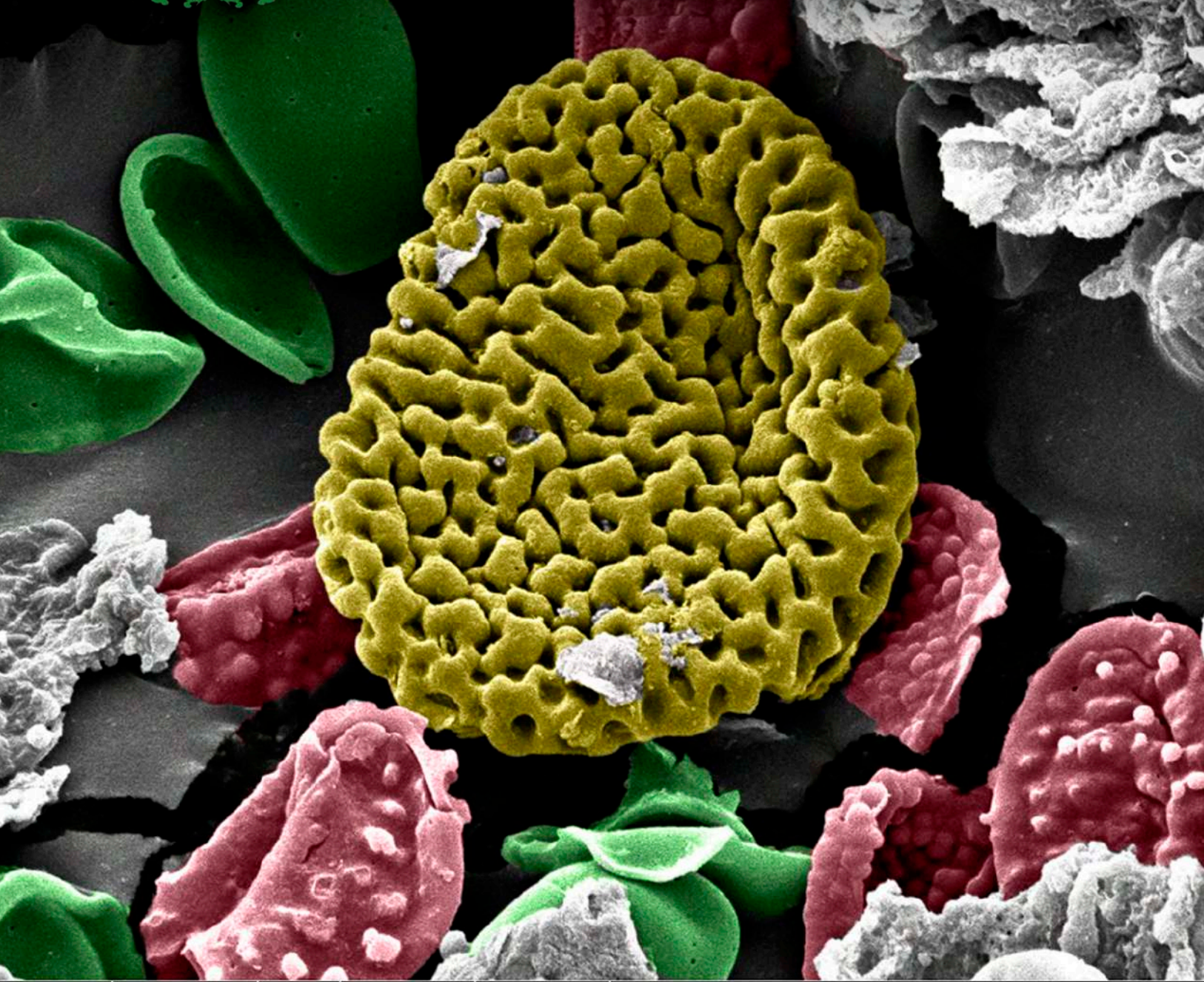




ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

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



50 μm

Vol. 47 · Número 183 · Págs. 213-474 ·
Abril - Junio de 2023 · Bogotá - Colombia



ISSN 0370-3908 • eISSN 2382-4980

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

Vol. 47 • Número 183 • Págs. 213-474 • Abril - Junio de 2023 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

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

Asistente editorial Carolina Acosta

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

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

- Luis Fernando García, M.D., M. Sc.
Profesor emérito, Universidad de Antioquia,
Medellin, Colombia
- Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
- Juanita Ángel, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- Manuel Franco, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- Alberto Gómez, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- John Mario González, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- María Teresa Rugeles, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- María Mercedes Zambrano, Ph. D.
Corpogen, Bogotá, Colombia
- Juan G McEwen, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias del Comportamiento

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

Ciencias Físicas

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

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

Ciencias Naturales

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

- 15 Silvia Villabona, Ph. D.
Universidad Católica de Oriente, Rionegro,
Antioquia, Colombia
- 15 Natalia Ocampo Peñuela, Ph. D.
Universidad de California, Santa Cruz,
Estados Unidos
- 15 María Eugenia-Morales, Ph. D.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Tunja, Colombia

Ciencias Químicas

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

Ciencias de la tierra

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

Matemáticas

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

Comité científico internacional

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

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

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

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

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936

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

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

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



ISSN 0370-3908 • eISSN 2382-4980

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

Vol. 47 • Número 183 • Págs. 213-474 • Abril - Junio de 2023 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias Biomédicas Biomedical Sciences

Review article

Nanoscience, nanotechnology, and disruptive technologies in the context of precision medicine

Nanociencia, nanotecnología y tecnologías disruptivas en el contexto de la medicina de precisión

Jahir Orozco 221

Original article

Illuminating the threat: a decade-long analysis of light pollution in Colombian main urban centers through satellite imagery

Iluminando la amenaza: análisis de una década de contaminación lumínica en los principales centros urbanos de Colombia mediante imágenes satelitales

Kennet J. Rueda-Espinosa, Andrés F. Guerrero-Guío, Santiago Vargas-Domínguez, Mauricio Vinasco-Téllez, Cristian Goéz-Therán 242

Artículo original

Análisis espectroscópico de estrellas enanas y gigantes en los cúmulos abiertos IC 2391 y NGC 6475

Spectroscopic analysis of dwarf and giant stars in the open clusters IC 2391 and NGC 6475

Ángela Catalina Franco-Becerra, Orlando J. Katime-Santrich, Nelson Vera-Villamizar 259

Artículo original

Caracterización del desempeño de una celda de punto fijo de indio (In) y estimación de incertidumbre de medición debido a la repetibilidad de la transición de fase de solidificación

Characterization of the performance of an Indium (In) fixed-point cell and estimation of the uncertainty measurement due to the phase transition repeatability

Juan David Hernández, Andrés J. Bohórquez, Hector Castro 270

Artículo original

Patrón de riqueza de flora y vegetación del páramo El Romeral - macizo de Santurbán

Richness pattern of flora and vegetation from El Romeral Páramo - Santurbán Massif

Sandra Y. Galván-Carvajal, Nelcy Y. Ortiz-Rodríguez, Jairo Pinto-Zárate, J. Orlando Rangel-Ch., Roberto Sánchez 281

Ciencias Físicas Physical Sciences

Ciencias Naturales Natural Sciences

Artículo original

Sinopsis del género *Micropholis* (Sapotaceae) en Colombia y clave para la identificación de sus especies

A synopsis of the genus *Micropholis* (Sapotaceae) in Colombia with an identification key

Liseth Paola Piñeros-U., Rocío Cortés-B., James E. Richardson 301

Original article

Contributions to the biodiversity of Echinoderms (Echinodermata) in the Department of Atlántico, Caribbean Sea, Colombia

Contribuciones a la biodiversidad de los equinodermos en el departamento del Atlántico, mar Caribe de Colombia

Yully F. Contreras-Rueda, Adriana Gracia-Clavijo, Jairo E. Romero-Paz 315

Artículo original

Una nueva especie de *Chaetolepis* (Melastomeae, Melastomataceae) en Bogotá, Colombia

A new species of *Chaetolepis* (Melastomeae, Melastomataceae) in Bogotá, Colombia

Humberto Mendoza-Cifuentes, Cristian Castro 329

Artículo original

Riqueza y abundancia de Tinamiformes, Galliformes, Columbiformes y Gruiformes en la comunidad waodani de Toñampade, Amazonía ecuatoriana: una aproximación inicial por fototrampeo

Richness and abundance of Tinamiformes, Galliformes, Columbiformes and Gruiformes in the waodani community of Toñampade, Ecuadorian Amazon: an initial approach by camera trapping

Sara Castellanos, Iván Jácome-Negrete, Fidel Rodríguez, Francisco Gaba, Iteca Enqueri, Onguine Nemquimo, Froilán Tanguila 335

Comunicación breve

La presencia de *Sloanea multinervis* (Elaeocarpaceae) en Colombia

Presence of *Sloanea multinervis* (Elaeocarpaceae) in Colombia

Leonardo Palacios-Duque 347

Artículo original

Un nuevo humedal artificial en la costa central de Perú: primera caracterización de su avifauna

A new artificial wetland in the central coast of Perú: First characterization of its avifauna

David Montes-Iturrizaga, Héctor Aponte, Sonia Valle-Rubio 352

Original article

Rainwater chemistry of a developing urban-industrial metropolis in Southeast Nigeria

Química del agua de lluvia de una metrópoli urbano-industrial en desarrollo en el sureste de Nigeria

Azubuike S. Ekwere 371

Artículo original

Evaluación computacional de las interacciones de compuestos naturales y el dominio unión al ARN de las nucleolinas utilizando acoplamiento molecular y simulaciones de dinámica molecular

Computational evaluation of the interactions of natural compounds with the RNA binding domain of nucleolins using molecular docking and molecular dynamics simulations

Elvio Gayozo-Melgarejo, Laura Rojas-Aguadé 385

Artículo original

Predicción del ciclo solar 25 mediante modelos ARIMA y redes neuronales LSTM

Prediction of solar cycle 25 using ARIMA models and LSTM neural networks

Samuel Tomas, Oliver Saavedra, Israel Espinoza 400

Review article

Paleopalynology in Colombia: A review

Paleopalynología en Colombia: una revisión

Angelo Plata-Torres, Andrés Pardo-Trujillo, Clemencia Gómez-González, José Abel Flores 412

Ensayo/ Essay

Secuenciación de genomas utilizando lectura de cadenas largas

Genome sequencing using long-read sequencing

Juan Guillermo McEwen, Oscar Mauricio Gómez 439

**El Grupo de Astrofísica Solar (GoSA) del Observatorio Astronómico Nacional de Colombia:
10 años indagando sobre la ciencia del Sol**

The Group of Solar Astrophysics (GoSA) of the National Astronomical Observatory of Colombia:
10 years exploring the science of the Sun

*Santiago Vargas-Domínguez, Benjamín Calvo-Mozo, Juan Carlos Martínez Oliveros,
Juan Camilo Buitrago-Casas* 445

Opinión/ Opinion

Tres lecciones: de azules, biodiversidad, acceso y otras yerbas apropiables

Three lessons: blues, biodiversity, access and other appropriable weeds

Luis Fernando Echeverri, Ph. D. 453

Club de revistas/Journal Club

Proyecto Zoonomia: los genomas de cientos de mamíferos dan pistas claras sobre su evolución

Zoonomia Project: Genomes of hundreds of mammals give clear clues about their evolution

Enrique Arbeláez-Cortés 456

Obituario/Obituary

Carlos Eduardo Vasco Uribe 460

Enfoque y alcance

Focus and Scope 462

Nuestra portada



Paleopalínología en Colombia: una revisión

doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1913>

Crassoretitriletes vanraadshooveni y otras esporas recuperadas de sedimentos del Mioceno en el Caribe colombiano.

Técnica: Imagen con microscopía electrónica de barrido (SEM), editada con Adobe Photoshop en memoria del estilo arte pop de Andy Warhol.

Autor: A. Plata

Ver en la información suplementaria. Apéndice 1, Plancha 10, figura 3. Microfotografía de *C. vanraadshooveni* con microscopía de luz.

Comentario del editor

La paleopalínología, tal como la definen sus practicantes, consiste en el estudio de los microfósiles orgánicos que se encuentran en el contenido orgánico de las rocas sedimentarias, como diría Alfred Traverse “Lo que mi red recoge es un pez”. Esos microfósiles, o palinomorfos, están compuestos de moléculas orgánicas muy resistentes como la esporopolenina o la quitina, e incluyen polen, esporas, megasporas, dinoflagelados, acritarcos, quitinozoos, escolecodontos, algas coloniales, moldes internos de microforaminíferos y esporas de hongos quitinosos y otros cuerpos fúngicos.

La paleopalínología en Colombia ha sido una actividad intensiva desde hace más de 80 años, impulsada principalmente por la exploración petrolera y el estudio de la evolución geológica de los diferentes biomas que habitaron la región desde el Cretácico temprano. El artículo de Plata y colaboradores presenta una recopilación y análisis de todas las publicaciones que incluyen palinomorfos de rocas colombianas. Hace un extenso recuento de publicaciones que incluye artículos que incluso yo desconocía (y llevo estudiando la palinología de Colombia desde 1988). Las ilustraciones son muy útiles, especialmente los mapas con todas las localidades y sus fuentes de publicación. Además, las once láminas de palinomorfos del material suplementario son excelentes y los animo a que las miren, ya que representan toda la gama de morfologías que se encuentran en los palinomorfos. Por último, el artículo muestra que la paleopalínología hoy está más activa que nunca, con múltiples grupos de investigación a lo largo de todos los periodos geológicos.

