis* y ubicar los genomas de Kara-Djigach como ancestrales para la rama 1, a la cual pertenecen todos los genomas de *Y. pestis* recuperados de restos del siglo XIV en Asia y Europa. Los autores también pudieron demostrar que las ramas 1 a 4 se generaron en la primera mitad del siglo XIV antes del inicio de la pandemia. Además, mediante el análisis de genomas de *Y. pestis* obtenidos de posibles vectores y reservorios existentes en esa área geográfica, demostraron que la fuga ocurrió a partir de las marmotas.

En los dos artículos comentados se evidencia cómo la paleomicrobiología molecular es una potente herramienta que, unida a la información histórica, paleontológica y antropológica, puede ayudarnos a entender el origen de las pandemias que han afectado a los humanos y otros animales durante milenios, y aclarar los procesos evolutivos de los microorganismos que las causaron, lo cual ha permitido su fuga de reservorios y vectores silvestres y la aparición de factores de patogenicidad.

● **Luis F. García**

Miembro de Número, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; Grupo de Inmunología Celular e Inmunogenética, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

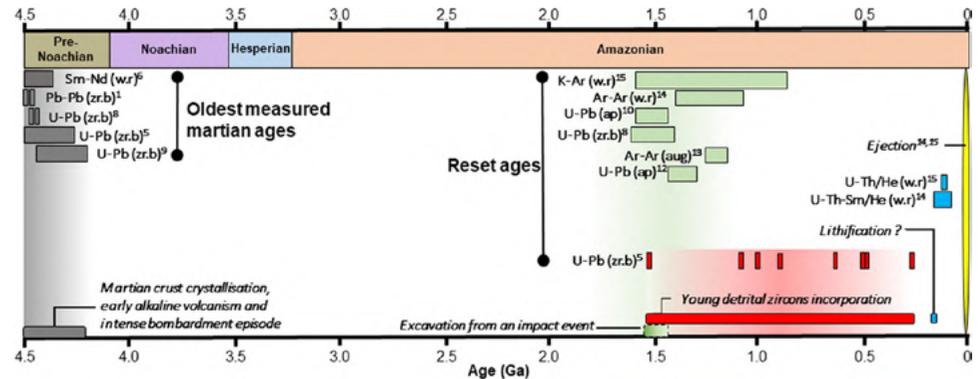
## Referencias

- Andrades-Valtueña, A., Neumann, G.U., Spyrou, M.A., Musralina, L., Aron, F., Beisenov, A., Belinskiy, A.B., Bos, K.I., Buzhilova, A., Conrad, M., Djansugurova, L.B., Dobeš, M., Ernée, M., Fernández-Eraso, J., Frohlich, B., Furmanek, M., Haluszko, A., Hansen, S., Harney, É., Hiss, A. N., ... Herbig, A.** (2022). Stone Age *Yersinia pestis* genomes shed light on the early evolution, diversity, and ecology of plague. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 119. e2116722119. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2116722119>
- García, L.F.** (2021) Las epidemias en la literatura. De Tucídides a Saramago. *Revista Extensión Universidad Nacional. Sede Medellín*, 66, 61-72. [https://medellin.unal.edu.co/revista-extension-cultural/images/documentos/Revista\\_Extension\\_Cultural\\_66.pdf](https://medellin.unal.edu.co/revista-extension-cultural/images/documentos/Revista_Extension_Cultural_66.pdf)
- Gibbons A.** (2022) Ancient DNA reveals Black Death source. *Science*, 376,1254-1255. <https://doi.org/10.1126/science.add4865>
- Piret, J. & Boivin, G.** (2021). Pandemics throughout history. *Frontiers Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.631736>
- Slavin, P. & Sebbane, F.** (2022). Emergence and spread of ancestral *Yersinia pestis* in Late-Neolithic and Bronze-Age Eurasia, ca. 5,000 to 2,500 y B.P. 2022. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 119, e2204044119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2204044119>
- Spyrou, M.A., Musralina, L., Gnechi Ruscone, G.A., Kocher, A., Borbone, P-G., Khartanovich, V.I., Buzhilova, A., Djansugurova, L., Bos, K.I., Kühnert, D., Haak, W., Slavin, P., Krause, J.** (2022). The source of the Black Death in fourteenth-century central Eurasia. *Nature*, 606, 718-724. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04800-3>
- World Health Organization - WHO.** (2017). Plague. Fecha de consulta: 31 de julio, 2022. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/plague>

## Club de revistas

### Comentario sobre el artículo

Lagain, A., Bouley, S., Zanda, B., Miljkovic, K., Rajsic, A., Baratoux, D., Payré, V., Doucet, L. S., Timms, N. E., Hewins, R., Benedix, G. K., Malaweric, V., Servis, K., Bland, P.A. (2022). Early crustal processes revealed by the ejection site of the oldest Martian meteorite. *Nature Communications*, 13, 3782. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31444-8>



**Figura 1.** Resumen de NWA 7034 y edades radiométricas de piedra pareadas, y cronología de los principales eventos experimentados por la brecha.

**Figure 1.** Summary of NWA 7034 and paired stone radiometric ages, and chronology of major events experienced by the breccia. | *Nature Communications*

## Procesos tempranos de las cortezas planetarias revelados por el sitio de eyección del meteorito marciano más antiguo

Los científicos no la tienen fácil a la hora de saber cómo se formó la corteza terrestre, hace 4.600 millones de años. La complicación radica en que la Tierra, por su fuerte dinamismo interior, ha borrado virtualmente casi todas las pistas que pueden dar indicios de ese elusivo periodo, pues las rocas continentales más antiguas que pueden arrojar alguna luz al respecto datan de 600 millones de años después (Bowring & Williams, 1999).

Sin embargo, existe una manera indirecta de aproximarse a ese misterioso proceso terrestre.

En nuestro sistema solar existen otros planetas rocosos y metálicos semejantes a la Tierra: Mercurio, Venus y Marte, denominados por ello planetas terrestres. Tales objetos se formaron en una zona relativamente estrecha (0,4-1,5 unidades astronómicas del Sol), por lo que comparten una zona común de formación. Entre ellos, Marte ha sido el más ampliamente estudiado, con una nube de satélites artificiales que gravitan en torno suyo y un conjunto de vehículos exploradores que auscultan permanentemente su superficie. Sin embargo, a pesar de ese despliegue de tecnología, por el momento se carece de los medios para traer a la Tierra muestras de la superficie marciana de forma controlada.

De lo que sí se dispone es de muestras de la superficie de Marte que han arribado a la Tierra en forma de meteoritos. Como todos los objetos del sistema solar, el planeta rojo está sometido permanentemente al bombardeo de asteroides y cometas. Estos impactos son tan violentos que parte del terreno de la superficie eyectado en el proceso de formación del cráter, adquiere velocidad de escape, esto es, pasa a convertirse en rocas que giran en torno al Sol, a veces durante millones de años, hasta que, fortuitamente, colisionan con algún objeto vecino de Marte, la Tierra, por ejemplo.

En virtud de sus propiedades geoquímicas y del contenido isotópico de los gases atrapados en su interior, se infiere que varios meteoritos hallados aquí en la Tierra provienen de Marte. Se conocen muy pocos y, como es de esperarse, son muy apetecidos por museos y coleccionistas privados que no reparan en adquirirlos por centenares de miles de dólares. Casi todos ellos se conocen con el nombre de meteoritos Shergottita-Nakhlita-Chassignita (SNC), denominación que responde de los nombres de los lugares donde fueron encontrados (McSween, 1999).

Es obvio que el estudio de estas rocas puede dar lugar a un conocimiento más detallado de la historia del planeta rojo. Por ejemplo, un completo análisis del meteorito ALH 184001 terminó por convertirse en noticia mundial debido al hallazgo de indicios de la existencia de vida en épocas pretéritas del planeta (McKay *et al.*, 1996).

También es evidente que la información contenida en estos meteoritos ofrece datos importantes sobre la historia geológica del planeta.

En el 2011 un meteorito con una masa de 0,32 kg, designado con el nombre NWA 7034, fue encontrado en Marruecos. En los alrededores del lugar se encontraron posteriormente otros fragmentos (rocas emparejadas) de la roca original, el más grande de los cuales no superaba los 84 g. Desde un inicio se evidenciaron en el meteorito rasgos muy inusuales, entre ellos, propiedades que lo apartan notablemente de los meteoritos SNC: supera por un orden de magnitud el contenido de agua hallado en estos y presenta valores anormales de la razón  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  y del contenido isotópico del oxígeno (Agee *et al.*, 2013). Las diferencias son tan marcadas que los especialistas están de acuerdo en que la roca da lugar a caracterizar un nuevo tipo de meteorito marciano: una brecha basáltica. En comunicaciones posteriores basadas en el análisis de granos de zirconio y de la relación U/Pb, se estableció la notable antigüedad del meteorito y sus rocas emparejadas: 4.400 millones de años (Nyquist *et al.*, 2013), así como una clara vinculación con la corteza marciana, lo que lo convierte en un objeto de particular interés, pues puede suministrar información sobre la formación de la corteza primigenia de ese planeta. También se descubrió que fue objeto de un evento traumático de carácter térmico acaecido hace 1.500 a 1.700 millones de años (Humayun *et al.*, 2013), el cual reconfiguró las proporciones de varios elementos químicos. En análisis subsecuentes se estableció que otro evento violento, ocurrido entre 5 y 10 millones de años atrás, había provocado la eyección del meteorito de la superficie marciana (Cartwright *et al.*, 2014). Asimismo, en los últimos años han salido a la luz numerosos trabajos que ponen en evidencia la importancia del meteorito NWA 7034 como testigo de los eventos geológicos sucedidos en el planeta rojo prácticamente desde su formación (Goodwin *et al.*, 2022).

De ahí la importancia de saber de qué sector de la superficie del planeta Marte proviene el meteorito, cuestión que aborda el artículo “Procesos tempranos de las cortezas planetarias revelados por el sitio de eyección del meteorito marciano más antiguo” que comentamos aquí (Lagain *et al.*, 2022).

El propósito del artículo fue determinar una historia plausible del lugar del que provino el meteorito NWA 7034. Los autores comenzaron por seleccionar en toda la superficie marciana cráteres jóvenes, de edades inferiores a los 10 millones de años, que pudieran ser la fuente del meteorito, para lo cual se analizó la distribución de cerca de 90 millones de cráteres de impacto mediante el algoritmo de detección de cráteres, el cual permite estudiar la disposición de cráteres secundarios con tamaños inferiores a 150 m. Con base en dicho análisis se seleccionaron 18 candidatos.

Por otra parte, las características del NWA 7034 lo convierten en uno de los meteoritos más antiguos, lo cual significa que debió provenir de zonas marcianas muy primigenias, como las tierras altas del periodo Noeico, y que se originó hace 4.100 a 3.000 millones de años. Además, como exhibe elevadas concentraciones de potasio, torio y hierro, es de esperarse que provenga de una zona con una composición similar, la cual efectivamente existe en el hemisferio sur y se conoce como Terra Cimmera-Sirenum. Dos de los cráteres candidatos se encuentran en esa zona: Karratha y Gasa. Sin embargo, como en la zona próxima al cráter buscado debía haber trazas de un proceso violento acaecido hace aproximadamente 1.500 millones de años y responsable de la reconfiguración de las razones de los isótopos K-Ar, U-Pb, se descartó el cráter Gasa, en cuyas cercanías solo está el cráter Cilaos, con una edad de apenas 572 millones de años. Así las cosas, el cráter más probable como fuente del meteorito NWA 7034 es el Karratha, de unos 10 km de diámetro.

El objeto que dio origen al cráter Karratha impactó casi en el centro de un cráter muy antiguo (probablemente formado en el Noeico) llamado Dampier, de 25 km de diámetro. Como ya se anotó, el Karratha además debía tener en sus cercanías un cráter de impacto

de una edad de 1.500 millones de años, es decir, formado en el denominado periodo Amazónico. Ese cráter es el Khujirt, de unos 40 km de diámetro, cuya distancia de borde a borde con respecto al Karratha es de apenas 25 km.

Así, el escenario que los autores proponen es este: Marte se formó hace 4.600 millones de años, su corteza se cristalizó pocas decenas de millones de años después y luego recibió un intenso bombardeo meteorítico durante el cual se formó el cráter Dampier, entre muchos otros. Tales eventos ocurrieron en el periodo denominado pre-Noeico; mucho después, ya en el curso del periodo Amazónico, se formó por impacto el cráter Khujirt dando origen a la eyección de material prístino de la corteza marciana, mucho del cual aterrizó en zonas aledañas, entre ellas, el cráter Dampier. Ya en tiempos recientes, hace 5 a 10 millones de años, llegó un nuevo cuerpo que impactó en el cráter Dampier y formó el cráter Karratha, provocando la eyección al espacio exterior de un meteorito conformado por material que ya había sido expelido del Khujirt y, por ende, de la corteza primigenia marciana.

Los autores concluyen que el NWA 7034 constituye una muestra representativa de la zona Terra Cimmera-Sirenum, una zona que, al parecer, contiene información de los procesos primigenios que dieron lugar a la formación de la corteza marciana. Por ello, un estudio detallado de esa región revelaría las condiciones de formación de Marte y, en consecuencia, de los planetas terrestres.

En el artículo se evidencia el enorme avance que han experimentado los estudios del planeta Marte en los últimos años. La bibliografía sobre el NWA 7034 y otros meteoritos marcianos es cada vez más abundante y refleja varias tendencias: los enormes avances técnicos en los análisis químicos, bioquímicos y mineralógicos que arrojan datos significativos, aun cuando la proporción de los elementos, moléculas y minerales hallados en estos objetos sea muy reducida; la expectativa de hallar vida microbiana, incluso en las exigentes condiciones del planeta; el enorme flujo de información que reportan los satélites y vehículos exploradores marcianos, lo que ha convertido al planeta rojo en un tema diario de conversación y se añade a la tendencia de convertir las exploraciones espaciales en motivo de orgullo patrio en varias naciones como la India, China y Emiratos Árabes Unidos, las cuales han entrado al grupo de países que ostentaban el monopolio de estas investigaciones (Estados Unidos, Rusia, la Unión Europea); hay que añadir el interés de multimillonarios en la explotación del mercado aeroespacial y de la clara intención de uno de ellos (Elon Musk) de colonizar Marte en un futuro no muy lejano. El panorama es interesante y llamativo y las perspectivas a mediano y largo plazo del estudio de Marte reportarán, con toda seguridad, muchas sorpresas.

### **José Gregorio Portilla Barbosa**

Profesor Titular, Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia



**Figura.** El meteorito NWA 7034 hallado en Marruecos. No es de extrañar que por su color se le conozca también como la “belleza negra”.



**Figura.** Fotografía de una sección detallada de la región Terra Cimmeria-Sirenum con los cráteres involucrados en el artículo. El cráter Dampier corresponde al situado arriba a la derecha; el cráter más grande en su interior corresponde al Kharrata, desde donde fue eyectado el NWA 7034; el más grande ubicado abajo a la izquierda corresponde al Khujirt, con un diámetro de unos 40 km. Fotografías de la NASA y la ESA tomadas de Google Earth.

## Referencias

- Agee, C.B., Wilson, N.V., McCubbin, F.M., Ziegler, K., Polyak, V.J., Sharp, Z.D., Asmeron, Y., Nunn, M.H., Shaheen, R., Thiemens, M.H., Steele, A., Fogel, M.L., Bowden, R., Glamoclija, M. Zhisheng, Z., Elardo, S. M. (2013). Unique meteorite from early Amazonian Mars: water-rich basaltic breccia northwest Africa 7034. *Science*, 339, 780-785. <https://doi.org/10.1126/science.1228858>
- Bowring, S.A. & Williams, I.S. (1999). Priscoan (4,00-4,03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134, 3-16. <https://doi.org/10.1007/s004100100240>
- Cartwright, J.A., Ott, U., Herrmann, S., Agee, C.B. (2014). Modern atmospheric signature in 4,4 Ga Martian meteorite NWA 7034. *Earth and Planetary Science*, 400, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.05.008>
- Goodwin, A., Garwood, R.J., Tartèse, R. (2022). A review of the “Black Beauty” Martian regolith breccia and its Martian habitability record. *Astrobiology*, 22, 755-767. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0069>
- Humayun, M., Nemchin, A., Zanda, B., Hewins, R.H., Marion, G., Kennedy, A., Lorand, J-P., Gopel, C., Fieni, C., Pont, S., Deldicque, D. (2013). Origin and age of the earliest Martian crust from meteorite NWA 7533. *Nature*, 503, 513-516. <https://doi.org/10.1038/nature12764>
- Lagain, A., Bouley, S., Zanda, B., Miljkovic, K., Rajsic, A., Baratoux, D., Payré, V., Doucet, L. S., Timms, N. E., Hewins, R., Benedix, G. K., Malaweric, V., Servis, K., Bland, P.A. (2022). Early crustal processes revealed by the ejection site of the oldest Martian meteorite. *Nature Communications*, 13, 3782. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31444-8>
- McKay, D.S., Gibson, E. K., Thomas-Keprta, K.L., Vali, H., Romanek, C. S., Clemett, S.J., Chillier, X.D.F., Maeschling, C.R., Zare, R.N. (1996). Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 273, 924-930. <https://doi.org/10.1126/science.273.5277.924>
- McSween, H. (1999). Meteorites and their parent planets. Nueva York, Cambridge University Press, Segunda edición.
- Nyquist, L.E., Shih, C., Peng, Z.X., Agee, C. (2013). NWA 7034 Martian breccia: disturbed Rb-Sr systematics, preliminary ~4.4 Ga Sm-Nd Age. *76th Annu. Meteoritical Soc. Meeting*. #5318.

## Opinión

# James Lovelock: la visión de un científico excepcional

## James Lovelock: the vision of an exceptional scientist

✉ Peter Paul Bunyard, FLS

PL30 5NW, Bodmin, Cornwall, United Kingdom.

### Resumen

En los años 60, la NASA pidió a James Lovelock, inventor del detector de captura de electrones, que desarrollara instrumentos para detectar vida en Marte. Al considerar cómo se manifestaría la vida, se dio cuenta de que la atmósfera de la Tierra estaba a órdenes de magnitud del equilibrio químico y que ese desequilibrio no podía deberse puramente a procesos abiológicos, sino que era mantenido en un estado dinámicamente estable por efecto de la vida en el planeta. En aquella época, el análisis espectrométrico de la atmósfera de Marte indicaba que estaba cerca del equilibrio químico y Lovelock concluyó que era poco probable que Marte albergara vida. Dado que la Tierra había tenido organismos biológicos durante al menos 3,2 mil millones de años, Lovelock llegó a la conclusión de que la vida era responsable de la homeostasis planetaria en el sentido de mantener las condiciones óptimas de la superficie, de ahí su Hipótesis Gaia.

**Palabras clave:** Gaia; Espectrometría; Bomba biótica; Endosimbiosis; Cambio climático.

### Abstract

In the 1960s, James Lovelock, the inventor of the Electron Capture Detector, was asked by NASA to develop instrumentation to detect life on Mars. In considering how life would manifest itself, he realized that the Earth's atmosphere was orders of magnitude away from chemical equilibrium and that such disequilibrium could not be due purely to abiological processes but was maintained in a dynamically stable state by Life. At that time, spectrometric analysis of the atmosphere of Mars indicated that it was close to chemical equilibrium and Lovelock concluded that Mars was unlikely to harbour life. Since the Earth had had biological organisms within for at least 3.2 thousand million years, Lovelock concluded that life was responsible for planetary homeostasis in the sense of maintaining optimum surface conditions, hence his Gaia Hypothesis.

**Keywords:** Gaia; Spectrometry; Biotic pump; Endosymbiosis; Climate change

James Lovelock falleció el 26 de julio de 2022, después de cumplir 103 años (**Figura 1**). Durante su larga y agitada vida, cambió la forma de pensar sobre la Tierra y nuestro lugar en este fascinante y único planeta. Para aquellos que están dispuestos a escuchar, nos hizo comprender que la vida en su totalidad es responsable de hacer el planeta habitable y de mantenerlo habitable. Ahora sabemos, gracias a los estudios científicos, que la vida, de una u otra forma, ha estado en este planeta durante al menos 3.500 millones de años, no sólo sobreviviendo a eventos de extinción como el asteroide Chicxulub que, hace 65 millones de años, acabó con la gran mayoría de los dinosaurios, sino transformando cada rincón de la superficie en un entorno que soporta fácilmente la vida, aunque sea solo bacteriana.

Hace más de 50 años, Lovelock llegó a la conclusión de que, si la Tierra nunca hubiera tenido vida, habría tenido el mismo destino que Venus. Nuestra atmósfera, en lugar de ser respirable, con mucho oxígeno, habría tenido más de un 95% de dióxido de carbono, lo que le conferiría una presión equivalente a 60 veces la actual. El efecto invernadero de todo ese dióxido de carbono habría dado a la Tierra una temperatura superficial media de 240°C, lo suficiente como para evaporar cualquier asomo de vida en nuestro planeta.



**Figura 1.** James Lovelock (1919-2022). <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3873472>

A mediados de los años 60, Lovelock trabajaba para la NASA en California. Para entonces, había inventado un dispositivo, un detector de captura de electrones (ECD), como él lo llamaba, que era tan sensible que podía captar rastros contaminantes en el aire como los de los clorofluorocarbonos (CFC), incluso si su concentración era tan pequeña como una parte en un trillón. En de hecho, era justo el tipo de dispositivo que la NASA estaba buscando en sus preparativos para enviar una nave de aterrizaje no tripulada a Marte, el *Viking Lander*. No es de extrañar, pues, que la Agencia pidiera a Lovelock que se uniera a un equipo que buscaba formas de detectar si el planeta tenía alguna evidencia de vida.

La preocupación inicial de Lovelock era que el *Lander* podría aterrizar en una región de Marte paralela a un desierto tan seco como el Sahara y, como este, con no más que una fina dispersión de alguna forma de vida que podría pasar fácilmente desapercibida. Por lo tanto, aunque la vida pudiera estar presente, a menos que se capturara algún espécimen, nadie se daría cuenta. Esto le llevó a pensar, años antes de que el *Lander* aterrizara en julio de 1976, en cómo se manifestaría la vida en un planeta, y se le ocurrió que la atmósfera de la Tierra, con su alta concentración de nitrógeno, 78%, de oxígeno, 21%, de dióxido de carbono, 0,03% (en los años sesenta), y con apenas una pizca de metano, 0,003%, no era en realidad otra cosa que la huella de la vida en nuestro planeta.

De hecho, a menos que se incluyera la vida con su metabolismo, era difícil explicar cómo podía ser posible que el metano y el oxígeno estuvieran presentes simultáneamente en la atmósfera de la Tierra, ya que los dos gases, uno reductor y el otro oxidante, interactuarían sin barreras hasta el punto de que todo el metano se habría oxidado. Y, en la Tierra, lo que emite el metano no es otra entidad que la propia vida en forma de bacterias metanógenas: es ese tipo de emisión el que mantiene el fenómeno de los dos gases presentes simultáneamente en la atmósfera terrestre.

En 1967, nueve años antes de que despegara el proyecto *Lander*, James Lovelock y Dian Hitchcock dieron una respuesta sucinta a la cuestión de encontrar vida en Marte:

Los sistemas vivos llevarán sus entornos a un desequilibrio físico o químico, reconocible como tal si los datos existentes son suficientes para descartar las explicaciones de su estado en términos de procesos abiológico; y, en segundo lugar, que siempre existirá

un gradiente de entropía entre los sistemas vivos y sus entornos no vivos. Además, cualquier biota planetaria que interactúe con su atmósfera llevará a ésta a un estado de desequilibrio que, de ser reconocido, constituiría también una evidencia directa de vida, siempre que la extensión del desequilibrio sea significativamente mayor de lo que permitirían los procesos abiológicos. Se demuestra que la existencia de vida en la Tierra puede inferirse a partir del conocimiento de los componentes principales y trazas de la atmósfera, incluso en ausencia de cualquier conocimiento de la naturaleza o extensión de las formas de vida dominantes. (**Hitchcock & Lovelock, 1967**).

De hecho, aquí estaban las semillas de la Hipótesis Gaia de Lovelock (Lovelock **Lovelock** [1979] 2000; **Bunyard & Goldsmith, 1988**; **Watson, 1996**; **Lovelock, 2007**). Una colaboración posterior con la bióloga Lynn Margulis, apuntaló la idea de Gaia, llamada así por la diosa griega clásica de la Tierra, y ya incorporada a la nomenclatura de la Geología, la Geo-grafía y, más recientemente, las Geo-ciencias.

A mediados de la década de 1970, el análisis espectrométrico de las atmósferas de nuestros dos planetas vecinos, Venus y Marte, demostró que sus atmósferas estaban compuestas principalmente por dióxido de carbono y que todos los gases presentes se encontraban en un estado de equilibrio químico invariable. ¿Descartó este importante hallazgo la vida en Marte? Para Lovelock sí, ciertamente, y junto con Margulis promulgó su hipótesis sobre el caso especial de la Tierra, en su comentario de 1974 en la revista *Tellus*:

En la Tierra, la presencia simultánea de  $O_2$  y  $CH_4$ , en las concentraciones actuales, es una violación de las reglas de la química del equilibrio de no menos de 30 órdenes de magnitud. En efecto, el desequilibrio entre los gases de la atmósfera terrestre es tan grande que tiende a una mezcla combustible, mientras que los gases de Marte y Venus se acercan al equilibrio químico y son más bien productos de combustión.

Y concluyeron:

“A los que están convencidos de que los gases atmosféricos son productos biológicos, pero se resisten a aceptar la noción de homeostasis, les decimos: si la vida tiene un papel meramente pasivo en el ciclo de los gases del aire, entonces las concentraciones serán fijadas por la química del equilibrio; de hecho, ciertamente no lo están. Si la vida realiza un ciclo activo de los gases, entonces nos preguntamos ¿cómo podría un sistema así ser estable a largo plazo sin homeostasis? (**Lovelock & Margulis, 1974**).

La atmósfera de la Tierra está llena de misterios, sobre todo en lo que se refiere a por qué tanto nitrógeno, cuando no se encuentra este elemento en las atmósferas de nuestros dos planetas vecinos. Al principio de su concepción teórica de Gaia, Lovelock se preguntó cómo era posible que el oxígeno estuviera presente junto con el nitrógeno en concentraciones tan elevadas. En su artículo de 1969, Lovelock y Giffen señalan que:

El nitrógeno reacciona bajo la influencia de los rayos UV solares, las descargas eléctricas, la radiación de ionización y la combustión tanto con el  $O_2$ , como con el  $CO_2$ , para dar lugar a óxidos de nitrógeno. Mediante estos procesos, con el tiempo todo el nitrógeno se convertiría en el estable  $NO_3^-$ , ion disuelto en los océanos. Incluso en Marte, las reacciones inversas que convierten el  $NO_3^-$ , en  $N_2$  no proceden. En el curso de la eliminación de  $N_2$ , la mayor parte del  $O_2$ , también saldría de la atmósfera. La continuación de la fotólisis del agua y del  $CO_2$  aseguraría la producción de algo de oxígeno, de modo que la eliminación del nitrógeno podría completarse. Al final, la atmósfera, aparte del argón, estaría dominada por el  $CO_2$ , como las de Marte y Venus. (**Lovelock & Giffen, 1969**).

Y finalmente:

Los flujos simultáneos y grandes de  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $N_2O$  y  $O_2$ , son todos inconsistentes con un modelo abiológico. El grado de desviación de las expectativas de equilibrio debe medirse en decenas de órdenes de magnitud. El hecho de que aún

no se haya detectado nitrógeno en Marte está de acuerdo con la expectativa de la química de equilibrio. Una Tierra sin vida tampoco tendría nitrógeno atmosférico (Lovelock, 1972).