📧 **Carlos Alberto Jaramillo, Ph. D.**

Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

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

Our cover



Paleopalynology in Colombia: A review

doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1913>

Crassoretitriletes vanraadshooveni and other spores recovered from Miocene sediments of the Colombian Caribbean.

Technique: Image using scanning electron microscopy (SEM), edited with Adobe Photoshop in tribute to the "pop art" style of Andy Warhol.

Author: A. Plata

See Supplementary information Appendix 1, Plate 10, figure 3. Photomicrograph of *C. vanraadshooveni* using white light microscope.

Editor's comment

Paleopalynology, as it is defined by its practitioners, consists of the study of organic microfossils found in the organic content of sedimentary rocks, as Alfred Traverse would say "What my net catches is a fish". Those microfossils, or palynomorphs, consist of resistant organic molecules such as sporopollenin or chitin and include pollen, spores, megaspores, dinoflagellates, acritarchs, chitinozoans, scolecodonts, colonial algae, microforaminifera inner tests, and chitinous fungal spores and other fungal bodies.

There has been intensive paleopalynological in Colombia for more than 80 years, mostly driven by oil exploration and the study of the geological evolution of the different biomes that inhabited the region since the early Cretaceous. The article by Plata and collaborators presents a massive compilation and analysis of all publications that include palynomorphs from Colombian strata. It has an extensive publication survey including articles that even I did not know about (and I have been studying the palynology of Colombia since 1988). The illustrations are very helpful, especially the maps with all the localities and their publication sources. Furthermore, the eleven palynomorph plates of the supplementary material are excellent and I encourage readers to look at them as they illustrate the whole range of morphologies found in palynomorphs. Lastly, the article evidences that today Paleopalynology is more active than ever, with multiple groups doing research all across the geological timetable.

© **Carlos Alberto Jaramillo, Ph. D.**

Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá
Editor asociado Revista de la Academia Colombiana de Ciencias,
Exactas, Físicas y Naturales

Review article

Nanoscience, nanotechnology, and disruptive technologies in the context of precision medicine

Nanociencia, nanotecnología y tecnologías disruptivas en el contexto de la medicina de precisión

✉ Jahir Orozco

Max Planck Tandem Grup in Nanobioengineering, Faculty of Natural and Exact Sciences, Institute of Chemistry, University of Antioquia

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

Abstract

Health care is experiencing a paradigm shift as regards disease diagnosis and management aimed at bringing precision medicine and care to those in need. For this purpose, pure sciences have allied with nanoscience, nanotechnology, and other converging/disruptive technologies to assume such a challenging undertaking. This paper illustrates how such convergence can generate solutions without precedents in healthcare, for example, the potential of electrochemical nanobiosensors for monitoring pathogens and multiparametric biomarkers at different molecular levels and elucidating an individual's health status in a personalized manner. It also gives examples of electrochemical nanobiosensors explored for diagnostics, their potential for prognostics, and potentially assessing the risk of complications in patients. In this context, intelligent diagnostics play a crucial role in healthcare 4.0, as they may go from smart data to massive diagnostic test devices analyzed by big data analytics that benefit from converging technologies such as the internet of things, machine learning, deep learning, and smartphones, among other cutting-edge converging/disruptive technologies. The work highlights the potential of functional nanocarriers for site-specific and controlled drug delivery as a branch of precision medicine that promises to revolutionize healthcare. Finally, it includes some reflections on translational medicine, concluding remarks, and challenges to massively bring this revolutionary new technology to the global health systems.

Keywords: Nanoscience and nanotechnology; Disruptive technology; Diagnostic; Treatment; disease; Precision medicine.

Resumen

El cuidado de la salud está experimentando un cambio de paradigma con respecto al diagnóstico y manejo de enfermedades orientado a llevar la medicina y la atención personalizadas a quienes lo necesitan. En este sentido, las ciencias puras han encontrado aliados en la nanociencia, la nanotecnología y otras tecnologías convergentes y disruptivas para asumir tan exigente tarea. Aquí se ilustra cómo dicha convergencia puede generar soluciones sin precedentes en el cuidado de la salud, por ejemplo, con el uso de nanobiosensores electroquímicos para monitorear patógenos y biomarcadores multiparamétricos a diferentes niveles moleculares y dilucidar el estado de salud de un individuo de manera personalizada. Se presentan, asimismo, ejemplos de nanobiosensores electroquímicos explorados para el diagnóstico, su potencial para el pronóstico y la posible evaluación del riesgo de complicaciones en pacientes. En este contexto, los diagnósticos inteligentes juegan un papel crucial en el cuidado de la salud 4.0, ya que puede avanzarse desde los datos inteligentes hacia dispositivos de diagnóstico capaces de analizar macrodatos que se benefician del Internet de las cosas, el aprendizaje automático, el aprendizaje profundo y los teléfonos inteligentes entre otras tecnologías convergentes y disruptivas de vanguardia. Además, el trabajo destaca el potencial de los nanoportadores funcionales para la administración controlada y específica de fármacos como

Citation: Orozco J. Nanoscience, nanotechnology, and disruptive technologies in the context of precision medicine. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 47(183):221-241, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1895>

Editor: Edgar González

Corresponding autor:
Jahir Orozco;
Grupotandem.nanobioe@udea.deu.co

Received: March 21, 2023

Accepted: June 16, 2023

Published on line: June 23, 2023



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

una rama de la medicina personalizada que promete revolucionar la atención médica. Por último, se hacen algunas reflexiones sobre medicina traslacional, así como comentarios finales y el recuento de los desafíos que implica llevar masivamente esta nueva y revolucionaria tecnología a los sistemas de salud globales.

Palabras clave: Nanociencia y nanotecnología; Tecnología disruptiva; Diagnóstico; Tratamiento; Enfermedad; Medicina personalizada.

Introduction

Chemists have historically been interested in understanding phenomena at the nanoscale. However, nanosciences have emerged on the border of basic sciences such as physics, chemistry, and biology to provide a deeper understanding of nanoscale phenomena and nanotechnology to extrapolate knowledge and formulate practical solutions that tackle real problems. It is logical, therefore, that pure sciences converge with nanoscience and nanotechnology, other more established disciplines, such as biotechnology and bioinformatics, and those with a long history, such as polymer synthesis and cell synthesis biology and experimental biology (Bongomin *et al.*, 2020). In this context, nanotechnology searches to manipulate matter desirable on an atomic scale to produce new materials and structures with distinctive characteristics to understand nanoscale phenomena and improved devices to take advantage of the diminished dimensions and potentialize intelligent solutions in different areas (Baig *et al.*, 2021). In healthcare, nanotechnology offers tremendous opportunities for point-of-measurement (Bayda *et al.*, 2019), data optimization and transfer, building information exchange networks, and unprecedented disease diagnosis and intervention approaches (Tsikala Vafea *et al.*, 2020).

Transformative diagnostic goes beyond innovative, intelligent devices at the point-of-care (POC) to massive diagnostic test devices and smart data coupled to informatics approaches that use big data analytics (BDA), internet of things (IoT), machine learning (ML), deep learning (DL), blockchain analysis (BA), artificial intelligence (AI), augmented reality (AR), system integration, cloud and fog computing, and smartphones, among other cutting-edge converging/disruptive technologies. Appropriately selecting such dynamic tools leads to understanding disease's molecular basis for patient stratification, human biology, and disease behavior, and disseminating information at a large scale within a healthcare system. Therefore, it often includes molecular or cellular analysis by genomics and proteomics (Priyadharshini & Teran, 2016), medical imaging, nanoparticle-based theranostics (therapeutics and diagnostics), or toxgnostics (personalized drug toxicity), among others, to know a person's health status thoroughly (Vásquez & Orozco, 2022). Today more than ever, it is plausible to visualize and analyze physiological processes, gather *in vivo*, *ex vivo*, and *in vitro* data by advanced imaging, and discover new patterns and connections by AI and other computational tools. Additionally, new molecular biology provides vast genetic information, such as expanding clustered, regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPR) technology and new mRNA approaches. Mimicking complex human anatomy in a chip via tissue engineering and organoid technologies is within disrupting conventional drug discovery models, gene therapy, and regenerative medicine studies. Furthermore, combining clinical data and risk factors with genomics, proteomics, and imaging provides a pathology diagnosis and information about the prognosis, prediction, and recurrence of the disease and the susceptibility and survivability of the patient (Cruz & Wishart, 2006).

This paper discusses the convergence of disruptive technologies in generating innovative solutions in healthcare. It selects illustrative examples of the role of electrochemical nanobiosensors in precisely detecting pathogens and how to elucidate an individual's health status in a personalized manner by monitoring a panel of biomarkers at different molecular levels. Next, it offers a perspective on how electrochemical nanobiosensors can be explored for diagnostics, prognosis, and prediction of the risk of complications and how intelligent sensors can go from simple to massive diagnostics

through cutting-edge converging/disruptive technologies. Moreover, through descriptive cases, the work underlines the possibilities of functional nanocarriers for intelligent drug delivery as a branch of precision medicine and comments on translational medicine and the current challenges to implementing this new technology in global health systems. Overall, the work shows the potential of detection and diagnostic devices based on biosensors and treatment based on nanoencapsulation of active ingredients to offer personalized therapeutic alternatives as disruptive technologies that, as they progress, may gradually occupy the niches and markets of the currently established diagnostic and treatment technologies.

Converging technologies in the frame of Industry 4.0

Nowadays, the world is at the cusp of the Industry 4.0 paradigm that has emerged globally to revolutionize production systems and transform the industry. Industry 4.0 integrates physical worlds with 'cyberworlds' by introducing new technologies (Lins & Oliveira, 2020; Sony & Naik, 2020) that seek to digitize industrial value chains and promises to become a new economic and social development model. In this context, Industry 4.0 is a data-driven production system that is exponentially progressing while reshaping how people live and work, offering new opportunities for sustainability, quality of life, and the digital economy (Rainnie & Dean, 2019). In fact, Industry 4.0 is becoming the key to improving productivity, promoting economic growth, and ensuring our society's sustainability (Rosin *et al.*, 2019).

Industry 4.0 is undoubtedly a new scenario in which the virtual, physical, biological, and digital spheres merge converging with various disruptive technologies including AI, AR, IoT, 3D printing, drones, robotics, intelligent sensors, and data system-BDA, BA, and cloud computing. It envisions providing unusual solutions in the industry (Frank *et al.*, 2019) and is characterized by the mass use of intelligent objects in highly reconfigurable environments and fully interconnected industrial systems of products and services (Dragicevic *et al.*, 2019). Therefore, Industry 4.0 promises more efficient and automated processes, higher quality and agility in production, more profitable and personalized products, and shorter delivery times.

Healthcare 4.0

The Health 4.0 revolution seeks healthcare by implementing Industry 4.0 technologies to offer efficient health services including high security and privacy in the electronic medical record of patient data allowing remote access and diagnosis by doctors or health personnel in real-time (Jayaraman *et al.*, 2020). Healthcare 4.0 is digital health or digital technologies and information and telecommunication technologies (ICTs) to support health and other health-related fields. Healthcare 4.0 technologies include IoT, big data, 5G, AI, computing (cloud, fog, and edge), and BA (Haddara & Staaby, 2018). Holistically, the **World Health Organization** (2019) coined Health 4.0 as a discrete digital technology functionality applied to achieve health goals and implement digital health applications and ICT systems including text messages. **Figure 1** summarizes the vertiginous evolution of the healthcare system over the last fifty years.

Industry 4.0 in healthcare is the expression of the convergence of technologies in various application areas including medical education, research, and training (MERT), medical devices and equipment (MDE), pharmaceuticals, and drug discovery and delivery (PDDD), detection, diagnosis, prediction, prognosis, prevention and treatment (DDPPPT), telemedicine and medical record (TMR), health center management and process optimization (HFMPO), surgery, medical imaging, monitoring, and dentistry (Bongomin *et al.*, 2020). Technological convergence in DDPPPT, for example, includes synthetic biology, robotics, IoT, drones, cloud computing, blockchain, AI, and big data while in MERT it includes 3D printing, AI, AR, big data, blockchain, drones, simulation, and robotics.

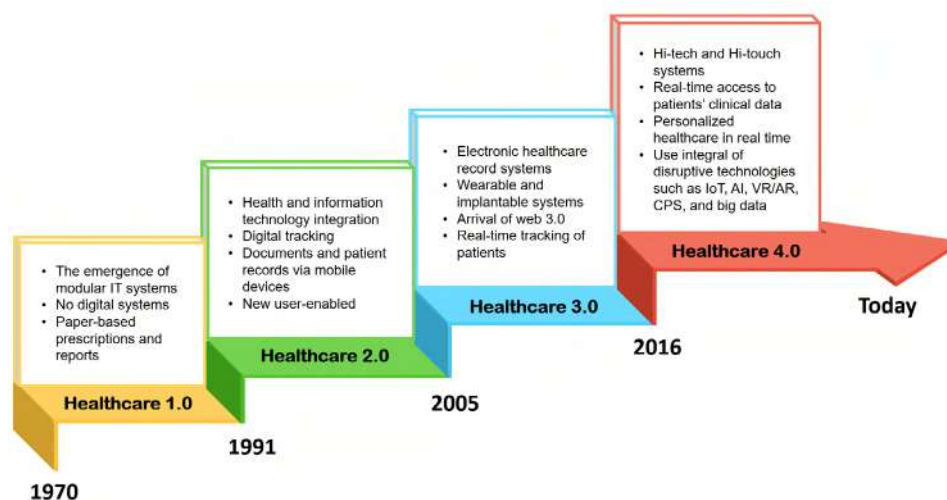


Figure 1. Evolution of the healthcare system in the last fifty years. Modified from reference (Bongomin, *et al.*, 2020).