Lovelock, en efecto, nos abrió los ojos a lo extraordinario de la Tierra. Pero la gran pregunta sigue siendo: ¿Es sólo una casualidad que la Tierra haya proporcionado un entorno que satisface las necesidades básicas de la panoplia de la vida? O bien la Vida lo ha hecho así y, si la humanidad ha heredado el mejor de los mundos posibles, ¿se lo debemos a miles de millones de años de vida anteriores a nuestra propia llegada al escenario planetario? En otras palabras, la regulación de los procesos de la superficie, desde la corteza terrestre hasta el borde exterior de nuestra atmósfera, ¿es el resultado del metabolismo y la fisiología de toda la vida, por lo tanto, *gaiana*, o es sólo una casualidad que las condiciones de la Tierra se adapten a nosotros en este momento? Y si todo va mal, como parece ser el caso ahora con el calentamiento global y los impactos de un clima que cambia rápidamente, ¿se recuperarán las condiciones adecuadas por casualidad o necesitarán la interferencia específica de la vida?

Los críticos de Lovelock, como el biólogo y autor de *El gen egoísta*, Richard Dawkins, rechazaron la idea de que la vida gestione las condiciones de la superficie de la Tierra, aunque tuvieron que aceptar que las actividades de la vida provocan cambios en la química de la Tierra, como la emisión de oxígeno por la fotosíntesis o la producción de nitrógeno por la acción de las bacterias desnitrificantes. Pero que esas concentraciones de gases se regularían hasta el punto de estar en un estado de equilibrio dinámico: ¿cómo podría la vida saber lo que era bueno para ella? Dawkins consideraba que la vida estaba inmersa en una lucha neodarwiniana por la existencia, en la que el puro azar intervenía para determinar si los genes de un organismo eran más adecuados que los de otro a la hora de enfrentarse a un entorno externo que le era ajeno.

Plenamente consciente de que la fisiología de los sistemas vivos está estrechamente regulada por las retroalimentaciones, Lovelock no veía ninguna razón por la que dichas retroalimentaciones no fueran el medio a través del cual la vida gestionaba su entorno exterior en su propio beneficio. Tales retroalimentaciones se aplicarían a la química de la atmósfera, a las sales del mar e incluso a cierta regulación de los procesos climáticos, incluidos los derivados de los gases de efecto invernadero, como el CO<sub>2</sub> y el metano (CH<sub>4</sub>). El ciclo hidrológico también figuraría en ese proceso de regulación mediante la transpiración de la vegetación y por la capacidad de formación de nubes del fitoplancton marino, como los cocolitóforos.

En 1971, Lovelock se encontraba en el Atlántico Sur a bordo del buque de investigación RRS Shackleton, con su ECD y un cromatógrafo de gases de fabricación casera. Uno de los gases que recogió fue el sulfuro de dimetilo (DMS), una sustancia volátil que emiten las algas unicelulares cocolitóforas cuando mueren. Además de poseer clorofila y realizar la fotosíntesis, los cocolitóforos tienen caparazones duros de calcita que, al morir el organismo, tienden a acumularse en el lecho oceánico cerca del margen continental de una placa tectónica, contribuyendo así tanto al depósito de CO<sub>2</sub> en forma de roca dura como, durante un período de muchos millones de años, a las cordilleras calcáreas que flanquean cordilleras ígneas como el Himalaya y los Andes.

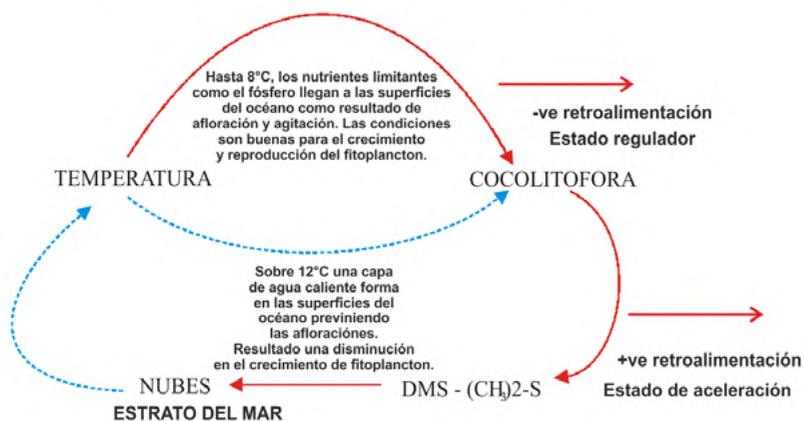
Al ser emitido, el DMS se oxida rápidamente a dióxido de azufre, ácido sulfúrico o ácido metano sulfónico, y cada una de estas sustancias puede estimular la formación de nubes. Las nubes marinas, una vez formadas, reflejan la luz solar hacia el espacio y actúan así para enfriar el océano. Como la mayoría de los organismos eucariotas, los cocolitóforos crecen mejor cuando la temperatura circundante es cercana a los 22 °C, pero ese crecimiento depende de la disponibilidad de nutrientes. Los afloramientos de nutrientes se asocian con aguas más frías y una vez que la temperatura de la superficie de los océanos supera los 12 °C, se forma una gruesa capa de agua caliente e impide que el afloramiento de nutrientes llegue a la superficie y alimente así a los cocolitóforos.

Lovelock previó entonces cómo las algas podían participar en la regulación de las temperaturas superficiales en las regiones del océano donde la temperatura no superaba los 12 °C. Con esto en mente, Lovelock unió con científicos oceanográficos, Robert Charlson, Meinrat Andreae y Stephen Warren, y juntos desarrollaron lo que se conoció como la “Hipótesis CLAW”, utilizando las iniciales del apellido de sus proponentes (**Charlson et al.**, 1987). En esencia, un florecimiento blanco lechoso de cocolitóforos puede cubrir muchos kilómetros cuadrados, como se puede ver al lado de la costa de Cornwall en Inglaterra. Las nubes se forman sobre el florecimiento, lo cual causa que las temperaturas bajen de tal manera que el crecimiento de los cocolitóforos se disminuya y con ello las emisiones de DMS. Ahora por la falta de DMS, la formación de nubes esta reducida y la luz solar puede volver a calentar las aguas superficiales. Mientras los nutrientes estén disponibles, el crecimiento puede volver. Por lo tanto, tenemos un ciclo de retroalimentación negativa por lo cual la temperatura de la superficie se mantiene dentro de límites viables.

Sin embargo, a medida que las aguas superficiales se calientan debido a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, cuando una capa de agua cálida impide que los nutrientes lleguen a la superficie, el umbral de 12 °C se sobrepasará cada vez más en las partes del océano donde normalmente florecen algas planctónicas como los cocolitóforos. Con una reducción significativa del tamaño de las floraciones, se formarán menos nubes y las aguas superficiales seguirán siendo cálidas. La retroalimentación es ahora positiva y hasta cierto punto la vida habrá perdido su capacidad de regular las temperaturas de la superficie, tal y como se presenta en las retroalimentaciones de la **figura 2 (Charlson et al., 1987)**.

Durante su estudio de las trazas de gases mientras estaba en el RSS Shackleton, Lovelock descubrió rastros de los CFC que se habían impregnado allí desde el Norte industrial, donde se utilizaban cada vez más como refrigerantes y propulsores de aerosoles. Dos científicos, Mario Molina y Sherwood Roland, se encontraron con los hallazgos de Lovelock y, en 1974, expresaron su preocupación de que los CFC, al filtrarse a la estratosfera, podrían estar contribuyendo a la destrucción fotolítica del ozono, de manera que los dañinos rayos UV-B llegarían a la superficie de la Tierra y causarían cáncer de piel y la muerte. Diez años más tarde, las Naciones Unidas, bajo lo que se denominó el Protocolo de Montreal, introdujo la prohibición del uso de los CFC. En 1995, Rowland, Molina y el químico atmosférico Paul Crutzen recibieron el Premio Nobel de Química. La crucial contribución de Lovelock fue ignorada (**Molina & Rowland, 1974**).

### NUBES, FITOPLANCTON Y TEMPERATURA



Razón de Redfield: P:N:C:-O<sub>2</sub> = 1:16:117:170

**Figura 2.** Retroalimentación de nubes y fitoplancton en función de la temperatura

Una Tierra sin vida tendría un pH poco ácido, aunque el pH real es casi neutro. Lovelock y Giffen, en su artículo de 1969, no se andan con rodeos al afirmar que las condiciones de la superficie de la Tierra se gestionan por medio de la suma del metabolismo de todos los organismos vivos juntos y en particular los de origen bacteriano.

Al igual que con el  $\text{CH}_4$ , la biosfera utiliza una gran cantidad de energía para la producción de  $\text{NH}_3$ . Cuando se tiene en cuenta la producción total de ácidos por la oxidación del nitrógeno y del azufre, la producción de amoníaco de la biosfera es suficiente para mantener un pH pluvial cercano a 8, el óptimo para la vida. Una de las penalidades de los ambientes oxidantes es la tendencia a un pH bajo ya que los elementos como el carbono, el nitrógeno y el azufre se oxidan. La enorme producción biológica de amoníaco responde convenientemente a esta necesidad. ¿Puede ser accidental y haber sido siempre así? Otros gases y vapores atmosféricos, por ejemplo, el sulfuro de dimetilo, el seleniuro de dimetilo y el yoduro de metilo, pueden servir en la transferencia de masa de elementos esenciales entre la tierra y el mar. En resumen, hay pruebas abrumadoras de que la atmósfera, aparte de su contenido de gases nobles, es un producto biológico. También puede ser un artilugio biológico, no vivo, pero tan esencial como una parte de la biosfera como la concha de un caracol o la piel de un visón. (Lovelock & Giffen, 1969).

Los bosques, especialmente los que cubren millones de kilómetros cuadrados como los del Amazonas, el Congo y la Rusia boreal, son actores de importancia crítica para llevar la lluvia al interior profundo de los continentes y, mediante el bombeo de agua a través de los estomas de sus hojas, en la formación de densas nubes que, como las nubes marinas procedentes de las emisiones de DMS, tienden a enfriar la superficie planetaria. Lovelock ciertamente se dio cuenta desde un punto de vista gaiano de que la humanidad se estaba disparando en el pie al perpetrar la destrucción y la degradación de los grandes bosques del mundo y que estábamos perdiendo la forma que tiene la naturaleza de controlar la temperatura de la superficie. En efecto, el papel hidrológico de los bosques es tan importante en lo que respecta a la temperatura de la superficie como lo es su función de captación y almacenamiento de carbono.

Qué terrible entonces que la destrucción del Amazonas continúe, sobre todo en el Brasil de Bolsonaro. La ignorancia deliberada de quienes permiten la destrucción de los bosques es, en realidad, un crimen contra toda la humanidad. En línea con el pensamiento de Lovelock, investigaciones recientes indican la importancia fundamental del papel hidrológico de los bosques. Como señalan C. K. Boyce y sus colegas del Jardín Botánico de Missouri:

La capacidad de transpiración está estrechamente correlacionada con la densidad de las venas de las hojas y la densidad media de las venas de las hojas de las angiospermas es cuatro veces mayor que la de todas las demás plantas, vivas o extinguidas. Hace unos 100 millones de años se produjo por separado una rápida transición a densidades de venas elevadas en tres o más linajes de plantas con flores. La modelización climática del impacto de esta revolución fisiológica indica que los trópicos serían más cálidos, más secos y estacionales en ausencia de las angiospermas y la superficie total de la selva tropical disminuiría sustancialmente. Dado que la diversidad de las angiospermas está influida por la superficie de los bosques tropicales y por la abundancia y regularidad de las precipitaciones, la elevada diversidad de las angiospermas es en parte producto de un circuito de retroalimentación positiva con las modificaciones climáticas iniciadas por las propias angiospermas. Las diversificaciones de linajes entre animales vertebrados e invertebrados y plantas no angiospermas pueden estar ligadas al impacto sin precedentes de las angiospermas en el clima (Boyce *et al.*, 2010).

El extraordinario papel de la selva tropical dominada por las angiospermas para permitir el reciclaje de la lluvia mediante la evapotranspiración es una clara prueba de una relación similar a la de Gaia entre la biota y su entorno, incluida la regulación del clima

regional. En los años 70/80, el físico Eneas Salati utilizó la caída natural de los isótopos de hidrógeno y oxígeno asociados al agua para calcular el número de veces que las lluvias se reciclan cuando el aire fluye sobre la cuenca del Amazonas en su camino desde la costa brasileña hasta los Andes, a unos 3.000 kilómetros de distancia. Demostró que la lluvia sobre la parte brasileña de la cuenca del Amazonas se reciclaba 5 o 6 veces (**Salati, 1987**).

En su teoría de la bomba biótica, Anastassia Makarieva y Víctor Gorshkov ampliaron la noción de que los bosques tropicales manejan la física del ciclo hidrológico. Aportaron una explicación de por qué una alta tasa de transpiración, provocada por las angiospermas con sus hojas vasculares, debería ser de importancia crítica para mantener la selva tropical a miles de kilómetros de la fuente oceánica de las precipitaciones (**Makarieva & Gorshkov, 2007; Makarieva et al., 2013**)

En efecto, el alto índice de formación de nubes sobre los bosques tropicales, como los de la cuenca del Amazonas, el Congo y los bosques de latitudes más altas de Rusia (durante los meses de verano), provoca cambios de presión que atraen los vientos húmedos de origen oceánico que proporcionan las precipitaciones necesarias para mantener los bosques en el interior de los continentes. De hecho, la formación de nubes a partir del aire húmedo que se filtra hacia arriba desde el de la cubierta forestal, implica la condensación del vapor de agua y, por la física, sabemos que la reducción de volumen cuando el vapor se transforma en líquido o en hielo es superior a mil veces. Conociendo la cantidad de precipitaciones sobre la cuenca del Amazonas, una media de unos 2.500 milímetros anuales nos da una medida de las energías implicadas por la condensación. En energía equivalente a la explosión de varias bombas atómicas cada segundo. Repartidas en toda la cuenca del Amazonas, esas energías son suficientes para explicar los vientos alisios que traen aire húmedo al continente sudamericano y, con la ayuda de la selva, garantizan que las precipitaciones se reciclen correctamente desde la costa atlántica de Brasil hasta los Andes, a unos 3.000 kilómetros al oeste. En resumen, con base en la física de la evaporación y la condensación, la selva es responsable de los ríos atmosféricos de vapor de agua que proporcionan la lluvia estacional desde la Argentina hasta el Medio Oeste de Estados Unidos. (**Makarieva et al., 2014; Bunyard et al., 2019; Bunyard, 2014**).