Nanoscience and nanotechnology in healthcare 4.0

Although studying phenomena at the nanoscale has traditionally been an object of chemistry, nanoscience has emerged as a science that specifically devotes to this field. In the frame of nanoscience, nanotechnology searches to manipulate matter on a near-atomic scale to produce new structures, unprecedented materials, and enhanced devices to understand such phenomena better. In healthcare 4.0, nanotechnology is helping to exploit the initial point-of-measurement, data optimization, and building an information exchange network, to mention only some of its main possibilities.

Nanomaterials have enhanced electrical, mechanical, and optical properties compared to their homologous counterparts at a larger scale enabling some mechanisms to work more efficiently. For example, the high sensitivity and, therefore, more accurate data points are often due to nanomaterials' high electrical conductivity and charge carrier mobility. In intelligent (bio)sensors, the sensing mechanism invokes a change in the nanomaterial's thermal, mechanical, optical, or electrical conductivity depending on the (bio)sensing mechanism, but always with a measurable output signal. The sensitivity of the resulting devices is often high, as very slight changes in temperature, mass, conductivity, or optical properties generate a detectable response.

Nanomaterials are building blocks that can be assembled as nanocarriers to encapsulate drugs. Nanocarriers can be functionalized with ligands to promote the site-specific direction of drugs reducing side effects and enhancing the efficacy and efficiency of therapeutic regimens. In addition, nanoparticles can be specifically uptake by cells for cell labeling and diagnosis; alone or coupled with fluorophores they can serve as contrast imaging to support the diagnosis and be co-encapsulated into nanocarriers for chemo-, thermo-, or photo-therapy (Becerra *et al.*, 2022).

Intelligent nanobiosensors device-based diagnostic

Nanobiosensors are small devices that provide qualitative, semi-quantitative, or quantitative information about a specific target analyte or biomarker in a particular sample (Quinchía *et al.*, 2020). Electrochemical nanobiosensors integrate a transducer platform decorated (or not) with nanomaterials and functionalized with biomolecules to interact with the target rapidly and concentration-dependently. The transducer converts physical, (bio)chemical, or biological information into an electrical signal of simple readout. The biomolecules, also

called bioreceptors, are in direct contact with the transducer and are responsible for the specific interaction with the target. The output system is commonly filtered and amplified through proper circuitry for the final signal display, even in pocket devices.

The transducers are often modified with nanomaterials to take advantage of matter's unique electronic, optical, thermal, and catalytic properties at the nanometer scale. Nanomaterials can be of zero dimensions (0D), such as quantum dots (QDs), fullerenes, gold nanoparticles (AuNPs), magnetic nanoparticles (MNPs), and other NPs; 1D including nanowires, nanorods, single wall carbon nanotubes (SWCNT), multiwall carbon nanotubes (MWCNT); 2D such as clays, MoS₂, black phosphorous, transition metal oxides, layered double hydroxides, and 3D, involving metallic organic frameworks, amorphous carbon, and nanoconjugates, among many others (Soto & Orozco, 2022b). Also, nanomaterials at the transducer platforms have an enhanced area/volume ratio offering a proper 'nanoenvironment' for hosting many bioreceptors while helping keep their conformation, native structure, and functionality. Besides modifying the transducers, nanomaterials can also be part of the amplification system of the bioreceptor-target biorecognition event. For example, nanozymes, enzyme-mimicking synthetic NPs, are emerging as amplification systems of higher efficiency, cost-effectiveness, mass production, and long-term stability compared with their homologous naturally occurring enzymes (Cajigas & Orozco, 2020).

Bioreceptors are functional biomolecules anchored at the transducer platforms to interact specifically with the target. Most common bioreceptors include enzymes, antibodies, DNA strands, but other biomolecules, including peptides, aptamers, and (glycol) proteins, organelles, and whole cells have served as bioreceptors in nanobiosensing approaches (Echeverri & Orozco, 2022b).

Bioreceptors ensure that the biorecognition event is specific and minimize unspecific interactions. Biomolecules are contacted to the transducer platforms by entrapment, ionic interaction, decoration layer-by-layer, and supramolecular and covalent interactions, one of the more comprehensive approaches for linking bioreceptors producing more stable junctions (Fernández & Orozco, 2021).

Electrochemical nanobiosensors are particularly interesting in Healthcare 4.0 because they can be designed and assembled on demand with ultra-high sensitivity, selectivity, and specificity for plenty of molecular targets. They are amenable to miniaturization, require small volumes of reagents and samples, and can be automatized for continuous, in-place monitoring, even in remote settings.

Nanobiosensors can be mass-produced for easy operation and interpretation of output information, even for not-specialized personnel or users, and ubiquitous testing boosted by smartphones. They can be used not only for detecting a target analyte or biomarker but also for diagnosis, prognosis, and knowing the course of diseases. In this context, intelligent diagnostics, which is based on smart data from massive diagnostic test devices analyzed by BA, can play a critical role in Healthcare 4.0, as it benefits from diagnostics linked to new digital Industry 4.0 technologies such as IoT, BDA, ML, DL, BA, AI, AR, neural network (NN) cybersecurity, system integration, cloud and fog computing, and, especially, from intelligent sensors and smartphones (Ting *et al.*, 2020). These innovative tools hold the potential to rapidly generate biomedical data and opportunities not only for diagnosis but prevention, control, treatment, surveillance, and disease management. For instance, point-of-care (POC) devices (Dincer *et al.*, 2019) can be connected with epidemiologic modeling, real-time online databases, virtual clinics, AI-assisted diagnostics, and prognostics to classify medical conditions automatically, as well as distribution of patients' medications (Ting *et al.*, 2020).

POC systems are small, portable, simple devices that can be used in decentralized outside settings, close to the individual, and even at home. Wise diagnostic tests and devices in Healthcare 4.0, including POC devices, should adjust to the REASSURED criteria proposed by WHO in 2018: real-time, easy sample collection, affordable, sensitive, specific, user-friendly, rapid, equipment-free, and delivered to end users (Pérez *et al.*, 2022; Pérez & Orozco, 2022).

Furthermore, devices fulfilling the REASURED criteria are well-intricated with new digital Industry 4.0 technologies. For instance, real-time connectivity features are crucial to reading and communicating the test results and receiving feedback for proper decision-making, remote monitoring of patient's clinical progress, treatment process, and therefore, faster and better disease control. Briefly put, in REASSURED-based diagnostics, intelligent data analysis from millions of decentralized diagnostic devices worldwide can promote intelligent diagnostics through digital technologies such as BDA, ML, DL, NN, BA, and AI. Additionally, real-time diagnostic connectivity can be supported by quick response (QR) international standard codes (Scherr *et al.*, 2017) using fog servers with lower latency than cloud ones. Remarkably, smartphones are ubiquitous, efficient, easy-to-use tools that can promote the migration from batch to innovative (bio) sensing toward intelligent diagnostics. Apart from miniature computers with fast operating systems, 6.8 billion people (94% of the world's population) use smartphones regularly, even in low-income settings without suitable healthcare systems (Xu *et al.*, 2015). This reveals the prominent role of smartphones in telemedicine and the remote monitoring of patients through plenty of IoT devices, including intelligent thermometers, patches, and nanobiosensors (Chamola *et al.*, 2020; Morales-Narváez & Dincer, 2020).

Nanobiosensors based on hybrid materials

Nanobiosensors based on nanohybrids and nanocomposites have attracted increased attention because they provide enhanced sensitivity, selectivity, robustness, and simplicity to the functional interfaces (Cajigas & Orozco, 2020; Soto & Orozco, 2022b). Nanocomposites combine two or more materials of different properties resulting in novel physicochemical properties with one of the dimension constituents at the nanoscale or, instead, the nanocomposite structure exhibiting a nanometric phase separation of the individual components. Therefore, nanocomposites present mixed properties based on the original properties of each nanomaterial constituent (Ashby *et al.*, 2013). Similarly, organic and inorganic building blocks are combined in hybrid nanomaterials (Alemán *et al.*, 2007) with a serial interface between the structural components (Ashby *et al.*, 2013) and emerging improved physicochemical properties distinct from the components alone. Metallic nanostructures (Arduini *et al.*, 2016), silicon nanomaterials (Ahmed *et al.*, 2021; Hasanzadeh *et al.*, 2012; You *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2013), carbon nanostructures, and semiconductor polymers (Barsan *et al.*, 2015; Duan *et al.*, 2016; Y. Liu *et al.*, 2015; Noreña-Caro & Álvarez-Láinez, 2016; Promphet *et al.*, 2015) are the most common hybrid nanomaterials applicable to electrochemical biosensing to date.

Recently, we reviewed the role of hybrid materials on nanobiosensors (Cajigas & Orozco, 2020; Soto & Orozco, 2022b). Besides, a multifunctional hybrid material was developed based on iron NPs coated with graphene and supported on carbon nanotubes. The new hybrid was exhaustively characterized from the material (Gallego *et al.*, 2017) and electrochemical (Soto *et al.*, 2018) points of view. For this purpose, the material was deposited on the surface of a screen-printed carbon electrode (SPCE) (Figure 2A) (Soto *et al.*, 2018), and its electrochemical properties were evaluated in each assembly stage. The results showed that the hybrid material had improved electrochemical properties compared to each component acting alone. In addition, the outer layer of graphene, covering the iron NPs, served as protection to prevent oxidation and maintain its catalytic properties for longer. Finally, it was clear that the electrochemical response of the hybrid material was proportional to changes in the concentration of hydrogen peroxide (H_2O_2) in the order of mM and had a higher sensitivity compared to the response of the individual components.

The conjugation of biomolecules with hybrid nanomaterials has offered opportunities to assemble nanobiosensors of much more improved electrochemical performance. In this context, to improve the analytical performance of the first nanohybrid structure, a novel catalase (Cat)-functionalized hybrid nanomaterial was developed to detect H_2O_2 with enhanced sensitivity (Figure 2B) (Soto *et al.*, 2021). The rationally assembled nanobiosensor used Fe@G-MWCNTs deposited at an SPCE functionalized with Cat by

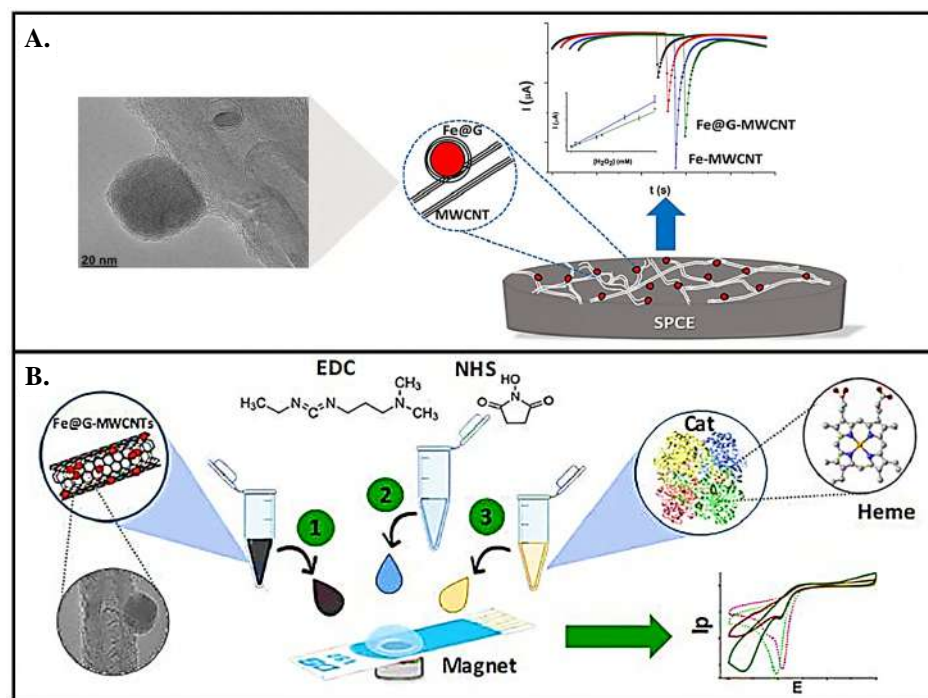


Figure 2. Nanobiosensors based on hybrid materials. **A)** Multifunctional hybrid material based on iron NPs coated with graphene and supported on carbon nanotubes for H_2O_2 sensing (Reproduced with permission, Copyright © 1999-2023 John Wiley & Sons, Inc. **B)** Catalase (Cat)-functionalized hybrid nanomaterial to detect H_2O_2 with enhanced sensitivity (Reproduced with permission, Copyright © 2023, Elsevier B.V.)

covalent coupling. TEM, X-ray diffraction-, X-ray photoelectron- and thermogravimetric analysis were used to characterize the physicochemical properties of the hybrid nanobiomaterial and better understand its electrochemical behavior. The results evidenced enhanced detection of H_2O_2 (linear range from 0.1 to 7 mM, limit of detection (LOD) of 28.2 μM and sensitivity of 0.059 $\mu\text{A}/(\mu\text{M}\cdot\text{cm}^2)$) concerning the hybrid nanomaterial lacking Cat (linear range of 0.5 to 9.8 mM, LOD 0.65 mM and sensitivity of 7.97 $\mu\text{A}/(\text{mM}\cdot\text{cm}^2)$).

Nanobiosensors for the detection of pathogens

Along with multiple-target analytes and biomarker monitoring, pathogen detection is paramount in precision medicine. It is part of the arsenal of tools required to know the status of a patient affected by a disease. Furthermore, pathogen detection searches to identify specific microorganism biomolecules or molecular changes in the host (Zhang & Guo, 2020). In the following paragraphs, some cases illustrating the role of pathogen detection in precision medicine it is presented. Electrochemical nanobiosensors have been used to detect viruses (Alzate *et al.*, 2020; Alzate, *et al.*, 2022; Alzate, *et al.*, 2022; Cajigas *et al.*, 2020, 2022), parasites (Echeverri *et al.*, 2020) and bacteria (Vásquez *et al.*, 2017) with high sensitivity, low LOD, and straightforwardness, demonstrating their potential for disease diagnosis and monitoring the host-pathogen ecosystem.

For example, we developed a dual electrochemical magneto-nanogenosensor for differential diagnosis of the Zika virus and its discrimination from homologous arboviruses such as dengue and chikungunya (Alzate *et al.*, 2020; Alzate *et al.*, 2022; Cajigas *et al.*, 2020). The diagnostic tool integrated magnetic nanoparticles as a support platform with highly selective DNA strands as bioreceptors, which responded to changes in the concentration of Zika genetic material. The nanogenosensor was assembled in a sandwich format, as shown in figure 3A. A DNA strand anchored on the surface of the magnetic

nanoparticles *A(I)* hybridizes the genetic material of the target virus with a DNA strand (2) that is labeled with an enzyme attached to an antibody (3). The resulting nanobioconjugate was transferred to a screen-printed gold electrode (SPAuE) (B) for the corresponding electrochemical reading (C). The enzyme produced an electrical current proportional to the concentration of the virus’s genetic material present in samples from the patients. It

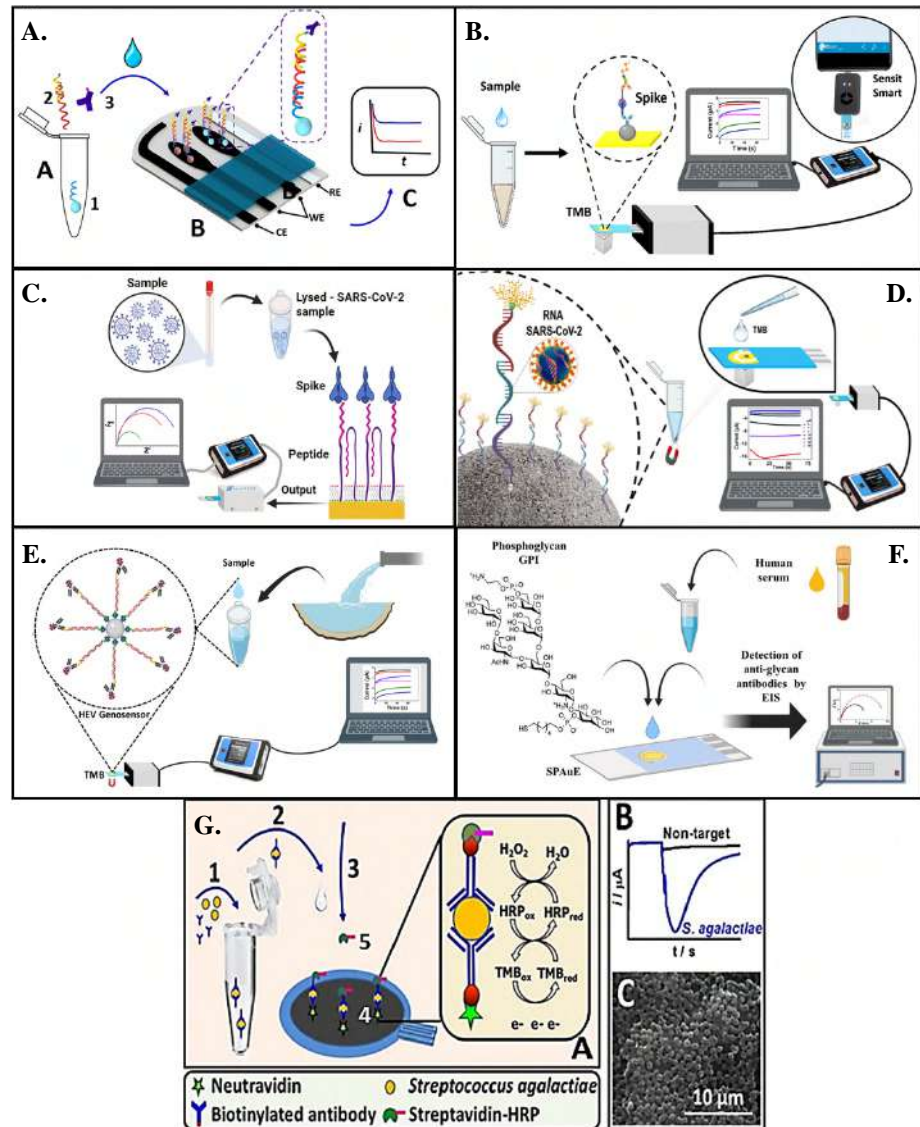


Figure 3. Nanobiosensors for the detection of pathogens. **A)** Dual chronoamperometric magnetogenosensor for differential diagnosis of the Zika virus and its discrimination from homologous arboviruses such as dengue and chikungunya. **B)** Electrochemical immunosensor for amperometric detection of SARSCoV-2. **C)** Electrochemical biosensor based on peptides immobilized on SPAuEs for the rapid and specific detection of unlabelled spike protein from SARS-CoV-2 by EIS. **D)** Electrochemical genosensor for detecting viral RNA from SARS-CoV-2 by chronoamperometry. **E)** Highly sensitive and specific electrochemical genosensor to detect genotype 3 of hepatitis E virus (HEV) in wastewater samples by chronoamperometry. **F)** Synthetic glycosylphosphatidylinositol-based biosensor for the detection of toxoplasmosis by EIS. **G)** First amperometric immunosensor for the rapid detection of *Streptococcus agalactiae* (**A**: Sketch of the concept with all the assembling steps from 1 to 5. **B**: Typical chronoamperometric layout, and **C**: SEM image of bacteria confined at an SPCE surface. (All images were reproduced with permission, Copyright © 2023, Elsevier B.V.)

was possible to sensitize the magnetic nanoparticles with specific DNA probes for Zika, Dengue, or Chikungunya, which, once transferred to the SPE compartments, allow the discrimination of the Zika virus from its homologs in a single test.

An electrochemical immunosensor was recently developed for the amperometric detection of SARS-CoV-2 (V. Vásquez *et al.*, 2022). The sandwich-type immunosensor used magnetic particles that take advantage of the high-affinity spike-ACE2 proteins interaction and a poly-horseradish peroxidase (HRP) enzyme complex to amplify the resultant signal. The particles were confined at SPAuE and the reaction was followed by chronoamperometry reaching 22.5 ng/mL LOD in 5 μ L samples. The device's high performance was also tested in a pocket potentiostat (Figure 3B) with identical results compared to a laboratory potentiostat in line with the concept of POC. For this same purpose, the first electrochemical biosensor based on peptides immobilized on SPAuEs was developed for the rapid and specific detection of unlabelled spike protein from SARS-CoV-2 by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) (Soto & Orozco, 2022a). The biosensor obtained an 18.2 ng/mL LOD in spike protein standard solutions and 0.01 copies/mL of lysed particles in 15 min (Figure 3C), which is considered clinically relevant. It is noteworthy that both devices detected the SARS-CoV-2 in positive samples (by RT-PCR) with no signal in negative samples (from healthy individuals) highlighting the potential of the devices to detect the spike protein from SARS-CoV-2 and viral particles from clinical samples.

Using magnetic particles as a supporting platform, an electrochemical genosensor was developed by covering it with thiolated capture probes (Figure 3D) for detecting viral RNA from SARS-CoV-2. The RNA was sandwiched between the capture and biotinylated signal probes modified with enzyme complexes achieving an 807 fM LOD and high specificity to discriminate from SARS-CoV, MERS, and HKU1 homologous viruses (Cajigas *et al.*, 2022). These examples demonstrate the significant advantages of applying electrochemical biosensors to different molecular levels in SARS-CoV-2 infection as a diagnostic component in COVID-19 precision medicine.

The following example describes a highly sensitive and specific electrochemical genosensor to detect genotype 3 of the hepatitis E virus (HEV) in wastewater samples (Figure 3E) (Alzate *et al.*, 2022). Highly specific DNA target probes were designed to hybridize a target sequence of HEV between a biotinylated capture probe and a labeled signal probe in a sandwich-type format. An enzyme-labeled antibody allowed straightforward electrochemical detection. The specificity of the probes was determined in silico and by PCR and qPCR assays demonstrating efficient amplification of two targets. The genosensor electrochemical response was target concentration-dependent from 300 pM to 2.4 nM with a sensitivity of 16.93 μ A/nM, a 1.2 pM LOD, high reproducibility, and differential against HEV genotype 3 viral genomes.

For the detection of toxoplasmosis, a transducer platform was functionalized with a synthetic glycosylphosphatidylinositol (GPI) glycan (Figure 3F) (Echeverri *et al.*, 2020) distinguishing disease states in human sera (Götze *et al.*, 2014). This means that a label-free electrochemical glycobiosensor for detecting anti-GPI IgG and IgM antibodies in serum from toxoplasmosis seropositive patients was established. This biosensor used the synthetic GPI phosphoglycan bioreceptor anchored at the SPAuE through a linear alkane thiol phosphodiester. The antigen-antibody interaction was detected and quantified by EIS. The resulting device showed a linear dynamic range of anti-GPI antibodies in serum ranging from 1.0 to 10.0 IU mL⁻¹, with a 0.31 IU mL⁻¹ LOD. The method also has great potential for detecting IgG antibodies related to other multiple medical conditions characterized by antibody overexpression. Moreover, the electrochemical biosensor has the additional advantage of a simple, portable, and cheaper tool for a closer-to-the-patient diagnosis.

The first amperometric immunosensor for rapidly detecting *Streptococcus agalactiae* (Vásquez *et al.*, 2017) is a helpful example of detecting a pathogen in its ecosystem. The biosensor consists of a biotinylated antibody (A1) (Figure 3G) with two functions: to selectively interact with the antigens expressed in the bacterial cell wall (A2) and to immobilize the resulting bioconjugate (A3) at the SPEs surface coated with neutravidin

(A4). When the bioconjugate reacts with the streptavidin-HRP complex (A5), an electrochemical signal was produced proportional to the concentration of bacteria present in a given sample (**Figure 3G, B**, signal in blue) and to the minimum signal generated with a control sample (signal in black). **Figure 3G, C** shows an electron microscopy (SEM) image with the bacteria confined at the SPE surface. The immunosensor allowed the selective detection of *S. agalactiae* cells compared with the response in samples containing other bacteria that can coexist in the same environment in 90 min. Highly sensitive quantification of bacteria was also achieved in a concentration range of 10^1 to 10^7 CFU ml^{-1} with a 10 CFU ml^{-1} LOD in buffered solutions doped with bacteria and the detection of bacteria in water samples from a lake in Huila, Colombia ($2^{\circ}41'6''\text{N}$, $75^{\circ}26'24''\text{W}$), demonstrating its practical utility.

These examples show the detection of different pathogens for disease diagnosis and in environmental matrixes potentially useful for surveillance systems and disease control in a specific population.

Nanobiosensors for the detection of cancer-related biomarkers

Smart biosensors may play a crucial role in developing decentralized analysis systems that can bring pathogen detection and microorganism diagnostic capabilities from laboratories to remote settings and even at home. They also have promising testing solutions to monitor other disease-related biomarkers. For example, nanobiosensors for detecting a panel of biomarkers of colorectal cancer (CRC) offer opportunities for early diagnosis, prognosis, predictions of the course of the disease, metastasis, or response to treatment (**Quinchía et al.**, 2020). For this purpose, selecting the panel of biomarkers is crucial, *i.e.*, ideally, biomarkers of different molecular levels in line with the concept of precision medicine.