El papel de Lynn Margulis para dar forma a la Hipótesis Gaia fue fundamental, y sin duda ayudó proporcionando credibilidad científica a la idea de Gaia, especialmente en lo que respecta a la forma en que los componentes bacterianos de la historia temprana de la vida en el planeta se incorporaron por simbiosis a células nucleadas de las que surgieron por evolución la multitud de especies animales, vegetales y fúngicas que hoy bendicen la Tierra. Estas especies, compuestas por organismos multicelulares con sus tejidos diferenciados, desarrollaron nuevas formas de interactuar con su entorno, ampliando así su influencia sobre la química planetaria. En efecto, Margulis aportó a la teoría de Gaia sus conocimientos sobre las interacciones de las bacterias con sus metabolismos y diversos atributos, de modo que formaron lo que ella denominó relaciones endosimbióticas. Como ella lo expresó junto con Ricardo Guerrero y Peter Bunyard:

La simbiosis ha sido el acicate de la evolución al dar lugar a combinaciones novedosas que permiten a organismos sean pioneros y generen nuevos hábitats (**Margulis et al., 1996**).

Además, con la evolución de las células nucleadas —eucariotas— a partir de las bacterias —procariotas— por medio de la simbiogénesis, las actividades metabólicas como la fotosíntesis y la respiración pudieron diseminarse ampliamente. La evolución de los árboles angiospermos, con sus hojas y tallos vascularizados y sus elevadas tasas de transpiración y fotosíntesis, es un buen ejemplo de la ampliación resultante de la incorporación de las cianobacterias, con su propio ADN separado, por simbiogénesis a las células eucariotas de las plantas para formar los cloroplastos. La propagación de los bosques, la evolución de las hierbas y la evolución del fitoplancton condujeron

simultáneamente al aumento de los niveles de oxígeno hasta su valor actual de 21% y a la deposición de dióxido de carbono en forma de combustibles fósiles y, asociado al calcio, como depósitos de carbonato.

Al invitarle a unirse a la NASA para buscar formas de encontrar vida en Marte, Lovelock tuvo la visión mental de mirar hacia la Tierra y preguntarse cómo había llegado a persistir la vida durante cerca de 4.000 millones de años, sobreviviendo incluso a varios eventos de extinción. La forma en que ese pensamiento condujo a la Hipótesis Gaia debe situarlo sin duda entre los grandes científicos de la historia. Lovelock ha cambiado fundamentalmente nuestra perspectiva de lo que debería ser la responsabilidad de la humanidad hacia la naturaleza. Dejó claro que el clima de la Tierra no es sólo una consecuencia de fuerzas físicas que escapan a nuestro control, como las oscilaciones de Milankovitch cuando la Tierra orbita alrededor del Sol, sino que es transformado por la fisiología biótica y el metabolismo.

Cuando Lovelock las expresó por primera vez, las ideas gaianas no fueron aceptadas inicialmente por la comunidad científica. Por ejemplo, los primeros informes de evaluación del comité científico del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), que datan de la década de 1990, calificaban los procesos vivos, aparte de las emisiones industriales antropogénicas, como impactos de segundo orden, con la deforestación, por ejemplo, encajando en esa categoría. En gran parte gracias a Lovelock y al consiguiente foco de estudio en las geociencias, la mayoría de los climatólogos han llegado a apreciar el papel de los ecosistemas esenciales, como la selva tropical o la tundra, para ayudar a regular los procesos que determinan el clima. Movimientos como la “Rebelión de la Extinción” deben su visión de la vida en la Tierra y de nuestra dependencia de esa vida en gran parte a Lovelock y a lo que él determinó que sería el estado del planeta si erradicáramos ecosistemas enteros. Por todo ello, tenemos una gran deuda con James Lovelock.

## Agradecimientos

El presente texto fue inicialmente redactado en inglés y gentilmente traducido al español por el Dr. Alberto Gómez Gutiérrez, FLS, a quien agradezco especialmente su apoyo y comentarios.

## Referencias

- Boyce, C.K., Lee, J.E., Field, T.S., Bodribo, T.J., Zwieniecki, M.A.** (2010). Angiosperms helped put the rain in the rainforests: the impact of plant physiological evolution on tropical biodiversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 97(4), 527-540. Doi: 10.3417/2009143
- Bunyard, P.P., Goldsmith E.** (1988). Gaia: The Thesis, the Mechanisms and the Implications. The Proceedings. Wadebridge Ecological Centre Conference.
- Bunyard, P.P., Hodnett, M., Peña, C., Burgos-Salcedo, J.D.** (2019). Further experimental evidence that condensation is a major cause of airflow. *DYNA*, 86(209), 56-63. <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.73288>
- Bunyard, P.P.** (2014). How the Biotic Pump links the Hydrological Cycle and the Rainforest to Climate. Is it for Real? How can we prove it? Bogotá, Universidad Sergio Arboleda, Instituto de Estudios y Servicios Ambientales – IDEASA. ISBN: 978-958-8745-88-6. <http://hdl.handle.net/11232/397>
- Charlson, R.J., Lovelock, J.E., Andreae, M O., Warren, S.G.** (1987). Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326 (6114): 655-661. doi: 10.1038/326655a0
- Hitchcock, D.R., Lovelock, J.E.** (1967). Life detection by atmospheric analysis. *Icarus*, Volume 7, Issues 1-3, pp. 149-159.
- Lovelock, J.E.** 1972. Gaia seen through the atmosphere. *Atmospheric Environment* 6, 579-580.
- Lovelock, J.E.** ([1979] 2000). Gaia: A New Look at Life on Earth (3rd ed.). Oxford University Press. ISBN 0-19-286218-9.
- Lovelock, J.E.** (2007). The Revenge of Gaia: Why the Earth is Fighting Back and How We Can Still Save Humanity. Penguin Books.

- Lovelock, J.E., Giffen, C.E.** (1969). Planetary atmospheres: compositional and other changes associated with the presence of life, advanced space experiments (Ed. O. L. Tiffany and E. Zaitoff) pp. 179-193. American Astronautical Soc., Washington, D.C.
- Lovelock, J.E., Margulis, L.** (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia Hypothesis. *Tellus*, 26(1-2), 2-10, DOI: 10.3402/tellusa.v26i1-2.9731
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G.** (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1013-1033. doi: 10.5194/hess-11, 2007
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Sheil, D. Nobre, A.D., Li, B.L.** (2013). Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 1039-1056. doi: 10.5194/acp-13-1039-2013
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Sheil, D. Nobre, A.D., Bunyard, P.P., Li, B.L.** (2014). Why does Air Passage over Forest yield more Rain? Examining the Coupling between Rainfall, Pressure and Atmospheric Moisture Content. *Journal of Hydrometeorology*, 15(1), 411-426. Doi: 10.1175/JHM-D-12-0190.1
- Margulis, L., Guerrero, R., Bunyard, P.P.** (1996). We are all Symbionts. Chapter 12. Gaia in Action: Science of the Living Earth. (ed. Bunyard, P. P.) Floris Books.
- Molina, M., Rowland, S.** (1974). Stratospheric sink for chlorofluorocarbons: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249 (5460), 810-812.
- Salati, E.** (1987). The forest and the hydrological cycle. In R. Dickinson, Geophisiology of Amazonia. pp. 273-296. New York: Wiley and Sons.
- Watson, A.J.** (1996). The Gaia hypothesis: Mechanism and Tests. Chapter 4. Gaia in Action: Science of the Living Earth. (ed. Bunyard, P. P.) Floris Books.

## Vida de la Academia

Durante la Sesión Solemne Estatutaria realizada el miércoles 17 de agosto de 2022 se hizo entrega del Premio Nacional a la Obra Integral en Ciencia 2022 al doctor César Pulgarín Profesor Emérito, *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, Suiza, Miembro Honorario de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Compartimos las palabras de agradecimiento del doctor Pulgarín.

### La ciencia, un antídoto contra los conflictos sociales sin fin

El miércoles 17 de este mes he tenido el honor de recibir el Premio Nacional a la Obra Integral en Ciencia, otorgado por la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia. Con este reconocimiento asumo también la responsabilidad de seguir promoviendo, con dedicación, la educación y la investigación que son los cimientos de una economía de valor agregado intelectual y, consecuentemente, de la riqueza del país.

Me gusta citar a Albert Einstein, quien fue Profesor en nuestra sede madre de Zúrich y quien dijo: “no hay ciencia sin conciencia”. ¿Y cómo no tener la conciencia en alerta cuando la pobreza es el cotidiano de 40% de nuestra población con sus efectos de hambre, inseguridad, ilegalidad y confrontaciones sociales y militares?

Para aliviar estos males, que prevalecen después de más de dos siglos de vida republicana, urge focalizar la inteligencia de los colombianos en actividades como: tecnologías de producción social y ambientalmente sostenibles, bioeconomía, energías limpias, farmacéutica, materiales, informática, inteligencia artificial, seguridad electrónica, genética, telecomunicaciones, robótica, ingeniería espacial, materiales, ciencias de la vida, ingeniería financiera y otros tipos de tecnologías y de servicios sofisticados...Y todo lo anterior con el insumo fundamental de enseñanza e investigación masificadas en ciencias de base sin lo cual no hay desarrollos ni emprendimientos tecnológicos exitosos.

Si duda, la sociedad colombiana debe empezar a transitar hacia una economía del conocimiento, con una población educada a todos los niveles. También necesitamos universidades de investigación y centros nacionales de alto nivel en sectores vitales del desarrollo y la seguridad nacional; por ejemplo, en farmacéutica, energía, alimentos...

Solo en los países que favorecen una economía basada en el conocimiento, se hacen posibles políticas de equidad y repartición de la riqueza en forma de salarios y altos ingresos fiscales, con su corolario de inversión social masiva. En la abundancia, la reparación social se arbitra siempre de manera más serena y constructiva en el juego democrático pues es más fácil distribuir la riqueza que la pobreza. Y nosotros, podemos inspirarnos y emular estos países sin tener que reinventar “el agua tibia”.

Aunque es importante y necesario que los gobernantes y legisladores actuales combatan la corrupción, los privilegios no merecidos y encuentren nuevos nichos de impuestos indispensables para aliviar la terrible situación de los más frágiles de nuestros compatriotas, también tendrán inevitablemente que empezar a construir los pilares de una economía del conocimiento. De otra manera, el gobierno actual, y los siguientes, estarán condenados a administrar la precariedad, generando frustración y descontento en la población que son caldos de cultivo para conflictos sin fin.

El presupuesto actual de MinCiencias es de 300.000 millones de pesos, 70 millones de dólares de EE. UU., que es inferior al presupuesto de una sección de mi universidad en Suiza. Si esta suma se multiplicase por diez, alcanzaríamos 700 millones de dólares que es un monto inferior al del presupuesto total de mi universidad que acoge 9000 estudiantes de pregrado y 5000 de posgrado. Aún con un presupuesto de MinCiencias multiplicado por 10, lo que es casi un sueño para los científicos colombianos como yo, seguiríamos repartiendo la precariedad.

Para generar riqueza, con el ingenio de sus habitantes, como lo han hecho otros países, la implementación progresiva de una economía del conocimiento, basada en la masificación de la educación accesible a todos y una investigación de calidad, son ineludibles. El camino por recorrer es largo y por ello mismo hay que empezar mañana temprano. En efecto, en Colombia generamos 5 a 7 veces menos riqueza por hora trabajada que en la mayoría de los países europeos.

La consolidación de políticas de educación, ciencia e innovación, para alcanzar una productividad más alta y poder así asumir el gasto social, necesita de tiempos más largos que un periodo gubernamental. En efecto, cuando el punto de partida es tan incipiente, las experiencias de otros países muestran que se requiere, como mínimo, una generación. Por ello es vital un pacto nacional, de 12-16 años, entre los partidos con la misión de empezar a construir la sociedad de conocimiento que prometió el presidente Petro en todos sus discursos de campaña. Sólo con la voluntad política de sus líderes más visionarios, Colombia dejará progresivamente de ser un país “atractivo” por proveer mano de obra barata dentro y fuera del país, extraer y vender materia bruta no transformada, permitir prácticas ambientales y sociales más “elásticas” o servir de eje en la producción y tráfico de estupefacientes.

Los invito a repetir, sin descanso, a los oídos de los más visionarios de todas las instancias nacionales, que la educación y la investigación científica de calidad deben ser rúbricas bien dotadas y sagradas durante tres o cuatro legislaturas. Seamos optimistas en que nuestro llamado será recibido por algunos de ellos que, con valentía, tomarán medidas que surtirán su efecto solo dentro de años. La riqueza durable, acumulada con la inteligencia colectiva de un pueblo, nos permitirá entonces avanzar en la construcción de un país más digno para todos y volver cierto lo de la “segunda oportunidad sobre la tierra”. ¡Qué bella oportunidad para nuestros dirigentes de hacer Historia!

**César Pulgarín**

### **Información suplementaria**

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1757/3276>

## Vida de la Academia

Durante la Sesión Solemne Estatutaria realizada el miércoles 17 de agosto de 2022 se realizó la sesión solemne de posesión del doctor **Galileo Violini** como Miembro Honorario de la institución. Compartimos el resumen de la conferencia del nuevo Académico Honorario:

### Un Plan Regional para Educación, Ciencia y Tecnología, Reflexiones de un neo-académico de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

El discurso con ocasión de mi posesión como miembro honorario de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales<sup>1</sup> ofrece algunos elementos de reflexión que pueden merecer ser presentados en una publicación dedicada a reconstruir el proceso de fundación del Centro Internacional de Física (CIF), entender por qué otras propuestas análogas no han prosperado, y reflexionar sobre las que deberían ser las prioridades de una política científica que pretenda llenar la brecha entre las regiones andina y caribeña y los países avanzados.