In the context of nanobiosensors for CRC-related biomarker detection, we reported the first electrochemical immunosensor for detecting β -1,4-GalT-V (**Figure 4A**) (**Echeverri & Orozco**, 2022a). A label-free electrochemical immunosensor coupled an anti- β -1,4-GalT-V antibody covalently at a mixed self-assembled monolayer (SAM)-coated SPAuE

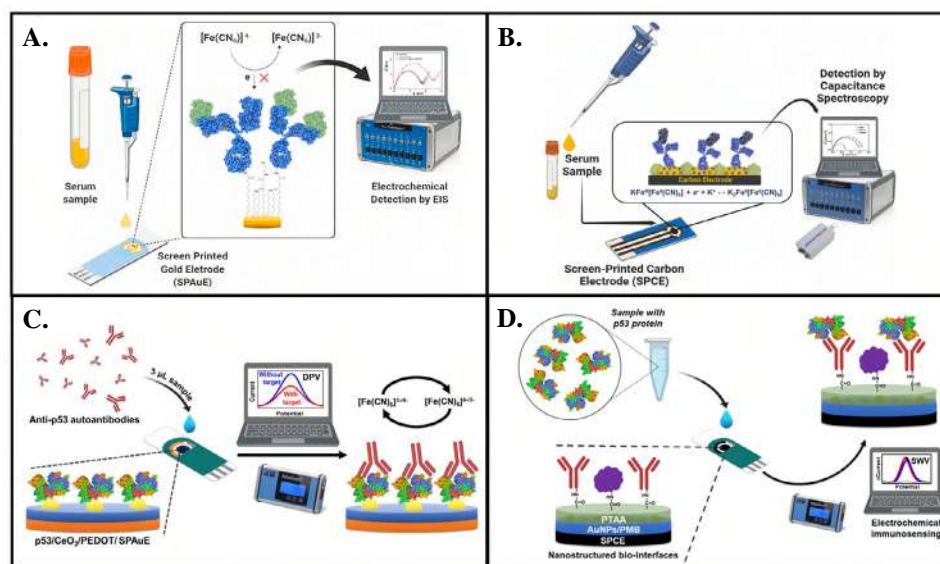


Figure 4. Nanobiosensors for the detection of cancer-related biomarkers. Electrochemical immunosensor for detecting β -1,4-GalT-V by **A**) EIS and **B**) ECS. (Reproduced with permission, Copyright © 2023, Elsevier B. **C**) Nanocomposite-decorated SPAuE for the label-free electrochemical detection of anti-p53 autoantibodies by DPV. **D**) Poly(thiophene acetic acid)/Au/poly(methylene blue) nanostructured interface at SPCE for label-free detection of p53 protein by SWCV. (Reproduced with permission, Copyright © 2023 Springer Nature Switzerland AG.)

surface. This sensitized platform captured the β -1,4-GalT-V biomarker from human serum samples with high specificity. The clinically relevant response, monitored by EIS, was protein concentration-dependent showing a linear dynamic range from 5 to 150 pM, with a sensitivity of $14 \Omega \text{ pM}^{-1}$ and a 7 pM LOD. This outstanding performance highlights its great potential for including it in a biomarker signature for the early diagnosis/prognosis of CRC.

However, to increase the sensitivity and reduce the LOD of this biosensor, we reported the first capacitive nanobiosensor for detecting β -1,4-GalT-V (**Figure 4B**) (Echeverri *et al.*, 2023). To this end, we nanostructured the surface of the SPCEs with gold nanorods (AuNRs) and Prussian blue (PrB). AuNRs increased the SPCE surface area for physical adsorption of the capture antibody and promoted the deposition of PrB as a redox-active compound at the SPCE surface. The molecular biorecognition event perturbed the PrB redox density-of-states changing surface capacitance (C_{μ}) that correlated well with increasing biomarker concentrations from 50 to 400 fM, $1.5 \mu\text{F fM}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ sensitivity, and 20 fM LOD. The label-free reagentless electrochemical device detected the glycoprotein by electrochemical capacitance spectroscopy (ECS) in unpretreated human serum samples with high specificity and ultrasensitivity. The device can be used as a CRC diagnosis/prognosis tool in a decentralized setting with minimal patient sample manipulation and rapid response.

It is clear that detecting autoantibodies (Aabs) can be a potential approach with predictive value for early cancer diagnosis and preventive and curative treatments before the tumor progresses to the late stages (Tan *et al.*, 2009). Thereon, we reported a nanocomposite-decorated SPAuE for the label-free electrochemical detection of anti-p53 autoantibodies (**Figure 4C**) (Cruz-Pacheco *et al.*, 2022). The nanoimmunosensor was prepared by in situ electropolymerization of 3,4-ethylenedioxythiophene (EDOT) on SPAuE in the presence of CeO_2 NPs. The p53 antigen was covalently linked to the resultant Ce/PEDOT/SPAuE platform for determining anti-p53 autoantibodies by differential pulse voltammetry (DPV) in a linear range from 10 to 1000 pg mL^{-1} and with a 3.2 pg mL^{-1} LOD. The nanoimmunosensor offered high specificity, selectivity, and long-term storage stability with great potential to detect anti-p53 autoantibodies in serum samples. Incorporating organo-functional nanoparticles into polymeric matrices can provide a simple-to-assemble, rapid, and ultrasensitive approach for on-site screening of anti-p53 autoantibodies and other disease-related biomarkers with low sample volumes.

Increased serum levels of the tumor suppressor protein p53 have become a promising biomarker for diagnosing CRC (Aydm *et al.*, 2018). We electrochemically assembled step-by-step a poly(thiophene acetic acid)/Au/poly(methylene blue) nanostructured interface at SPCE for label-free detection of p53 protein (**Figure 4D**) (Cruz-Pacheco *et al.*, 2023). The conductive properties of the polymeric interface increased with an additional layer of poly(methylene blue) electropolymerized in the presence of gold nanoparticles. Anti-p53 antibodies were covalently immobilized through the poly(thiophene acetic acid) moieties at the resultant nanoarchitecture as bioreceptors. Under optimal conditions, p53 was specifically and selectively detected by square-wave cyclic voltammetry (SWCV) in a linear range between 1 and 100 ng mL^{-1} with a LOD of 0.65 ng mL^{-1} . In addition, the electrochemical nanoimmunosensor detected p53 in spiked human serum samples and CRC cell lysates; the results did not exhibit significant differences compared to standard spectrophotometric methods. The resultant p53 nanoimmunosensor is simple-to-assemble, robust, and has the potential for point-of-care biomarker detection applications.

Nanobiosensors for diagnostics, prognostics, and assessing the risk of complications in patients

Some biomolecules can indicate the presence, severity, or type of disease. These biomolecules are commonly named biomarkers and play a fundamental role in diagnosing and predicting disease severity and future complications (Zhang & Guo, 2020). However, unlike single biomarkers, a panel of biomarkers should be analyzed in the context of precision medicine as commented. For example, pathogen detection requires the

identification of specific microorganism biomolecules or host molecular changes, including detecting RNA, antigens, host-generated antibodies, or whole cells. This information can be combined with monitoring inflammatory, hematological, biochemical, and endothelial biomarkers, among others, searching to elucidate different pathways of clinical manifestation of a disease or disease complications such as a high inflammatory response, low white blood cell and lymphocyte counts, and abnormal coagulation parameters. Such complications are associated with proteins and genetic factors expressed differently in each person and with disease progression and severity (V. Vásquez *et al.*, 2022).

In this sense, it is worth mentioning the cytokine storm inflammatory response produced in response to, for example, viral infections and their progression (Alosaimi *et al.*, 2020). Excessive release of inflammatory biomarkers in response to infections may trigger sepsis and complications, including lung injury and, eventually, fatal outcomes (Kumar *et al.*, 2020). Furthermore, changes in inflammatory cytokines levels such as interleukin 1 (IL-1), interleukin 6 (IL-6), interleukin 8 (IL-8), interleukin 10 (IL-10), and tumor necrosis factor-alpha (TNF- α) and chemokines such as C-X-C motif chemokine ligand 10 (CXCL10), chemokine ligand 3 (CCL3), and monocyte chemoattractant protein 1 (MCP1) have been related with severe infections (Liu *et al.*, 2020; Mariappan *et al.*, 2021). High levels of IL-6, IL-10, and TNF- α have also been reported in patients with post-acute sequelae of infection after diagnosis (Peluso *et al.*, 2021). Finally, while vitamin D is a biomarker most frequently related to susceptibility to infections, lymphocyte count (lymphopenia), procalcitonin (PCT), IL6, and C-reactive protein (CrP) have been related to disease severity, and the D-dimer, cTn, and LDH biomarkers to the risk of death, (Malik *et al.*, 2021).

Although they are not positioned at the clinical level yet, nanobiosensors have shown outstanding potential not only for diagnostics but for prognosis and determining the course of the disease at the research level. For example, a low-cost, portable, and wireless multiplexed biosensor platform was reported for the rapid and ultrasensitive detection of nucleocapsid proteins as indicative of viral infection and IgG and IgM antibodies of the immune response and CrP of disease severity (Torrente-Rodríguez *et al.*, 2020). In relevant physiological ranges, the device also showed a highly selective and rapid response (1 to 10 min) in blood and saliva samples. This illustrates the implementation of electrochemical biosensors at different molecular levels for diagnosis, progression, and disease severity in line with precision medicine.

Nanocarrier-based therapeutics

Proper detection and timely diagnosis are at the forefront of measures to face diseases. However, success depends on other essential processes that include the selection of proper drug regimens involving the type of drug, dose, and frequency (Sánchez *et al.*, 2020). Encapsulating drugs into biocompatible and biodegradable polymeric nanocarriers, among nanocarriers from other materials, helps to overcome the limitations related to high lipophilicity, low water solubility, and poor biodistribution of some drugs. Furthermore, the loading capacity and encapsulation efficiency can be modulated depending on the formulation's polymer characteristics, synthesis method, and other components. Besides, this strategy protects the cargo from degradation and reaction with other drugs or molecules in the human body in its journey to the therapeutic target. Therefore, it is expected to improve the efficiency and efficacy, decrease the doses and frequencies required to reach the therapeutic doses, and increase its effectiveness, thereby preventing the appearance of side effects and the development of, for example, the resistance of microorganisms to therapeutic agents.

Most often, nanosystems utilized in drug encapsulation include lipid nanoparticles, nanoemulsions, nanosuspensions, nanogels, liposomes, niosomes, and polymeric nanoparticles (Colorado *et al.*, 2020). Among these, niosomes are vesicular systems that have drawn attention due to their chemical stability, cost-effectiveness, and preparation simplicity without harsh solvents (Aditya *et al.*, 2017; Fidan-Yardimci *et al.*, 2019). In this sense, it is worth mentioning our evaluation of the metabolic activity of anthocyanins (ACNs)

encapsulated into niosomes in a diet-induced murine obesity model to increase their oral bioavailability. The ACN-loaded NPs with low dispersity, a negative surface charge, and 57 % encapsulation efficiency ameliorated insulin resistance and glucose intolerance and reduced animal weight and plasma insulin, glucose, leptin, and total cholesterol levels in obese mice.

Often, polymeric nanocarriers are also a choice when encapsulating drugs. Properties of nanocarriers from synthetic polymers can be readily tuned on demand by modulating molecular weight, polymer concentration, and polymer composition using surfactants and/or energy inputs (or not), depending on the fabrication method. In this field, aiming to contribute to a new arsenal of alternatives to fight intracellular infections, we developed a therapeutic strategy based on encapsulating itraconazole (ITZ) into functionalized NPs for their targeted and controlled release into macrophages (**Figure 5A**) (Mejía *et al.*, 2021). NPs were based on poly (lactic acid-co-glycolic acid) (PLGA) polymers of different compositions, molecular weights, and lactic acid-to-glycolic acid ratios self-assembled by the high-energy nanoemulsion method. Results showed improved drug-loading capacity and encapsulation efficiency by lowering the pH and using a mixture of surfactants, initial immediate ITZ release, followed by a prolonged release phase that fitted better with a Fickian diffusion kinetic model and high thermal stability. In addition, NPs were also stable, efficient, and reproducibly functionalized with F4/80 and mannose by the carbodiimide approach (Mejía *et al.*, 2022). Overall, in-vitro assays showed the nanosystem's efficacy in eliminating the *Histoplasma capsulatum* fungus and paved the way to design highly efficient nanocarriers for drug delivery against intracellular infections.

Apart from synthetic polymers, natural polymers are common raw materials when encapsulating drugs. Although modulation of their properties is a little more challenging than their synthetic counterparts, they are amenable to cost-effective derivatization. Derivatization aims to introduce functionalities for coupling with other polymers, ligands, and particles or becoming susceptible to external stimuli, including temperature, pH, media, and light (Becerra *et al.*, 2022).

Functionalization can be achieved on the polymer pre- or post-assembling the nanocarriers using the proper linking chemistry (Fernández & Orozco, 2021). For example, we introduced a photosensitive functionality into a chitosan backbone to assemble a photosensitive polymeric nanocarrier for intracellular administration of therapeutic principles (**Figure 5B**) (Mena-Giraldo *et al.*, 2020). Ultraviolet (UV) photosensitive nanocarriers were then functionalized with transmembrane peptides (TPs) for intracellular and site-specific drug delivery. The resulting nanobioconjugate encapsulated Nile red and dofetilide, the gold standard against auricular fibrosis, with high efficiency and biocompatibility. Furthermore, the cargo was released by exposing it to UV for a few seconds without phototoxicity. Additionally, fluorescence microscopy experiments showed that the nanobioconjugate had a higher affinity for the target cells evidenced by a higher extent of cell uptake concerning bare nanobioconjugates after 8 h of incubation. Overall, the results demonstrated that administering active principles in a spatiotemporally controlled manner through functional nanocarriers is a strategy to improve the effectiveness of therapeutic regimens, with the potential to reduce their side effects.

Taking advantage of the chitosan backbone derivatized with a photostimulable molecule, we proved the concept of immobilizing enzymes into micromotors to improve their long-term stability and reusability by protecting them from UV light irradiation and accelerating substrate degradation (**Figure 5C**) (Mena-Giraldo & Orozco, 2022). Micromotors convert different kinds of energy into movement, enhancing the kinetics and thermodynamics of the involved reactions. The movement of micromotors made of photosensitive polymers speeds up the tasks they were designed for, adding value to the inherent advantages of these naturally existing macromolecules, apart from photostimulation. In this context, we reported on a photosensitive polymeric Janus micromotor (JM) for UV-light protection of enzymatic activity and accelerated motion-degradation of substrates. The UV-photosensitive modified chitosan JMs co-encapsulated fluorescent-

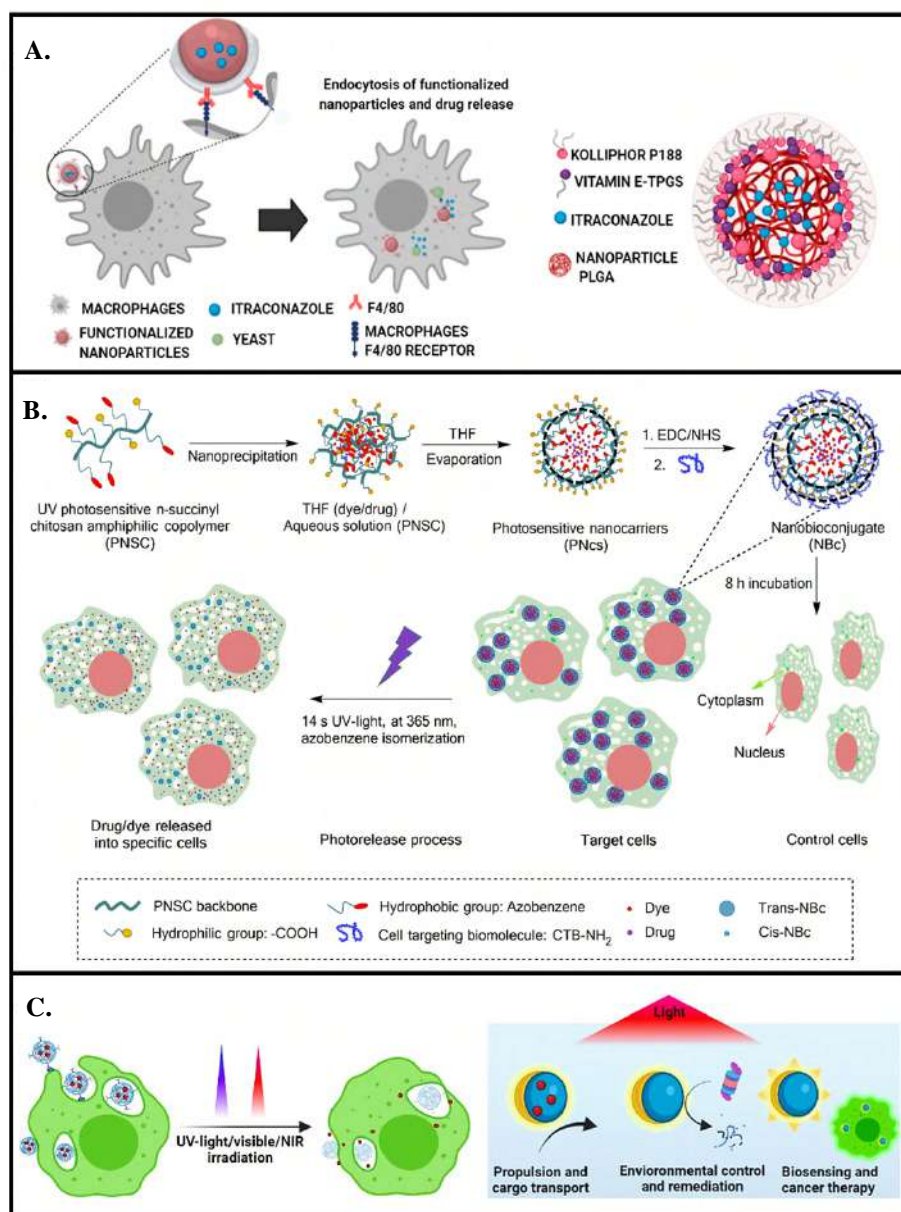


Figure 5. Nanocarrier-based therapeutic. **A)** Therapeutic strategy based on encapsulating itraconazole (ITZ) into functionalized NPs for their targeted and controlled release into macrophages. (Reproduced with permission, open-access articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). Copyright © 2023 Frontiers Media S.A.). **B)** Photosensitive functional chitosan backbone to assemble a photosensitive polymeric nanocarrier for intracellular administration of therapeutic principles. (Reproduced with permission. Copyright © 2023 Springer Nature Limited.) **C)** Micromotor-immobilized enzymes to improve their long-term stability and reusability by protecting them from UV light irradiation and accelerating substrate degradation. (Reproduced with permission. Copyright © 1996-2023 MDPI.)

labeled proteins, enzymes, magnetite, and platinum nanoparticles for magnetic and catalytic motion. The JMs protected the enzymatic activity and accelerated the enzyme–substrate degradation by magnetic/catalytic propulsion. Protein-immobilized photosensitive JMs offer the potential to improve the enzyme’s stability and substrate degradation efficiency.

Precision medicine

For more efficient and effective disease diagnosis and intervention, cutting-edge technologies, devices, therapeutic approaches, and practices are evolving depending on the patient's biology and molecular disease basis. Precision medicine is expected to revolutionize healthcare because it offers tremendous opportunities to assess disease risk and predict response to treatment by understanding a person's health status and healthcare decision-making.

The nanobiosensors mentioned before can be incorporated into microfluidic and/or multiparametric systems for monitoring multiparametric biomarkers at different molecular levels. This information can be interpreted not only along with molecular biomarker features, mechanisms, and clinical history of the patient but in the frame of the other cutting-edge converging/emerging technologies mentioned to potentially elucidate an individual's health status in a personalized manner, including diagnostics, prognostics, and potential assessment of the risk of complications in patients in the context of a new paradigm of precision medicine.

Proper and early diagnostics is one of the most critical aspects guiding therapy. The trend today considers the genetic component of the individual and involves multiple approaches, for example, nuclear imaging agents, nanoparticle-based biomarkers, in-vivo contrast imaging (Kelkar & Reineke, 2011), and laboratory tests (Xie et al., 2010) that often combine molecular assays (Kamps et al., 2017) with deep learning algorithms and AI for monitoring disease-related biomarkers (Yahata et al., 2017). The approaches in synergy ensure accurate diagnostics while holding great promise for preventive care.

After diagnosing a disease, unerring treatment at the proper dose and frequency must be pursued. However, not all treatments are adequate for all patients. Therefore, "therapy with the right drug at the right dose in the right patient" (Mancinelli et al., 2000) is promoted by precision medicine. The potential treatment can be defined based on efficacy, accuracy, and cost-effectiveness, considering the patient response based on its genome. Besides, tailored drug production, tuning composition, dose, or administration route, among other features, can be supported by computational and mathematical models to predict drug interactions, and known pharmacodynamics and pharmacokinetics, in the frame of precision medicine. Similarly, functional nanocarriers (Fernández & Orozco, 2021; Mena-Giraldo & Orozco, 2022) for site-specific and controlled drug delivery, as an object of study of precision medicine, promise to revolutionize healthcare. Additionally, theranostics is emerging as a precision approach to treating diseases such as cancer with the same (or similar) devices for diagnosis and therapy.

Translational medicine: from laboratory to clinic and back

Translational medicine (TM) research involves applying basic scientific principles and concepts to address complex clinical research questions in the clinic. Commonly referred to as a bench-to bedside process, basic sciences such as biology, (bio)chemistry, and physics provide a conceptual understanding of complex phenomena in anatomy, physiology, and pathology, among other medical areas, to better understand disease at the cellular, tissue, organ, and systemic level. Therefore, applying concepts and principles from basic science to the biomedical field boosts the generation of innovative detection and diagnosis tools, new treatments, or novel approaches to fight diseases and investigate their mechanisms (Zerhouni, 2007). Translational research goes from in-vitro approaches that search for an interpretation of basic concepts from laboratories to applying its findings outside settings to benefit patients in the clinic. Socializing the information with patients through clinicians and public health officials is another purpose of translational medicine.

TM searches to convert molecular knowledge into practical, targeted diagnostics and therapies and apply interdisciplinary biomedical research to improve the health of patients and society in general. Therefore, it brings physicians, bench scientists, bioengineers, biostatisticians, epidemiologists, patent and regulatory experts, and patients

to communicate across disciplines to achieve advances in healthcare actively and back to the lab for feedback (Krueger *et al.*, 2019). TM implies out-of-the-box critical thinking, breaking intellectual and cultural barriers, and being outside the comfort zone with literature and basic science knowledge to apply innovative on-demand disease solutions creatively. It requires a deep understanding of the phenomena, the problem, the idea to face it, and how to build interdisciplinary teams to guide it along the long translational journey. In other words, while basic science designs experiments that validate or reject hypotheses to get knowledge (hypothesis-driven science), the starting point of translational science is health needs (need-driven science) and searches for scientific insights or tools to address them and improve health.

Concluding remarks and current challenges

Nanoscience aims to explain phenomena at the nanoscale level in a task traditionally faced by chemistry and basic sciences. Nanotechnology builds new materials, devices, and tools to exploit such understanding while nanobioengineering combines nanomaterials with biomolecules to design unusual solutions with practical applications, especially in nanomedicine. Among them, nanobioengineered diagnostic and therapeutic approaches and disruptive technologies offer tremendous opportunities that promise to revolutionize Healthcare 4.0. New digital technologies (IoT, Fog, cloud computing, DL, ML, NN, BA, AI, etc.) (Hosseinifard *et al.*, 2021) should be integrated within intelligent system architectures as unified strategies for data collection, interpretation, and dissemination toward Healthcare 4.0. For example, nanobiosensors can be integrated into autonomous microfluidic systems for minimum consumption of reagents, samples, and energy and adapted for multiplexed on-demand monitoring of pathology-related biomarkers in portable devices compatible with the POC concept and massive data dissemination (Echeverri & Orozco, 2022b). In addition, intelligent nanobiosensors may shift to intelligent diagnostics efficiently integrated with smartphones as IoT gateways and other new digital technologies to use the data as the base for decision-making in healthcare systems. Besides, the encapsulation of drugs into intelligent drug delivery systems is positioned at the forefront of precision therapeutics that expect to impact the efficiency and effectiveness of therapeutic regimens in many pathologies.

Therefore, nanotechnology and converging technologies are pivotal in the path to precision medicine. Precision medicine is expected to have a tremendous positive impact on disease management in patients (Vásquez & Orozco, 2022). However, many challenges to discovering, developing, manufacturing, and administering novel diagnostics and therapies compatible with this new paradigm remain unresolved. For example, precision medicine should offer a new foundation to help reduce patients' risks, timelines, and costs toward future clinical trials. The effectiveness of such technologies and their broad usability have been demonstrated step-by-step, but their implementation still depends on the cost-benefit. Therefore, further directions have to shift the technology to more efficient and accessible diagnostic and therapeutic solutions.

There is no doubt about the need to bring such a radically new technology to health systems, but there are many other challenges to face. For example, it is mandatory to provide ubiquitous access to the internet, regardless of resource limitations and the country's income. A sufficient number of fog and cloud servers is required to facilitate information exchange networks while minimizing network/data traffic (Hosseinifard *et al.*, 2021). Intelligent diagnostics' big data should be transformed into smart services. Global protocol standardization, harmonization of international rules, ethical guidelines, and security are highly demanded. Continuous smart data directly from patients or self-users at home, along with self-sampling, self-testing, data sharing, and data analysis from healthcare authorities, would be invaluable. Notwithstanding the remaining significant challenges, multi-disciplinary researchers worldwide are trying to tackle healthcare needs with innovative and more intelligent solutions. Their unified efforts for translational medicine are expected to bring all these new technologies to all in need soon.

Acknowledgments

I want to thank the University of Antioquia and the Max Planck Society for their support through the cooperation agreement 566–1, 2014; the Ruta N complex and EPM for hosting the Max Planck Tandem Groups, and M.Sc. Viviana Vásquez for her support with the references and images.

Conflicts of interest

The author declares no conflicts of interest.