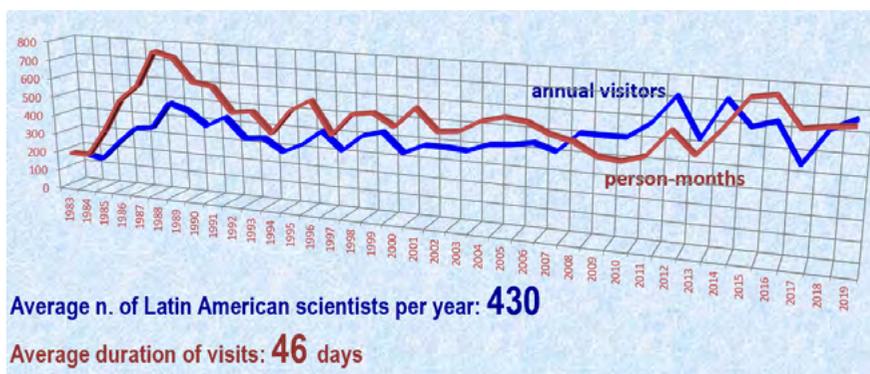
La fundación del CIF tuvo lugar en años difíciles para la ciencia en los países en desarrollo. Se había acabado el periodo de oro en que la UNESCO y la OIEA habían promovido la creación de Consejos de ciencia y Comisiones de Energía Atómica, y en América Latina estaba solamente empezando la etapa de la creación de Ministerios de ciencia.

No obstante, hubo condiciones objetivas que permitieron que la propuesta de crear el CIF cayera en un terreno fértil.

En primer lugar, el apoyo de la comunidad científica colombiana, a través de un grupo extraordinario que apoyó la propuesta. Importantísimo el papel de Eduardo Posada. Compartió conmigo la fundación y la etapa inicial del CIF y luego se le debe su desarrollo durante los casi cuarenta años de vida de esa institución, cuyo impacto sobre la física del país puede ser apreciado por el dato de las visitas de científicos colombianos al ICTP, que es excelente indicador del resultado de la atención que Abdus Salam, que acababa de recibir el Premio Nobel, dedicó a América Latina a comienzos de la década de los '80.

En ese entonces Colombia no se distinguía de manera especial por su relación con el ICTP. Hoy es el quinto país latinoamericano, con un promedio, en la última década, de más de 50 visitantes por año<sup>2</sup>.

Estos resultados y la historia del CIF son la mejor respuesta a algunas perplejidades que fueron manifestadas en el Primer Encuentro Latinoamericano de Sociedades de Física (Cholula, 1982), que sin nombrar explícitamente lo que se estaba gestionando en Colombia parecen referirse, aunque de manera imprecisa, al proyecto.<sup>3</sup>



Aunque la redacción de la parte político-científica del estudio de factibilidad del CIF<sup>4</sup> estuvo a cargo solamente de Steven Moore, Eduardo Posada y Galileo Violini, fue resultado de un trabajo colectivo, con contribución de ideas y apoyo de un amplio grupo de colegas y entidades que creyeron en el proyecto apreciando su carácter internacional conjugado al interés nacional.

Esencial el apoyo de la Sociedad Colombiana de Física y de su presidente Humberto Rodríguez, y el de todas las universidades. En ese entonces eran pocas las universidades que tenían grupos de física. Y esos grupos no se perdieron en discusiones provincianas sobre la ciudad sede (la opción de Cali fue seriamente considerada), o sectoriales sobre el enfoque científico del Centro.

Es de recordar el apoyo de físicos con intereses científicos diferentes, Pablo Stouvenel, Ramiro Tobón, César Torres, en la del Valle, Eddien Álvarez y William Ponce en la de Antioquia, Ángela Camacho en la Universidad Industrial de Santander, Fabio Chaparro en la Universidad Nacional, Nelson Arias en la Universidad Distrital, Álvaro Pantoja en la Pedagógica, María Cristina Plazas por la física médica, que se asociaron al grupo en el cual la propuesta surgió y tuvo su primera elaboración, el de la Universidad de Los Andes, con Steven Moore, Antonio María Rodríguez Vargas y Alfonso Rueda.

Este apoyo nacional fue acompañado por el de la comunidad científica internacional. Después de la presentación del proyecto que Abdus Salam hizo al presidente Turbay Ayala, hubo un apoyo internacional de altísimo nivel. Algunos nombres, el politólogo de la ciencia John Ziman, dos futuros Premios Nobel, Leon Lederman y Giorgio Parisi, el leader del proyecto PSSC, Uri Haber-Schaim, el ministro de Ciencia de Venezuela, Raimundo Villegas, Paolo Budinich, cuyo rol en la creación del ICTP fue de una importancia no menor de la que justamente se le reconoce a Salam<sup>5</sup>, Michael Moravcsik, Roy Rubinstein, Giacomo Elias, Gregorio Medrano, Victor Latorre.

Este apoyo internacional hizo posible desarrollar exitosamente las primeras actividades, a través de la creación de la Asociación pro-Centro Internacional de Física, ACIF, comprobando así que el proyecto se podía realizar, ya antes de la fundación del Centro.

Sin embargo, el apoyo científico recordado no hubiera sido suficiente. En países donde la relación entre la importancia científica de un proyecto y su posible impacto económico y social no siempre son entendidos de manera correcta y, a menudo, iniciativas clasificadas apresuradamente como de ciencias básicas, no prosperan, por análisis superficiales que no aprecian su impacto económico y social, y aun menos valoran que se trata de un impacto de largo plazo, es indispensable poder contar con el respaldo gubernamental.

En el caso del CIF hubo, a nivel ejecutivo, el apoyo incondicional de Colciencias, con Efraín Otero y Fernando Chaparro. Ya recordamos que Salam presentó el proyecto al presidente Turbay Ayala. El soporte presidencial siguió y el proceso culminó con la fundación del Centro que ocurrió, con el apoyo discreto y convencido de Jorge Eliécer Ruiz, durante la presidencia de Belisario Betancur, un mes después los dramáticos eventos de noviembre de 1985.

Un tercer factor que hay que reconocer fue el apoyo internacional institucional. Éste no se limitó al ICTP, donde Salam y Budinich estuvieron acompañados por Luciano Bertocchi, Pino Furlan, Anne Gatti, futuros galardonados con el Premio Espíritu de Abdus Salam. Vino de instituciones como la UNESCO, que contaba con un extraordinario director general asistente para Ciencia, Abdul Razzak Kaddoura, coadyuvado por funcionarios como Antonio De Veciana, Siegbert Raither y Gunther Trapp. Y como la OEA, en ese entonces muy atenta al desarrollo científico del continente, con Athos Giacchetti. Sin hablar del apoyo de grandes laboratorios internacionales como Fermilab y TRIUMF.

Además, es de destacar el interés que el proyecto despertó a nivel regional y su integración con otras iniciativas regionales. Me refiero a la asociación de la Sociedad Dominicana de Física, al interés en la Junta del Acuerdo de Cartagena, siendo Carlos Aguirre uno de los miembros fundadores del CIF, y en el Convenio Andrés Bello, al establecimiento de dos oficinas nacionales, en Quito, con Luis Silva de la Universidad

Central, y en Lima, con Víctor Latorre, en estrecha colaboración con Multiciencias<sup>6</sup>, otra institución apoyada por Salam en esos años, que, lamentablemente, no resistió a la crisis de 1990.<sup>7</sup>

A nivel de mi país, Italia, muchos son los nombres que podría mencionar, me limitaré a uno, Egone Ratzenberger, embajador cuando la fundación, y extraordinario amigo de Colombia.

### *¿Circunstancias irrepetibles?*

La larga lista de nombres que he recordado parecería sugerir que sí, que fue un milagro y los milagros no se repiten.

Es cierto que la coincidencia de tantas circunstancias favorables brinda a la experiencia del CIF unas características de unicidad. Al mismo tiempo es una experiencia que puede ayudar a identificar las condiciones necesarias para realizar en países en desarrollo grandes proyectos nacionales, internacionales o regionales.

Un tal análisis puede ser útil para entender por qué otros proyectos similares inspirados por mi convicción de la necesidad, sobre todo en nuestra región, de una nueva generación de Centros regionales de ciencia y tecnología<sup>8</sup> no hayan tenido el mismo éxito, y esto a pesar de poder acreditar la experiencia exitosa del CIF.<sup>9</sup> Aunque, justamente por esa convicción, mi gramsciano optimismo de la voluntad, me sugiere agregar la limitación temporal hasta ahora, “armado con una paciencia ilimitada, no pasivo, inerte sino animado con perseverancia”.<sup>10</sup>

No se ha concretado la propuesta de un Centro Andino de ciencias, obvio complemento de los dos promovidos por el ICTP en México y Brasil, ni en Ecuador (a pesar de contar con un fuerte apoyo gubernamental)<sup>11</sup>, ni en la Costa Caribe de Colombia (a pesar del entusiasta apoyo de Ana Sofía Mesa, rectora de la Universidad del Atlántico y presidenta de SUE-Caribe)<sup>12</sup>, ni se ha podido crear en República Dominicana un Centro de Ciencias de Materiales, no obstante el interés de científicos visionarios y del gobierno<sup>13</sup>.

No es ésta la sede para analizar estos casos, aunque los fracasos enseñan más que las historias de éxitos. Una característica común fue la existencia de dinámicas internas específicas, aunque diferentes, en las universidades que hubieran sido sede de esos Centros.

Problemas que pueden presentarse también en el primer mundo, como ocurrió con el International Center for Theoretical and Applied Physics (IITAP).<sup>14</sup>

Centro ambicioso, liderado por James Vary, apoyado por el propio presidente Martin Jischke de la Universidad de Estado de Iowa (ISU), histórica land-grant university, y también por Salam y por otro Premio Nobel, Tsung Dao Lee, caracterizado por una visión internacional y por un gran compromiso por la paz, la igualdad de género y el desarrollo de las ciencias en Centro América, en África, en Medio Oriente. No bastó. La reducción de la financiación estatal a la ISU, y un menor interés institucional llevaron abruptamente a su cierre, en 2021.

No son solamente problemas reconducibles a la idiosincrasia académica. El caso del Centro intercultural sobre Energía propuesto por Gregorio Medrano en Castilla La Mancha,<sup>15</sup> nos enseña cómo razones de política partidista pueden amenazar proyectos que deberían ser de Estado.

El caso del IITAP, y el recuerdo de que, hasta una institución como el ICTP ha pasado por momentos muy complicados, el del boycott descrito por Alexis De Greiff<sup>16</sup> y la crisis de liquidez superada gracias al apoyo de la República Islámica de Irán, explican por qué abrigó la esperanza de que esas lecciones sirvan en Colombia con referencia al CIF.

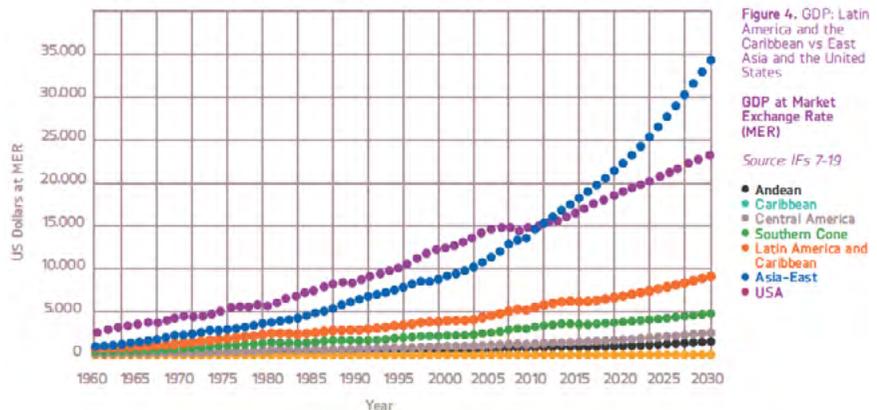
Su carácter de Centro de interés nacional debería ser reconocido a nivel institucional, y no solamente en artículos de académicos, como el de Juan Pablo Negret que mira con espíritu bolivariano a la ciencia latinoamericana.<sup>17</sup>

Volviendo al CIF, llama la atención que tres de los involucrados en su fundación migraron a otros países, en parte por razones personales, es cierto, pero ejemplo concreto de un problema general de nuestros países, la fuga de cerebros.

A pesar de indudables progresos, la ciencia en América Latina es frágil. A menudo la respuesta de los Gobiernos es lenta. Emblemático el caso de la propuesta de crear un Fondo Regional de Ciencia y Tecnología para Centro América<sup>18</sup>. Todos de acuerdo, pero, años después, todavía ninguna decisión formal. No es la primera vez. Recordemos las falsas esperanzas generadas por el Interim Fund de Naciones Unidas para Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Vienna, 1979).<sup>19</sup>

Hace más de treinta años, en preparación a la Asamblea de Caracas de la Academia de ciencia del Tercer Mundo (TWAS), se realizó en Bogotá una reunión de carácter regional.<sup>20</sup> Es frustrante tener que reconocer que lo que escribí con Marta Lucía Guardiola y José Luis Villaveces “los políticos del Sur siempre estarán de acuerdo en emitir declaraciones de que el desarrollo científico y tecnológico es una prioridad absoluta, pero no siempre actuarán de manera adecuada” sigue tristemente actual, así como la observación de que se ignora o subestima la variable tiempo, “lo cual no permite preparar largos diagnósticos y estudios de factibilidad, ignorando que mientras tanto el mundo avanzado se vuelve más avanzado y se aleja más de nuestros países”.<sup>21</sup>

Victor Castaño, pluriacadémico mexicano, ha presentado, en un reciente Simposio una transparencia que habla por sí sola.<sup>22</sup>



La pandemia, con la saga de la espera de las vacunas, debería haber mostrado que para América Latina el rol de usuario de ciencia producida en el primer mundo es inaceptable, no porque merece más, sino porque necesita más.

### ***Miremos al futuro.***

Hay cuatro temas sobre los cuales creo que hay que hacer hincapié.

1. No desperdiciar los recursos humanos.

Esto ocurre con mecanismos y en momentos diferentes, pero todos relevantes e inaceptables.

Ya en la primera edad, por razones socioeconómicas o carencias del sistema educativo, se pierden o no se identifican talentos excepcionales. Es un lujo que ningún país se debería permitir.