References

- Aditya, N. P., Espinosa, Y. G., Norton, I. T.** (2017). Encapsulation systems for the delivery of hydrophilic nutraceuticals: Food application. *Biotechnology Advances*, 35(4), 450-457. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2017.03.012>
- Ahmed, J., Rashed, M. A., Faisal, M., Harraz, F. A., Jalalah, M., Alsareii, S. A.** (2021). Novel SWCNTs-mesoporous silicon nanocomposite as efficient non-enzymatic glucose biosensor. *Applied Surface Science*, 552, 149477. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2021.149477>
- Alemán, J., Chadwick, A. V., He, J., Hess, M., Horie, K., Jones, R. G., Kratochvíl, P., Meisel, I., Mita, I., Moad, G., Penczek, S., Stepto, R. F. T.** (2007). Definitions of terms relating to the structure and processing of sols, gels, networks, and inorganic-organic hybrid materials (IUPAC recommendations 2007). *Pure and Applied Chemistry*, 79(10), 1801-1829. <https://doi.org/10.1351/PAC200779101801/MACHINEREADABLECITATION/RIS>
- Alosaimi, B., Hamed, M. E., Naeem, A., Alsharif, A. A., AlQahtani, S. Y., AlDosari, K. M., Alamri, A. A., Al-Eisa, K., Khojah, T., Assiri, A. M., Enani, M. A.** (2020). MERS-CoV infection is associated with downregulation of genes encoding Th1 and Th2 cytokines/chemokines and elevated inflammatory innate immune response in the lower respiratory tract. *Cytokine*, 126, 154895. <https://doi.org/10.1016/J.CYTO.2019.154895>
- Alzate, D., Cajigas, S., Robledo, S., Muskus, C., Orozco, J.** (2020). Genosensors for differential detection of Zika virus. *Talanta*, 210, 120648. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2019.120648>
- Alzate, D., Lopez-Osorio, M. C., Cortés-Mancera, F., Navas, M. C., Orozco, J.** (2022). Detection of hepatitis E virus genotype 3 in wastewater by an electrochemical genosensor. *Analytica Chimica Acta*, 1221, 340121. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2022.340121>
- Alzate, D., Marín, E., Orozco, J., Muskus, C.** (2022). Differential detection of Zika virus based on PCR. *Journal of Virological Methods*, 301, 114459. <https://doi.org/10.1016/J.JVIROMET.2022.114459>
- Arduini, F., Micheli, L., Moscone, D., Palleschi, G., Piermarini, S., Ricci, F., Volpe, G.** (2016). Electrochemical biosensors based on nanomodified screen-printed electrodes: Recent applications in clinical analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 79, 114-126. <https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2016.01.032>
- Ashby, M., Cope, E., Cebon, D.** (2013). Materials Selection for Engineering Design. *Informatics for Materials Science and Engineering: Data-Driven Discovery for Accelerated Experimentation and Application*, 219-244. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394399-6.00010-2>
- Aydın, M., Aydın, E. B., Sezgintürk, M. K.** (2018). A disposable immunosensor using ITO based electrode modified by a star-shaped polymer for analysis of tumor suppressor protein p53 in human serum. *Biosensors and Bioelectronics*, 107, 1-9. <https://doi.org/10.1016/J.BIOS.2018.02.017>
- Baig, N., Kammakam, I., Falath, W., & Kammakam, I.** (2021). Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, 2(6), 1821–1871. <https://doi.org/10.1039/D0MA00807A>
- Barsan, M. M., Ghica, M. E., Brett, C. M. A.** (2015). Electrochemical sensors and biosensors based on redox polymer/carbon nanotube modified electrodes: A review. *Analytica Chimica Acta*, 881, 1-23. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2015.02.059>
- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., Rizzolio, F.** (2019). The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical–Physical Applications to Nanomedicine. *Molecules* 2020, 25(1), 112. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25010112>
- Becerra, E. H., Quinchía, J., Castro, C., Orozco, J.** (2022). Light-Triggered Polymersome-Based Anticancer Therapeutics Delivery. *Nanomaterials*, 12(5), 836. <https://doi.org/10.3390/NANO12050836>

- Bongomin, O., Yemane, A., Kembabazi, B., Malanda, C., Chikonkolo Mwape, M., Sheron Mpofo, N., Tigalana, D.** (2020). Industry 4.0 Disruption and Its Neologisms in Major Industrial Sectors: A State of the Art. *Journal of Engineering (United Kingdom)*, Volume 2020, Article ID 8090521, 45 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/8090521>
- Cajigas, S., Alzate, D., Fernández, M., Muskus, C., Orozco, J.** (2022). Electrochemical genosensor for the specific detection of SARS-CoV-2. *Talanta*, 245, 123482. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2022.123482>
- Cajigas, S., Alzate, D., Orozco, J.** (2020). Gold nanoparticle/DNA-based nanobioconjugate for electrochemical detection of Zika virus. *Microchimica Acta*, 187(11), 1-10. <https://doi.org/10.1007/S00604-020-04568-1/FIGURES/5>
- Cajigas, S., Orozco, J.** (2020). Nanobioconjugates for Signal Amplification in Electrochemical Biosensing. *Molecules*, 25(15), 3542. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25153542>
- Chamola, V., Hassija, V., Gupta, V., Guizani, M.** (2020). A Comprehensive Review of the COVID-19 Pandemic and the Role of IoT, Drones, AI, Blockchain, and 5G in Managing its Impact. *IEEE Access*, 8, 90225-90265. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992341>
- Colorado, D., Fernández, M., Orozco, J., Lopera, Y., Muñoz, D. L., Acín, S., Balcazar, N.** (2020). Metabolic Activity of Anthocyanin Extracts Loaded into Non-ionic Niosomes in Diet-Induced Obese Mice. *Pharmaceutical Research*, 37(8), 1-11. <https://doi.org/10.1007/S11095-020-02883-Z/TABLES/3>
- Cruz-Pacheco, A. F., Quinchía, J., Orozco, J.** (2023). Nanostructured poly(thiophene acetic acid)/Au/poly(methylene blue) interface for electrochemical immunosensing of p53 protein. *Microchimica Acta*, 190(4), 1-12. <https://doi.org/10.1007/S00604-023-05683-5>
- Cruz-Pacheco, A. F., Quinchía, J., Orozco, J.** (2022). Cerium oxide-doped PEDOT nanocomposite for label-free electrochemical immunosensing of anti-p53 autoantibodies. *Microchimica Acta*, 189(6), 1-13. <https://doi.org/10.1007/S00604-022-05322-5/TABLES/1>
- Cruz, J. A., Wishart, D. S.** (2006). Applications of machine learning in cancer prediction and prognosis. *Cancer Informatics*, 2, 59-77. https://doi.org/10.1177/117693510600200030/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_117693510600200030-FIG2.JPEG
- Dincer, C., Bruch, R., Costa-Rama, E., Fernández-Abedul, M. T., Merkoçi, A., Manz, A., Urban, G. A., Güder, F.** (2019). Disposable Sensors in Diagnostics, Food, and Environmental Monitoring. *Advanced Materials*, 31(30), 1806739. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201806739>
- Dragicevic, N., Ullrich, A., Tsui, E., Gronau, N.** (2019). A conceptual model of knowledge dynamics in the industry 4.0 smart grid scenario. *Knowledge Management Research & Practice*, 18(2), 199-213. <https://doi.org/10.1080/14778238.2019.1633893>
- Duan, T., Chen, Y., Wen, Q., Yin, J., Wang, Y.** (2016). Three-dimensional macroporous CNT-SnO₂ composite monolith for electricity generation and energy storage in microbial fuel cells. *RSC Advances*, 6(64), 59610-59618. <https://doi.org/10.1039/C6RA11869K>
- Echeverri, D., Cruz-Pacheco, A. F., Orozco, J.** (2023). Capacitive nanobiosensing of β -1,4-galactosyltransferase-V colorectal cancer biomarker. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 374, 132784. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2022.132784>
- Echeverri, D., Garg, M., Varón Silva, D., Orozco, J.** (2020). Phosphoglycan-sensitized platform for specific detection of anti-glycan IgG and IgM antibodies in serum. *Talanta*, 217, 121117. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2020.121117>
- Echeverri, D., Orozco, J.** (2022a). β -1,4-Galactosyltransferase-V colorectal cancer biomarker immunosensor with label-free electrochemical detection. *Talanta*, 243, 123337. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2022.123337>
- Echeverri, D., Orozco, J.** (2022b). Glycan-Based Electrochemical Biosensors: Promising Tools for the Detection of Infectious Diseases and Cancer Biomarkers. *Molecules*, 27(23), 8533. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27238533>
- Fernández, M., Orozco, J.** (2021). Advances in Functionalized Photosensitive Polymeric Nanocarriers. *Polymers*, 13(15), 2464. <https://doi.org/10.3390/POLYM13152464>
- Fidan-Yardimci, M., Akay, S., Sharifi, F., Sevimli-Gur, C., Ongen, G., Yesil-Celiktas, O.** (2019). A novel niosome formulation for encapsulation of anthocyanins and modelling intestinal transport. *Food Chemistry*, 293, 57-65. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.04.086>
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., Ayala, N. F.** (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2019.01.004>

- Gallego, J., Tapia, J., Vargas, M., Santamaría, A., Orozco, J., López, D.** (2017). Synthesis of graphene-coated carbon nanotubes-supported metal nanoparticles as multifunctional hybrid materials. *Carbon*, *111*, 393-401. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2016.10.014>
- Götze, S., Azzouz, N., Tsai, Y. H., Groß, U., Reinhardt, A., Anish, C., Seeberger, P. H., Silva, D. V.** (2014). Diagnosis of Toxoplasmosis Using a Synthetic Glycosylphosphatidylinositol Glycan. *Angewandte Chemie International Edition*, *53*(50), 13701-13705. <https://doi.org/10.1002/ANIE.201406706>
- Gu, H., Liu, C., Zhu, J., Gu, J., Wujcik, E. K., Shao, L., Wang, N., Wei, H., Scaffaro, R., Zhang, J., Guo, Z.** (2017). Introducing advanced composites and hybrid materials. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, *1*(1), 1-5. <https://doi.org/10.1007/S42114-017-0017-Y>
- Haddara, M., Staaby, A.** (2018). RFID Applications and Adoptions in Healthcare: A Review on Patient Safety. *Procedia Computer Science*, *138*, 80-88. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2018.10.012>
- Hasanzadeh, M., Shadjou, N., de la Guardia, M., Eskandani, M., Sheikhzadeh, P.** (2012). Mesoporous silica-based materials for use in biosensors. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *33*, 117-129. <https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2011.10.011>
- Hosseinifard, M., Naghdi, T., Morales-Narváez, E., Golmohammadi, H.** (2021). Toward Smart Diagnostics in a Pandemic Scenario: COVID-19. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *9*, 510. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2021.637203/BIBTEX>
- Jayaraman, P. P., Forkan, A. R. M., Morshed, A., Haghighi, P. D., Kang, Y. B.** (2020). Healthcare 4.0: A review of frontiers in digital health. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, *10*(2), e1350. <https://doi.org/10.1002/WIDM.1350>
- Kamps, R., Brandão, R. D., van den Bosch, B. J., Paulussen, A. D. C., Xanthoulea, S., Blok, M. J., Romano, A.** (2017). Next-Generation Sequencing in Oncology: Genetic Diagnosis, Risk Prediction and Cancer Classification. *International Journal of Molecular Sciences* *2017*, *18* (2), 308. <https://doi.org/10.3390/IJMS18020308>
- Kelkar, S. S., Reineke, T. M.** (2011). Theranostics: Combining imaging and therapy. *Bioconjugate Chemistry*, *22*(10), 1879-1903. https://doi.org/10.1021/BC200151Q/ASSET/IMAGES/MEDIUM/BC-2011-00151Q_0006.GIF
- Krueger, A. K., Hendriks, B., Gauch, S.** (2019). The multiple meanings of translational research in (bio)medical research. *History and Philosophy of the Life Sciences*, *41*(4), 1-24. <https://doi.org/10.1007/S40656-019-0293-7/FIGURES/3>
- Kumar, M., Taki, K., Gahlot, R., Sharma, A., Dhangar, K.** (2020). A chronicle of SARS-CoV-2: Part-I - Epidemiology, diagnosis, prognosis, transmission and treatment. *Science of The Total Environment*, *734*, 139278. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139278>
- Lins, T., Oliveira, R. A. R.** (2020). Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, *139*, 106193. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2019.106193>
- Liu, J., Li, S., Liu, J., Liang, B., Wang, X., Wang, H., Li, W., Tong, Q., Yi, J., Zhao, L., Xiong, L., Guo, C., Tian, J., Luo, J., Yao, J., Pang, R., Shen, H., Peng, C., Liu, T., ... Zheng, X.** (2020). Longitudinal characteristics of lymphocyte responses and cytokine profiles in the peripheral blood of SARS-CoV-2 infected patients. *EBioMedicine*, *55*, 139-140. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2020.102763>
- Liu, Y., Liu, J., Tang, H., Liu, J., Xu, B., Yu, F., Li, Y.** (2015). Fabrication of highly sensitive and selective electrochemical sensor by using optimized molecularly imprinted polymers on multi-walled carbon nanotubes for metronidazole measurement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *206*, 647-652. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2014.10.019>
- Malik, P., Patel, U., Mehta, D., Patel, N., Kelkar, R., Akrmah, M., Gabrilove, J. L., Sacks, H.** (2021). Biomarkers and outcomes of COVID-19 hospitalisations: systematic review and meta-analysis. *BMJ Evidence-Based Medicine*, *26*(3), 107-108. <https://doi.org/10.1136/BMJEBM-2020-111536>
- Mancinelli, L., Cronin, M., Sadée, W.** (2000). Pharmacogenomics: The promise of personalized medicine. *AAPS PharmSci*, *2*(1), 29-41. <https://doi.org/10.1208/PSO20104>
- Mariappan, V., Manoharan, P. S., R, P., Shanmugam, L., Rao, S. R., Pillai, A. B.** (2021). Potential biomarkers for the early prediction of SARS-COV-2 disease outcome. *Microbial Pathogenesis*, *158*, 105057. <https://doi.org/10.1016/J.MICPATH.2021.105057>
- Mejía, S. P., López, D., Cano, L. E., Naranjo, T. W., Orozco, J.** (2022). Antifungal Encapsulated into Ligand-Functionalized Nanoparticles with High Specificity for Macrophages. *Pharmaceutics*, *14*(9), 1932. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS14091932/S1>