¿Cuántos de las decenas de miles de gamines que ha rescatado Jaime Jaramillo<sup>23</sup> y cuántos de los que no han tenido la misma suerte, hubieran podido y podrían dar grandes contribuciones al país? ¿Cuántos talentos precoces se pierden por insuficiente calidad de la educación primaria? Se necesitan programas como el de Jóvenes talentos promovido por Carlos Canjura en El Salvador<sup>24</sup>, y tener maestros de categoría. Quién sabe si un maestro mediocre hubiera entendido el genio de Gauss, cuando sumó los números de 1 a 100. Martin Bartels, quien posteriormente tendría como alumno también a Lobachevski lo entendió.<sup>25</sup>

El porcentaje de quienes terminan secundaria en América Latina es el 25% menor, y en Centro América menos de la mitad, que en los países OCDE. Y los datos de acceso a la Universidad tampoco son para entusiasmarse. Colombia donde hay la experiencia de programas como Ser pilo paga y Generación E está relativamente bien, pero no basta.

Este problema no se resuelve ni termina con la formación. Es crucial impedir la fuga de cerebros, y no me refiero solamente a la externa que, de una u otra manera, puede seguir dando beneficios al país, sino a la interna. Conversar con un chofer de taxi ingeniero puede ser una experiencia placentera para el pasajero, pero registra un fracaso para el país. Con respecto a la externa, por supuesto la Colombia de hoy no tiene nada que ver con la de Pastrana Borrero<sup>26</sup>, pero la experiencia de la Red Caldas no debería ser solamente un paréntesis en la historia de la ciencia colombiana.<sup>27-28</sup>

Y hay la mezcla de interna y externa, de las empresas extranjeras que tienen oficinas y representaciones off-shore en nuestros países.

Fortalecer los doctorados, asegurar una utilización digna de los científicos formados son un primer paso. Es poco. Hay que pensar en un desarrollo armónico de las áreas de investigación. Un descubrimiento histórico como fue el de las ondas gravitacionales<sup>29</sup> ha tenido una exigua participación latinoamericana. La búsqueda de las ondas gravitacionales fue el objeto, en 1983, del primer evento organizado por la ACIF, la asociación que promovió el CIF<sup>30</sup>, y la primera conferencia estuvo a cargo de uno de los padres del CERN, Edoardo Amaldi. Entre los docentes estuvo Fulvio Ricci, quien sería portavoz del grupo italiano en el experimento de 2016.

Si no se hubiera perdido esa oportunidad...

El no abrir nuevos campos de investigación crea inbreeding. Éste no puede ser una política satisfactoria de gestión de la educación superior y de la investigación científica. En ambientes científicos limitados favorece la constitución de pequeños grupos de poder más interesados en su gestión que en el desarrollo del país. Para Colombia este riesgo es reducido, pero me gustaría poder decir lo mismo en otros países de la región.<sup>31</sup>

Estos tres aspectos convergen hacia la pérdida de capacidades potenciales. No es coherente escandalizarse cuando se recuerdan afirmaciones como “España no necesita de sabios” y no reconocer que la América Latina del siglo XXI, sí los necesita, y requiere de políticas inclusivas de formación y utilización de su capital humano.

## 2. Fortalecer la infraestructura científica.

Sigo convencido, y no por terquedad, de la necesidad de centros regionales, aquellos cuyo fracaso temporal he reconocido, y otros que podrían ser muy importantes para el desarrollo de la región.

En Colombia considero necesario un Centro en la Costa Caribe.

El progreso de la región, la posibilidad de utilizarla como trampolín para el fortalecimiento de las relaciones con Centro América y el Caribe, ya serían razones más que suficientes para justificarlo por su interés nacional. Y hay que despejar el terreno del malentendido de que podría ser una torre de marfil desvinculada de las problemáticas locales. Por lo contrario, un tal Centro podría contribuir a numerosas áreas de directo impacto económico y social. Agricultura (piénsese en biotecnología y agua), energía, medicina son solamente algunos ejemplos, sin menospreciar, está claro, el caveat que el Premio Nobel David Gross no se cansa de reiterar. No hay innovación sin tecnología de alto nivel, no hay tecnología de alto nivel, sin ciencias básicas de alto nivel.<sup>32</sup>

Y un Centro de ciencia abierto en sus intereses ofrecería la posibilidad de afrontar otro problema estructural, la debilidad en formación de técnicos de alta especialización. Colombia tiene para ello una estructura como el SENA, ¿es impensable que además de hablar de la importancia de la cooperación público-privada, se empiece a pensar también en una cooperación pública para la formación de técnicos de alta especialización?

Esta última consideración parece ser compartida, al menos en términos generales, por el recién nombrado ministro de Ciencia, Arturo Luna.<sup>33</sup>

Consideraciones parcialmente análogas justificarían proponer también el establecimiento de un Centro en el Sur, eslabón de colaboración con Ecuador, Perú y Bolivia.

### 3. Integración y cooperación regional e interregional

Otro tema donde todos de acuerdo, pero mucho por hacer. Mencioné el caso del FORCYT. Razones para promover cooperación con otras subregiones y regiones sobran. Instrumentos existen para una mayor integración con el Caribe anglófono y la Francia de Ultramar. Y la presencia de un 5% de latinoamericanos de ascendencia árabe no es solamente un problema cultural para discutir en Congresos<sup>34</sup>. Es posible cooperar en ciencia, aplicaciones tecnológicas y un primer paso se dio en el mencionado Simposio de República Dominicana.

### 4. Grandes proyectos

Hay que ser ambiciosos. El primer presidente de Costa Rica, José María Castro Madriz, dijo, hace casi 175 años, que la libertad sin educación es ilusoria. Reemplacemos educación por ciencia y esa afirmación se aplica perfectamente al mundo de hoy.

Hay que pensar en grandes proyectos. En el Simposio en República Dominicana el tema central fue la importancia de megaproyectos y en particular se habló de un sincrotrón para el Gran Caribe.<sup>22</sup> ¿Sueño? Tal vez, pero ¿es aceptable que en América haya veinte sincrotrones, de los cuales solamente uno al Sur del Río Bravo? Una propuesta en este sentido la hizo Bernardo Gómez hace ocho años.<sup>35</sup> Y desde hace unos meses el tema volvió a ser actual.<sup>36</sup> No necesariamente, aunque merece ser considerada la posibilidad, para hacerlo en Colombia, donde la relevancia del tema, por ejemplo en medicina, ha sido analizada en una tesis en la Universidad de Los Andes<sup>37</sup>. El modelo del CERN para el financiamiento y la gestión podría ser replicado. Pero, sí se requiere una visión regional y tal vez, como ocurrió para el CERN, una actitud proactiva de la UNESCO.

Son propuestas al alcance de nuestra región. Juan Pablo Negret, con referencia a ese proyecto ha comentado “no se trata de pensar en pequeño, sino de pensar en grande. No se trata de reducirse a pensar que únicamente podemos hacer ciertas investigaciones con fines inmediatistas. O se hace ciencia universal o no se hace nada. No existe una ciencia de tercera categoría para el tercer mundo.”<sup>38</sup>

¿Es factible? ¿Con qué fondos? Las posibilidades son múltiples. Fondos nacionales por supuesto son necesarios, pero pueden ser complementados por matching funds. En la propuesta se recuerda que “El apoyo externo puede venir de la cooperación para fondos para el desarrollo. En los últimos veinte años el monto de esos fondos ha sido estable, alrededor de un billón de dólares (lo cual en términos reales corresponde a una reducción del 35%). La inversión directa extranjera en la región es del orden de 15 billones de dólares”<sup>39</sup>. Y siguen indicaciones concretas de posibles fuentes de financiación.<sup>36</sup>

Las dudas de siempre sobre el costo de oportunidad de invertir en ciencia en países con inmensos problemas de inequidad social no pueden ser un freno. El costo total de SESAME, el sincrotrón Medio oriental en Jordania fue de 90 millones de dólares<sup>40</sup>. Lo que cuestan 1000 misiles antitanques. O dos aviones de guerra. En 2020 los gastos militares en los países del Gran Caribe fueron de casi 21 billones de dólares, de los cuales casi 5.5 en los del SICA<sup>41</sup>. No cité estos datos por polémica antimilitarista y pacifista. Hubiera podido hablar del costo de grandes obras públicas como los aeropuertos que en los últimos treinta o cuarenta años he visto nacer o remodelar, y hubiera llegado a la misma conclusión. **El costo de oportunidad es criterio que se recuerda a media voz cuando se habla de educación, y con fuerza solamente para la ciencia.**

Al vacío cayeron las palabras del Premio Nobel Bernardo Houssay: La ciencia no es cara. Cara es la ignorancia.

Revertir esto requiere consenso en la sociedad civil, un consenso que trascienda las diferencias políticas y los intereses nacionales y se manifieste en estables políticas científicas, que no son de Gobierno, sino de Estado, y de Región. Es algo irrenunciable y me atrevo a tener la ilusión de que llegar a tener ese consenso sí es posible.

El exergo del estudio de factibilidad del CIF<sup>4</sup> cita la carta que, en 1826, el Libertador escribió al Rector de la Universidad de Caracas, José Cecilio Ávila. “Después de aliviar a los que aun sufren por la guerra, nada puede interesarme más que la propagación de las ciencias”. Frase citada a menudo descontextualizada. No abstracta, sino concreta, como lo fueron las acciones consecuentes, ya que dos semanas después se aprobó la reforma de Santander, hito en la historia de la educación superior latinoamericana. Y nada de su importancia le resta el posible elemento de controversia ideológica que la solución ofrecida por los nuevos Estatutos de la Universidad de Caracas<sup>42</sup> fuese, en grande, lo mismo que ocurrió en Bogotá a expensas del Colegio Mayor del Rosario, expropiaciones en lugar de inversiones.<sup>43</sup>

Doscientos años después hay que participar activamente en la producción de ciencia. Y bien dice Negret. Hay que hacerlo al más alto nivel. Sin conformarse con indicadores como el aumento de las publicaciones cuando (datos de hace veinte años, pero nada ha cambiado) el 98% de los artículos más citados son de solamente 30 países, de los cuales el único latinoamericano es Brasil.<sup>44</sup>

Se necesita mucho más y no se puede hacer sin un compromiso de todos los países de la región.

¿Será posible realizar al menos en esto la unión auspiciada en la Carta de Jamaica?

## Agradecimientos

Este texto ha sido motivado por mi nombramiento como miembro honorario de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Mis agradecimientos a Eduardo Posada por proponerme, a los colegas académicos por aceptarme.

Mi participación personal fue posible gracias al generoso apoyo de la Academia y de su presidente Enrique Forero, y de la Universidad de Cartagena y de Javier Montoya.

Esta presentación se beneficia de los comentarios, antes y después de la sesión en la Academia de algunos amigos que quiero agradecer, Víctor Castaño, Johanna De La Cruz, Manlio Gaudioso, Gregorio Medrano, Vanessa Mejía, Javier Montoya y Eduardo Posada.

Estos agradecimientos no pueden limitarse a lo ocurrido en estos últimos años. Como hice en la sesión de mi posesión quiero recordar al padre Sabino Maffeo, S.J. quien me introdujo a la Física, y a mis mentores en lo que dio origen a mi compromiso en el CIF, Abdus Salam y Edoardo Amaldi.

Y finalmente quiero agradecer a Libia Carbonell e Irma Rugeles, por su colaboración en muchas de las actividades mencionadas.

## Referencias

1. G. Violini, Posesion\_Academia\_Colombiana\_Ciencias\_Exactas\_Fisicas\_Naturales, [https://www.researchgate.net/publication/362830902\\_Posesion\\_Academia\\_Colombiana\\_Ciencias\\_Exactas\\_Fisicas\\_Naturales](https://www.researchgate.net/publication/362830902_Posesion_Academia_Colombiana_Ciencias_Exactas_Fisicas_Naturales), 2022
2. LA2019, pptx, ICTP courtesy
3. Primer encuentro latinoamericano de Sociedades de Física, Revista Mexicana de Física, 29, n.1, 143-171 (pag.170), 1982
4. S. Moore, E. Posada, G. Violini, J Vivas, G. Álvarez, J. Camacho, Centro Internacional de Física; justificación, estructura y diseño, ACIF-Colciencias, 1984
5. De Greiff, Alexis. The Tale of Two Peripheries: The Creation of the International Centre for Theoretical Physics in Trieste, Historical Studies in the Physical and Biological Sciences, vol. 33, no. 1, 2002, pp. 33-59. JSTOR
6. Latorre V. (2018), “Abdus Salam en el Perú”, Tradición, Segunda época, Nr. 16, pp. 132-135. Doi: 10.31381/tradicion.v0i16.1446
7. Miguel García Medina, <https://elcomercio.pe/blog/huellasdigitales/2010/12/una-historica-devaluacion-a-25/>
8. G. Violini, La necesidad de una nueva generación de Centros Regionales de Ciencia y Tecnología, en G. Lemarchand, Relevamiento de la Investigación y la Innovación en la República de Guatemala, UNESCO, 1917

9. Lizbeth Fog, Centro Internacional de Física, Libertad para pensar y actuar, 1985-2010, CIF, 2011
10. Antonio Gramsci, Carta a Carlo Gramsci, 19 diciembre 1929
11. G. Violini, Propuesta de creación del CAIC (Centro Andino de Investigación Científica) en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Informe ESPOCH. 2017
12. G. Violini, La ciencia global, retos y oportunidades para el Gran Caribe, en Educación y Cultura en la integración latinoamericana: retos del siglo XXI, pag. 111-137, Ed SOLAR, Bogotá, 2013
13. A. Núñez-Sellés, F. Piazza. G. Violini, Centro Regional de Investigación en Ciencia de los Materiales en la República Dominicana (CRICMA-RD), informe Universidad Evangélica, Marzo 2018
14. James Vary, International Institute of Theoretical and Applied Physics: An introduction, AIP Conference Proceedings 342, 669 (1995)
15. Proyecto presentado en Sigüenza, en 1981, en el Simposio sobre las Dimensiones internacionales del problema de la energía, bajo la Presidencia de honor del Rey de España
16. Alexis De Greiff, The Politics of Noncooperation: The Boycott of the International Centre for Theoretical Physics, *Osiris*, 2d series 21(1): 86-109, 2006
17. Juan P. Negret, The CIF and Bolivar's Dream, Fermilab, 1985
18. Juan Alfonso Fuentes Soria, Fondo Regional de Ciencia y Tecnología del Sistema de la Integración Centroamericana (FORCYT-SICA): Necesidad y Pertinencia, en G. Lemarchand, Relevamiento de la Investigación y la Innovación en la República de Guatemala, UNESCO, 1917
19. <https://digitallibrary.un.org/record/9177?ln=es>
20. M. L. Guardiola, J. L. Villaveces, G. Violini, Eds., Status and Problems of Science in Latin America and the Caribbean, Bogotá, 1
21. M. L. Guardiola, J. L. Villaveces, G. Violini, Some thoughts about Third World policies on science and technology, en Status and Problems of Science in Latin America and the Caribbean, M. L. Guardiola, J. L. Villaveces, G. Violini, Edts. Pag. 3-9, Bogotá 1990
22. V. M. Castaño, Proyecto de un Sincrotrón en el Gran Caribe, Simposio sobre Megaproyectos, aceleradores de integración y desarrollo, Santo Domingo, 6-7 de junio, 2022
23. <https://www.ninandes.org/es/quienes-somos/nuestro-fundador>
24. Carlos Canjura, contribución al Simposio: Pospandemia. Perspectivas para la Ciencia Latinoamericana y Rol de la Integración Regional y de la Cooperación Internacional, MESCyT, Santo Domingo, 7 de junio, 2021, [youtube.com/watch?v=1UV-MGzYRpA](https://www.youtube.com/watch?v=1UV-MGzYRpA)
25. Antonio Pérez Sanz, La apacible vida de un genio precoz, <https://virtual.uptc.edu.co/ova/estadistica/docs/autores/pag/mat/Gauss2.asp.htm>, 2022
26. G. Violini, Some considerations on brain drain: the Colombian case, *Discovery and Innovation*, 3, 3, 1991
27. Colciencias, Una Nación sin Fronteras, 1995
28. Fernando Chaparro, Hernán Jaramillo, Vladimir Quintero, Aprovechamiento de la Diáspora e Inserción en Redes Globales de Conocimiento: El Caso de la Red Caldas, Informe para el Knowledge for Development Program. World Bank, 2004
29. B.P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102, 2016
30. E. Posada, G. Violini, "Workshop on Search of Gravitational Waves", World Publishing Co., Singapore, 1983
31. G. Violini, La encrucijada de la física dominicana, [acento.com](http://acento.com), Octubre, 15, 2021
32. D. Gross, The critical role of Centers of Science, pg. 70. En: Carlos M.I. Rodríguez Peña, Sixto J. Incháustegui, Galileo Violini, Leandra Tapia, Miledy Alberto, y Francisco Roberto Arias Milla (eds). XVI Congreso Internacional de Investigación Científica, 2021
33. Juan Miguel Hernández Bonilla, Arturo Luna, ministro de Ciencia de Colombia: "Hay que establecer un diálogo con los saberes indígenas", *El País*, 18 de agosto 2022
34. B. M. L. Fernández García, *Il Mondo Arabo in America Latina*, *Politica internazionale*, XXXIV, 4/5, 181, 2004
35. B. Gómez Moreno, Aceleradores para Colombia, *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales*, 38, pag. 71-78, 2014
36. G. Violini, V.M. Castaño, J.A. Fuentes Soria, P. Gómez Ramírez, G. Medrano Asensio, E. Posada, C. Rudamas, A Synchrotron as Accelerator of Science Development, en *Central America and the Caribbean*, arXiv preprint [arXiv:2109.11979](https://arxiv.org/abs/2109.11979), 2021
37. M. C. Paris Díaz, Aceleradores aplicados a la medicina para Colombia, Universidad de Los Andes, 2022

38. Email de Juan Pablo Negret a GalileoViolini, y a seis colegas, 27 de septiembre 2021
39. J. E. Deras, Presentación sobre el Enfoque económico comercial, en el Foro virtual: Retos y desafíos de la Región Centroamericana, Guatemala, 22 de septiembre 2021
40. Anoud Al-Zou'bi, <https://es.unesco.org/courier/2018-4/sesame-excelencia-cientifica-corazon-oriente-medio>, 2018
41. <https://es.statista.com/estadisticas/1224838/gasto-militar-america-latina-caribe-por-pais/>, Statista Research Department, 24 septiembre 2021
42. Juan Vicente González, Biografía de José Cecilio Ávila, <http://www.efemeridesvenezolanas.com/html/cecilio.htm>, sin fecha
43. L. E. Fajardo, C. Cañón, D. Herrera, M. J. Villaveces Niño, El Colegio Mayor Del Rosario y la Reforma universitaria Santanderista, *Revista de economía del Rosario*, 5, 205, 2002
44. David A. King, *Nature*, 430, 211, 2004

## A nuestros lectores y autores

### Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias biomédicas, ciencias del comportamiento (filosofía, psicología, antropología, sociología), ciencias físicas, ciencias naturales (biología, microbiología, botánica, zoología, ecología) ciencias químicas, ciencias de la tierra (geología, medio ambiente) y matemáticas.

Está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (*International Center for Scientific Research*), *Current Mathematical Publications*, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, *Zentralblatt für Mathematik*, *Zoological Record*. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 41 volúmenes.

### Proceso de evaluación por pares

Se recibirán solo los manuscritos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los manuscritos serán evaluados en primera instancia por el editor y los editores asociados de la disciplina correspondiente.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, quienes evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración aproximada de 90 días.

Los pares académicos pueden adoptar alguna de las siguientes tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a un tercer evaluador.

En cualquiera de los casos, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo dentro de las cuatro semanas siguientes. Además, deberá enviar un documento en el que responderá, una a una, todas las observaciones señaladas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, se entenderá que los autores han retirado el manuscrito en su forma actual y, si se remitiera de nuevo, el Comité Editorial de la Revista lo considerará como un nuevo trabajo.

Los trabajos que sean aceptados se considerarán como propiedad de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales** y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

### Ética de la publicación

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACCEFYN), acoge la normatividad internacional definida por el *Committee on Publication Ethics* (COPE). Algunas normas se pueden consultar en:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

Ver documento pdf (anexo)

### Política de acceso abierto

La página web de la Revista ([www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co)) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, el acceso y la difusión de la producción científica.

## Directrices para autores

### *Tipología de los artículos publicados en la Revista*

**Artículos originales o artículos de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene los siguientes apartes importantes: introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

**Artículos cortos:** documentos breves que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica y, que, por lo general, requieren de una pronta difusión.

**Artículos de posesión o artículos de revisión de tema:** documentos resultantes de una investigación donde se analizan crítica y sistemáticamente, a la par que se integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, centradas en un campo de la ciencia o la tecnología, con el fin de dar cuenta de sus avances y sus tendencias de desarrollo. Presentar un artículo de revisión constituye un requisito para que un Académico pueda posesionarse como miembro correspondiente o de número.

**Cartas al editor:** posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

**Comentarios bibliográficos:** son escritos críticos breves sobre libros recientes publicados en las disciplinas de interés de la Revista.

### **Corrección de los autores**

### **Fe de erratas**

## Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales y de alto nivel, escritos en inglés o español, y que traten sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedarán como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo la internet. (Ver transferencia derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia aceptará mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original, que no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado para aparecer en otra publicación impresa o electrónica y que, además, ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista. Igualmente, que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad. (Ver formatos declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).
3. La participación de los autores en el trabajo deberá ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad por los aportes de cada cual. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, quienes deberán ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres. Finalmente, el manuscrito debe contener un párrafo en el que se detallará la contribución de cada uno de los autores.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplan con los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deberán aparecer en la sección de *Agradecimientos*, pero no serán citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deberán aparecer en los *Agradecimientos*.
5. La terminología debe regirse por el Código Internacional de Nomenclatura Botánica. La terminología física, química o bioquímica, deberá seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deberán usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos deberán ser escritos en la forma recomendada por el *Internacional Code of Botanical Nomenclature* y por el *International Committee on Systematics of Prokaryotes* o ICSP.

## Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deberán ser enviados a través de <http://www.raccefyn.co>

El manuscrito incluirá además de la página correspondiente al título, el resumen, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de las figuras, todos los cuales deberán estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No debe olvidarse el usar la numeración en todo el manuscrito. Extensión máxima de 30 páginas, entre 5.000 a 8.000 palabras.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una hoja de presentación, página en Word con los nombres y apellidos (si desea poner el segundo apellido, debe ir separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grado académico), filiaciones y correos electrónicos. Agregar aquí un párrafo en el que los autores declaren su aporte personal al manuscrito bajo consideración.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés (máximo 30 palabras, 165 caracteres)
3. Título corto (máximo 10 palabras, 50 caracteres)
4. Resumen en español e inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis, separadas por punto y coma.
6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico, dirección electrónica y código ORCID. *Open Researcher and Contributor ID* (Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Researcher and Contributor ID*.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo en conjunto con las leyendas de las figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales y con una resolución mayor a 300 dpi (*dots per inch*).
9. El número máximo de tablas y figuras es de 7. Para enviar información adicional se puede emplear la sección de *Información suplementaria* debidamente referenciada en el texto: tabla 1S, 2S, etc.; figura 1S, 2S, etc.

### Estructura del manuscrito

**Introducción:** se debe mostrar el marco teórico en el cual se inscribe el tema de la investigación, propósito del artículo y justificación del estudio indicando, además, la delimitación de la pregunta problema.

**Materiales y métodos:** se describirán los sujetos de observación o experimentación, aparatos o dispositivos y metodologías empleadas en el estudio. La descripción de la metodología debe tener referencias de los métodos usados.

**Análisis estadístico:** señalar los métodos estadísticos utilizados y la manera de analizar los datos.

**Resultados:** deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y las figuras acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

**Discusión:** debe hacerse énfasis en los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastando los resultados con la información pertinente disponible en literatura actualizada y relacionar las conclusiones con los objetivos propuestos. Se deben incluir las implicaciones y limitaciones de los hallazgos y comparar las observaciones relevantes con las de otros estudios.

Los resultados y la discusión pueden presentarse también en forma combinada, en cuyo caso la sección se denominará *Resultados y Discusión*.

**Conclusiones:** deberán responder al objetivo de la investigación reportada e incluir el planteamiento de objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

**Referencias:** todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre entre paréntesis el apellido del primer autor y el año de publicación. Si el apellido del autor o autores forma parte de la estructura formal de la frase, sólo se pondrá entre paréntesis la fecha; por ejemplo: Pérez y Ribas (1996). Si no forma parte de la estructura formal del texto, por ejemplo: ... como indica Barbudo (2003). Si son solo dos autores se pondrán los dos apellidos, si son más de dos sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo “*et al.*”

La Revista ACCEFYN utiliza las normas del Manual APA, estas emplean un sistema de citación de autor-fecha.

**Lista de referencias.** Se organizan alfabéticamente y se citan de la siguiente manera:

*Artículo de revista*

**Apellido, A. A., Apellido, B. B., Apellido, C. C.** (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen: pp-pp.

Ejemplo

**Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L.** (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, 7: 33-40.

### **Libro**

**Apellido, A. A.** (Año). Título. Ciudad, País: Editorial

Ejemplo

**Salisbury, F. B., Ross, C. M.** (1994). Fisiología Vegetal. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

### **Capítulo de libro**

**Apellido, A. A., Apellido, B. B.** (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido. (Ed.), Título del libro (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplo

**Guba, E.G.** (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. La enseñanza: Su teoría y su práctica (148-165). Madrid, España: Akal.

### **Revista en línea**

**Apellido, A. A.** (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen** (número): pp-pp. Disponible en: <http://www...>

Ejemplo

**Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G.** (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Disponible en: <http://www.jstor.org/pss/2388013>.

**Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P.** (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

### **Citas páginas web**

Anotar la fecha de la consulta

Ejemplo

**Guiry, M.D., Guiry, G.M.** (2015). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Disponible en <http://www.algaebase.org>., accedida entre enero y junio de 2015.

**Tablas y figuras:** las tablas y cuadros se denominarán tablas y llevarán numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilizar las letras minúsculas del alfabeto según orden de aparición en la respectiva tabla: a, b, c, d, e, etc.

Las fotografías, gráficos, dibujos y esquemas se denominan todos como Figuras, las cuales se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se describen en hoja separada. Si se trata de micro-fotografías debe indicarse el aumento utilizado. Las personas, o sus nombres, no deben ser identificables en las fotografías pero se requiere permiso escrito para su publicación.

Cuando las tablas y figuras hayan sido tomadas de revistas o libros, sean impresos o electrónicos, se debe especificar la fuente y adjuntar autorización de la respectiva publicación para su reproducción.

**Agradecimientos:** podrán ser expresados a personas o entidades que hayan ayudado en la realización del trabajo. Se mencionarán las personas y el tipo de ayuda aportada, así como las entidades, instituciones o fundaciones que hayan financiado o suministrado materiales. En caso de proyectos de investigación financiados será suficiente con mencionar el código de registro y la entidad, institución o fundación que lo apoyó económicamente.

## **Consideraciones**

Los trabajos aceptados son propiedad de la Revista ACCEFYN y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

## **Corrección de estilo y publicación del manuscrito**

Una vez aceptados los artículos, éstos se enviarán a corrección orto-tipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará el registro de cada una de las sugerencias llevadas a cabo y los comentarios o dudas para que el autor o los autores aprueben y contesten apropiadamente.

La versión corregida deberá ser enviada nuevamente para su aprobación definitiva en un plazo mínimo de 48 horas. El manuscrito deberá ir con una carta al editor, informando cuales correcciones fueron procesadas. El editor le informará al autor la fecha aproximada y el número del volumen en el que el trabajo será publicado.

### **Rectificaciones y correcciones de errores**

Las rectificaciones sobre la información suministrada por parte de los autores, se harán en el número inmediatamente posterior al anuncio de las mismas y serán responsabilidad de los mismos autores. La Revista se encargará de publicar una nota aclaratoria a manera de erratas. En el caso que sean necesarias mejoras y corrección de errores orto-tipográficos, de manejo visual de la información o de imprecisiones involuntarias, el o los autores podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan efectuarse en las versiones electrónicas de la Revista.

### **Falsificación de artículos**

Si en el proceso editorial se encuentra falsificación, omisión de datos, duplicidad del artículo o plagio, se devolverá el original al autor con la debida notificación a su institución patrocinadora, centro de investigación o universidad.

### **Conflicto de intereses**

Si los autores o coautores, editores o revisores (evaluadores) tienen algún conflicto de intereses que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, tal conflicto debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleador-empleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, entre otros.

También existen los conflictos personales resultado de amistades o animadversiones, competencias académicas y pasiones en el campo intelectual o moral (por ej. parientes en una compañía que se beneficiaría de los resultados que se van a publicar, el uso de los resultados publicados para promoción inmediata basada en el artículo publicado, creencias religiosas que estén en conflicto directo con la investigación que se va a publicar, entre otros).

### **Transferencia de derechos de autor**

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También pueden publicarse el título del trabajo, resumen, tablas y figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, también dando el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

### **Aviso de derechos de autor**

Los autores certifican que son los creadores originales del trabajo y declaran que:

- a) Los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y,

- en los casos que así lo requieran, se cuenta con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales.
- b) Todos los materiales que se presentan están totalmente libres de derecho de autor y, por lo tanto, el autor de la correspondencia se hace responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.
  - c) El trabajo es inédito y no será enviado a otras revistas mientras se espera la decisión de los editores de tal revista. El primer autor declara que no existe un posible conflicto de intereses en este manuscrito.
  - d) En caso de ser publicado, los autores del artículo transfieren todos los derechos de autor a la Revista ACCEFYN, sin cuyo permiso expreso no podrá reproducirse ninguno de los materiales publicados en la misma.
  - e) A través de este documento, y si el trabajo es aceptado para su publicación, la Revista ACCEFYN asume los derechos para editar y publicar los artículos en índices nacionales, e internacionales o bases de datos con fines académicos y científicos no comerciales en medios impresos, electrónicos, Internet en texto completo o cualquier otro medio conocido o por conocer con respeto de los derechos de autoría.

### Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También se pueden publicar el título del trabajo, el resumen, las tablas y las figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, dando también el crédito a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y de los coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

### Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico incluidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros ni serán usados con otros fines.

---

### Lista de comprobación para la preparación de envíos

Como parte del proceso de envíos, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

#### 1. Carta de sometimiento del artículo, donde informa que todos los autores han leído, aprueban y declaran que:

- Están de acuerdo con el manuscrito remitido, en su contenido, organización y presentación.
- El trabajo es original, el cual no ha sido publicado previamente y, de igual forma, no se someterá a otra revista hasta conocer la respuesta del Comité Editorial.
- En caso de ser aceptado el manuscrito, se autoriza su publicación bajo las normas establecidas por la revista.

- El documento no cuenta con texto o figuras que tengan reserva de derechos y si los tuviere se cuenta con la autorización escrita para su reproducción.
- El documento no contiene citas o transcripciones de obras que carezcan de referencias bibliográficas debidamente citadas.
- Se incluye un párrafo donde los autores declaran cuál fue el aporte de cada uno de ellos al documento.
- Esta carta firmada debe ser adjuntada en el paso 4 del presente proceso de envío en formato PDF.

## **2. Presentación**

- Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo, apellido y segundo apellido separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grados académicos), filiaciones y correos electrónicos.
- Título completo del manuscrito en español e inglés y título corto.
- Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
- Direcciones electrónicas de todos los coautores.
- Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras. Figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales.

## **3. Estructura del artículo.** Se incluyen

- El resumen en español e inglés (Abstract).
- Las palabras clave (máximo 6) en español e inglés (Keywords).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y/o instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.
- Referencias.
- Declaración de conflicto de interés.

## **4 Información adicional: figuras**

- Se incluyen como archivo independiente, cada figura en página aparte.
- Se incluyen las leyendas correspondientes al final del original. Estas figuras deberán ser cargadas en el paso 4 del presente proceso de envío en formato JPG o TIF.

## **5. Información adicional: tablas**

- Se incluyen al final del original, elaborados en el modelo más sencillo de tablas del programa Word.
- Se ordenan secuencialmente.
- Se incluye el título correspondiente.

## **6. Referencias**

- Se han seguido las normas de la revista de ACCEFYN en las instrucciones a los autores.

## **7. Abreviaturas:**

- Se introducen entre paréntesis la primera vez que se usan.

## **8. Nomenclatura:**

- Los nombres de género y especie están en letra cursiva.
- Los nombres de microorganismos, plantas y animales se escriben completos la primera vez que se citan, en el título y en el resumen.

## **9. Ética**

- Todos los autores conocen y aprueban la presentación del manuscrito, su contenido, la autoría y el orden de la autoría.
- El manuscrito ha sido postulado solo a la Revista ACCEFYN y no se encuentra postulado ni ha sido publicado en otra revista.
- Si el artículo incluye la investigación en humanos o con animales se han seguido las directrices de la Declaración de Helsinki y el uso de primates no humanos en la investigación.
- Se incluye los agradecimientos a las instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.

## **10. Revisores**

Se suministran indicaciones sobre tres o cuatro posibles revisores con sus nombres completos, formación académica y direcciones de correos electrónicos.

## To our readers and authors

### Focus and Scope

The Journal of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences (ACCEFYN) is a multidisciplinary quarterly journal that publishes high quality original research articles.

The journal publishes scientific articles in the disciplines of Biomedical Sciences, Behavioral Sciences (philosophy, psychology, anthropology, and sociology), Natural Sciences (Biology, Botany, Microbiology, Zoology, Ecology), Physical Sciences, Chemical Sciences, Earth Sciences (Geology, Environmental Sciences) and Mathematics. It is included in several national and international directories and indexing services like Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, On-line Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Within the Colombian citation system, the journal is register in Publindex (The Journal index Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias).

The journal's website ([www.racefyn.co](http://www.racefyn.co)) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

### Peer Review Process

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

### Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

See document pdf (annex)

### Open access policy

The journal enables open access to published articles via its website ([www.racefyn.co](http://www.racefyn.co)) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

### Author Guidelines

**Research articles.** A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

**Brief articles.** Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

**Inaugural articles or Review articles.** Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

**Letters to the editor.** Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

**Book reviews.** Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

**Authors correction**

**Errata**

## Information for Authors

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English in an area related to the **Exact, Physical or Natural Sciences**. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see <http://www.icmje.org/> for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.

## Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.acefyn.co>

The manuscript, including the title page, the abstract, tables with titles, graphics with descriptive legends, must be prepared in Microsoft WORD processor in double space. Use Arial font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript. Maximum extension 30 pages, 5,000 to 8,000 words.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name, first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions, and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references, and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or TIF format.

## Manuscript Structure

**Introduction:** there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

**Materials and methods:** a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

**Statistical analysis:** indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

**Results:** these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

**Discussion:** emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies. The results and the discussion may also be presented in a combined form.

**Conclusions:** an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

**References:** these citations must be verifiable. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way: last name of the first author and year of publication Pérez (1996). If there are only two authors use both last names Perez and Ribas (1996). If there are more than two authors use only the first last name followed by *et al.*

**Reference list:** alphabetically and following the examples

### Journal article

**Last name, A. A., Last name, B. B., Last name, C. C.** (Year). Title. Journal name, **volume:** pp-pp.

Example

**Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L.** (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, **7:** 33-40.

### Book

**Last name, A. A.** (year). Title, City, Country: Publisher

Example

**Salisbury, F. B., Ross, C. M.** (1994). *Fisiología Vegetal*. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

### Book chapter

**Last name, A. A., Last name, B. B.** (Year). Chapter title. In A. A. Last name. (Ed.), Book title (pp. xx-xx). City, Country: Publisher.

Example

**Guba, E.G.** (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. *La enseñanza: Su teoría y su práctica* (148-165). Madrid, España: Akal.

### Journal on line

**Last name, A. A.** (Year). Article title. Journal, **volume** (issue): pp-pp. Available in <http://www...or DOI>

Examples

**Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G.** (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Available in: <http://www.jstor.org/pss/2388013>

**Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P.** (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

### References web pages

Date of the access

Example

**Guiry, M.D., Guiry, G.M.** (2015). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Available in <http://www.algaebase.org>., accessed in June 2015.

**Tables and graphics:** The tables and frames are called tables and carry an Arabic numeration in accordance with the order in which they appear. The corresponding title is placed on the upper part of the table and notes are placed in the lower part. Symbols for unit measures must appear in the column

headings. If it is necessary to display some information, use lower case letters from the alphabet according to the appearance of the table: a, b, c, d, e, etc.

Photographs, graphics, pictures, or sketches are named figures, are enumerated in order of appearance, and their legends must be written in a separate page. With respect to microfiches, indicate the size of the augmentation used. People or their names should not be identifiable in photographs, unless written permission for their publication has been obtained.

When tables and figures have been taken from magazines or books, published in hard copy or electronically, specify the source and include the authorization for its reproduction from the respective publication.

**Acknowledgments:** These can be expressed to persons or entities who have aided in the realization of the work. Mention is made of persons and their type of aid provided, as well as to entities or institutions which have provided financial and material assistance. In case of investigative projects with financial support it suffices to mention the registry code and the entity, institution or foundation which provided the economic support.

### Considerations

They will be published in the following issue to the announcement of the correction. They are responsibility of the authors. Errata are responsibility of the Journal.

Fabrication of evidence, data omission, duplicity of data or plagiarism will be penalized. The authors and their institutions, research center or university and sponsors will be notified.

Once the article has been accepted, it will undergo a style and format revision which will bring it to its definitive version. The authors will receive the galley proofs in PDF format for the correction of errors before its printing. The corrected version must be returned for final approval within a period of 48 hours. The manuscript must be accompanied with a letter to the editor informing him of the corrections that were carried out. The editor will inform the author of the date and volume number in which the publication will appear.

If the authors or co-authors, the editors or reviewers (evaluators) have some conflict of interest which may in any way influence the transparency and objectivity of the peer review process and publication, it must be so declared.

The most obvious conflicts of interest are those referred to as financial conflicts, which result between, employer-employee, investments, and patents, as well as honoraria, consulting, paid investigation by companies which depend on the investigative results, etc.

There also exist personal conflicts arising from friendships, animosity, academic competencies and passions in the moral or intellectual field (for example relatives in a company which will benefit from the results to be published, the use of the results for immediate promotion based on the published article, religious beliefs which are in direct conflict with the investigation that will be published, etc.).

### Copyright Notice

#### Declaration of originality and transfer author's rights

The authors declare:

The published data and reference materials have been duly identified with their respective credits and have been included in the bibliographic notes and citations that have been so identified and that should it be required, I have all releases and permissions from any copyrighted material.

All material presented is free from any copyright and that I accept full legal responsibility for any legal claims relating to copyrighted intellectual property, fully exonerating from responsibility the **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

This work is unpublished and will not be sent to any other journal while waiting for the editorial decision of this journal. I declare that there is no conflict of interest in this manuscript.

In case of publication of this article, all author's rights are transferred to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, and so cannot be reproduced in any form without the express permission of it.

By means of this document, if the article is accepted for publication by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, the Revista assumes the right to edit and publish the articles in national and international indices or data bases for academic and scientific use in paper, electronic, CD-ROM, internet form either of the complete text or any other known form known or to be known and non-commercial, respecting the rights of the authors.

### Transfer of author rights

In case the article is approved for publication, the main author in representation of himself and his co-authors or the main author and his co-authors must cede the author rights of the corresponding article to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, except in the following cases:

The authors and co-authors will retain the right to revise, adapt, prepare derived works, oral presentations, and distribution to some colleagues of reprints of their own published work, if the corresponding credit is given to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**. It is also permissible to publish the title of the work, summary, tables, and figures of the work in the corresponding web sites of the authors or their employers, also giving credit to the Revista.

If the work has been realized under contract, the author's employer has the right to revise, adapt, prepare derivative works, reproduce, or distribute in hard copy the published work, in a secure manner and for the exclusive use of his employees.

If the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** were approached for permission by a third party for using, printing, or publishing specifically articles already published, the Revista must obtain the express permission of the author and co-authors of the work or of the employer except for use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work. The **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

No other right, other than the author's right, can be claimed by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

### Privacy Statement

The names and e-mail addresses appearing in the journal will be used solely for the purposes explicitly therein expressed and by no means will they be supplied to third parties.

---

### Submission Preparation Checklist

As part of the submission process, authors are required to check off their submission's compliance with all of the following items, and submissions may be returned to authors that do not adhere to these guidelines.

#### 1. Letter of submission, where it is stated that all authors have read and approved that:

- The submitted manuscript conforms in content, organization and presentation with established norms.
- The original article has not been previously published in any form nor has it been submitted to another journal nor will it be until an answer is received from the Editorial Committee.
- In the case the manuscript is accepted, it is then authorized to be published under the journal's norms.
- The document may not be published without authorization of all copyrighted texts and figures.
- The document is fully cited in a list of references.

#### 2. Appearance

- The first page written in Word with names and surnames (complete name, first and second surnames separated by a hyphen) of all authors (without job titles or academic titles), affiliations and e-mail address.
- Complete title of the manuscript in Spanish and English. Short title.
- Name of person responsible for correspondence with their complete address, telephone number and electronic address.
- E-mail of all coauthors.
- Text, references and tables in the same file together with legends of the figures. Figures in jpg or TIF format.

#### 3. Structure of the article

The following sections are to be included:

- An abstract should be included in both Spanish and English.
- Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
- Introduction.
- Materials and methods.

- Results and Discussion for short communications.
- Discussion.
- Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
- Declaration of conflict of interest.

#### **4. Additional information: Figures**

- Each figure is included in a separate page in jpg or TIF format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o TIF format

#### **5. Additional information: Tables**

- Tables are included on a separate page and are presented in a simple manner as a Word table
- Tables are ordered sequentially

#### **6. References**

Citations must follow the journal ACCEFYN's norms found in the authors' instructions

#### **7. Abbreviations**

The first use is introduced in parentheses

#### **8. Nomenclature**

- The generic and specific names are written in italics
- Names of micro-organisms, plants and animals are written out completely the first time that they are cited in the title and in the abstract.

#### **9. Ethics and malpractice considerations**

- All authors must know and approve of the form, content, authors, and the order of the authors
- An article that has been submitted to the journal ACCEFYN has not be submitted or published in any other journal.
- If the article includes research on human or animals have all authors read and followed the guiding principles of the Declaration of Helsinki and the use of non-human primates in the research?

#### **10. Reviewers**

List 3 or 4 possible reviewers with their complete names, academic background and e-mails.