- Mejía, S. P., Sánchez, A., Vásquez, V., Orozco, J.** (2021). Functional Nanocarriers for Delivering Itraconazole Against Fungal Intracellular Infections. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 1520. <https://doi.org/10.3389/FPHAR.2021.685391/BIBTEX>
- Mena-Giraldo, P., Orozco, J.** (2022). Photosensitive Polymeric Janus Micromotor for Enzymatic Activity Protection and Enhanced Substrate Degradation. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 14(4), 5897-5907. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.1C14663/SUPPL_FILE/AM1C14663_SI_007.MP4
- Mena-Giraldo, P., Pérez-Buitrago, S., Londoño-Berrío, M., Ortiz-Trujillo, I. C., Hoyos-Palacio, L. M., Orozco, J.** (2020). Photosensitive nanocarriers for specific delivery of cargo into cells. *Scientific Reports*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58865-z>
- Morales-Narváez, E., Dincer, C.** (2020). The impact of biosensing in a pandemic outbreak: COVID-19. *Biosensors and Bioelectronics*, 163, 112274. <https://doi.org/10.1016/J.BIOS.2020.112274>
- Noreña-Caro, D., Álvarez-Láinez, M.** (2016). Functionalization of polyacrylonitrile nanofibers with β -cyclodextrin for the capture of formaldehyde. *Materials & Design*, 95, 632-640. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.01.106>
- Peluso, M. J., Lu, S., Tang, A. F., Durstenfeld, M. S., Ho, H. E., Goldberg, S. A., Forman, C. A., Munter, S. E., Hoh, R., Tai, V., Chenna, A., Yee, B. C., Winslow, J. W., Petropoulos, C. J., Greenhouse, B., Hunt, P. W., Hsue, P. Y., Martin, J. N., Daniel Kelly, J., ... Henrich, T. J.** (2021). Markers of Immune Activation and Inflammation in Individuals With Postacute Sequelae of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Infection. *The Journal of Infectious Diseases*, 224 (11), 1839-1848. <https://doi.org/10.1093/INFDIS/JIAB490>
- Pérez, D. J., Patiño, E. B., Orozco, J.** (2022). Electrochemical Nanobiosensors as Point-of-Care Testing Solution to Cytokines Measurement Limitations. *Electroanalysis*, 34 (2), 184-211. <https://doi.org/10.1002/ELAN.202100237>
- Pérez, D., Orozco, J.** (2022). Wearable electrochemical biosensors to measure biomarkers with complex blood-to-sweat partition such as proteins and hormones. *Microchimica Acta*, 189 (3), 1-28. <https://doi.org/10.1007/S00604-022-05228-2>
- Priyadharshini, V. S., Teran, L. M.** (2016). Personalized Medicine in Respiratory Disease: Role of Proteomics. *Advances in Protein Chemistry and Structural Biology*, 102, 115-146. <https://doi.org/10.1016/BS.APCSB.2015.11.008>
- Promphet, N., Rattanarat, P., Rangkupan, R., Chailapakul, O., Rodthongkum, N.** (2015). An electrochemical sensor based on graphene/polyaniline/polystyrene nanoporous fibers modified electrode for simultaneous determination of lead and cadmium. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 207(PartA), 526-534. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2014.10.126>
- Quinchía, J., Echeverri, D., Cruz-Pacheco, A. F., Maldonado, M. E., Orozco, J. A.** (2020). Electrochemical Biosensors for Determination of Colorectal Tumor Biomarkers. *Micromachines*, 11(4), 411. <https://doi.org/10.3390/MI11040411>
- Rainnie, A., Dean, M.** (2019). Industry 4.0 and the future of quality work in the global digital economy. *Labour and Industry*, 30(1), 16-33. <https://doi.org/10.1080/10301763.2019.1697598>
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., Pellerin, R.** (2019). Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1644-1661. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2019.1672902>
- Sánchez, A., Mejía, S. P., Orozco, J.** (2020). Recent Advances in Polymeric Nanoparticle-Encapsulated Drugs against Intracellular Infections. *Molecules*, 25(16), 3760. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25163760>
- Scherr, T. F., Gupta, S., Wright, D. W., Haselton, F. R.** (2017). An embedded barcode for “connected” malaria rapid diagnostic tests. *Lab on a Chip*, 17(7), 1314-1322. <https://doi.org/10.1039/C6LC01580H>
- Sony, M., Naik, S.** (2020). Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory: A systematic review and proposed theoretical model. *Technology in Society*, 61, 101248. <https://doi.org/10.1016/J.TECHSOC.2020.101248>
- Soto, D., Alzate, M., Gallego, J., Orozco, J.** (2018). Electroanalysis of an Iron@Graphene-Carbon Nanotube Hybrid Material. *Electroanalysis*, 30(7), 1521-1528. <https://doi.org/10.1002/ELAN.201800115>
- Soto, D., Alzate, M., Gallego, J., Orozco, J.** (2021). Hybrid nanomaterial/catalase-modified electrode for hydrogen peroxide sensing. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 880, 114826. <https://doi.org/10.1016/J.JELECHEM.2020.114826>

- Soto, D., Orozco, J.** (2022a). Peptide-based simple detection of SARS-CoV-2 with electrochemical readout. *Analytica Chimica Acta*, 1205, 339739. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2022.339739>
- Soto, D., Orozco, J.** (2022b). Hybrid Nanobioengineered Nanomaterial-Based Electrochemical Biosensors. *Molecules*, 27(12), 3841. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27123841>
- Tan, H. T., Low, J., Lim, S. G., Chung, M. C. M.** (2009). Serum autoantibodies as biomarkers for early cancer detection. *The FEBS Journal*, 276(23), 6880-6904. <https://doi.org/10.1111/J.1742-4658.2009.07396.X>
- Ting, D. S. W., Carin, L., Dzau, V., Wong, T. Y.** (2020). Digital technology and COVID-19. *Nature Medicine*, 26(4), 459-461. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0824-5>
- Torrente-Rodríguez, R. M., Lukas, H., Tu, J., Min, J., Yang, Y., Xu, C., Rossiter, H. B., Gao, W.** (2020). SARS-CoV-2 RapidPlex: A Graphene-Based Multiplexed Telemedicine Platform for Rapid and Low-Cost COVID-19 Diagnosis and Monitoring. *Matter*, 3(6), 1981-1998. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.09.027>
- Tsikala Vafea, M., Atalla, E., Georgakas, J., Shehadeh, F., Mylona, E. K., Kalligeros, M., Mylonakis, E.** (2020). Emerging Technologies for Use in the Study, Diagnosis, and Treatment of Patients with COVID-19. *Cellular and Molecular Bioengineering*, 13(4), 249-257. <https://doi.org/10.1007/S12195-020-00629-W/METRICS>
- Vásquez, G., Rey, A., Rivera, C., Iregui, C., Orozco, J.** (2017). Amperometric biosensor based on a single antibody of dual function for rapid detection of *Streptococcus agalactiae*. *Biosensors and Bioelectronics*, 87, 453-458. <https://doi.org/10.1016/J.BIOS.2016.08.082>
- Vásquez, V., Navas, M.-C., Jaimés, J. A., Orozco, J.** (2022). SARS-CoV-2 electrochemical immunosensor based on the spike-ACE2 complex. *Analytica Chimica Acta*, 1205, 339718. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2022.339718>
- Vásquez, V., Orozco, J.** (2022). Detection of COVID-19-related biomarkers by electrochemical biosensors and potential for diagnosis, prognosis, and prediction of the course of the disease in the context of personalized medicine. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 415(6), 1003-1031. <https://doi.org/10.1007/S00216-022-04237-7>
- World Health Organization.** (2019). *WHO guideline. Recommendations on digital interventions for health system strengthening*. 124.
- Xie, J., Lee, S., Chen, X.** (2010). Nanoparticle-based theranostic agents. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 62(11), 1064-1079. <https://doi.org/10.1016/J.ADDR.2010.07.009>
- Xu, X., Akay, A., Wei, H., Wang, S., Pinguan-Murphy, B., Erlandsson, B. E., Li, X., Lee, W., Hu, J., Wang, L., Xu, F.** (2015). Advances in Smartphone-Based Point-of-Care Diagnostics. *Proceedings of the IEEE*, 103(2), 236-247. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2378776>
- Yahata, N., Kasai, K., Kawato, M.** (2017). Computational neuroscience approach to biomarkers and treatments for mental disorders. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 71 (4), 215-237. <https://doi.org/10.1111/PCN.12502>
- You, M., Yang, S., An, Y., Zhang, F., He, P.** (2020). A novel electrochemical biosensor with molecularly imprinted polymers and aptamer-based sandwich assay for determining amyloid- β oligomer. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 862, 114017. <https://doi.org/10.1016/J.JELECHEM.2020.114017>
- Zerhouni, E. A.** (2007). Translational Research: Moving Discovery to Practice. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, 81(1), 126-128. <https://doi.org/10.1038/SJ.CLPT.6100029>
- Zhang, J., Chai, Y., Yuan, R., Yuan, Y., Bai, L., Xie, S.** (2013). A highly sensitive electrochemical aptasensor for thrombin detection using functionalized mesoporous silica@multiwalled carbon nanotubes as signal tags and DNase signal amplification. *Analyst*, 138(22), 6938-6945. <https://doi.org/10.1039/C3AN01587D>
- Zhang, L., Guo, H.** (2020). Biomarkers of COVID-19 and technologies to combat SARS-CoV-2. *Advances in Biomarker Sciences and Technology*, 2, 1-23. <https://doi.org/10.1016/J.ABST.2020.08.001>

Original article

Illuminating the threat: a decade-long analysis of light pollution in Colombian main urban centers through satellite imagery

Iluminando la amenaza: análisis de una década de contaminación lumínica en los principales centros urbanos de Colombia mediante imágenes satelitales

✉ Kennet J. Rueda-Espinosa^{1,2}, ✉ Andrés F. Guerrero-Guio², ✉ Santiago Vargas-Domínguez^{3,*},
✉ Mauricio Vinasco-Téllez^{4,5}, ✉ Cristian Goéz-Therán⁶

¹Fregata Space, Spain

²Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

⁴Departamento de Astronomía, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia

⁵Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

⁶Oficina de Olimpiadas Colombianas, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia

Abstract

Light pollution is a form of environmental degradation present throughout the world that affects the natural environment, flora, fauna, and various aspects of human life. Despite the growing concern about this problem, its study in Colombia is still minimal. Here we present a comprehensive analysis of the expansion of artificial nighttime lighting in the main Colombian cities between 2012 and 2022. According to the analysis, light pollution levels in the urban areas of Bogotá, Barranquilla, and Cartagena increased, while in Medellín, Cali, and Bucaramanga, they decreased. However, all the cities evaluated experienced an expansion in the coverage of illuminated areas revealing an evident spatial increase of the problem. In the case of Bogotá, the phenomenon was studied at the locality level. Additionally, we used external data to analyze the relationship between increased light pollution and the installation of new luminaires, the change to LED technologies, and the growing population density and gross domestic product (GDP) in the city. Our results provide valuable information on the threat of light pollution in Colombia and the need to take measures to help control the associated environmental degradation.

Keywords: Light pollution; Sky brightness; Astronomical observation; Environment; Remote sensing.

Resumen

La contaminación lumínica es una forma de degradación ambiental que aumenta cada vez más en todo el mundo y afecta el entorno natural, la flora, la fauna y varios aspectos de la vida humana. A pesar de la creciente preocupación por esta problemática, en Colombia su estudio es aún muy limitado. Aquí analizamos de forma exhaustiva la expansión de la luz nocturna artificial en las principales ciudades de Colombia entre el 2012 y el 2022. Se evidenció así un aumento en los niveles de contaminación lumínica en las áreas urbanas de Bogotá, Barranquilla y Cartagena, en tanto que en las de Medellín, Cali y Bucaramanga disminuyó la radiancia promedio. Sin embargo, en todas las ciudades consideradas en el estudio la cobertura de áreas iluminadas aumentó, con un evidente incremento espacial del fenómeno. En el caso de Bogotá, se analizó detalladamente el fenómeno a nivel de localidades y, a partir de datos externos, se verificaron, además, las relaciones del aumento de la contaminación lumínica con la instalación de nuevas luminarias, el cambio a tecnologías LED, y el crecimiento de la densidad poblacional y el producto interno bruto de la ciudad. Nuestros

Citation: Rueda-Espinosa KJ, Guerrero-Guio AF, Vargas-Domínguez S, *et al.* Illuminating the threat: a decade-long analysis of light pollution in Colombian main urban centers through satellite imagery. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.* 47(183):242-258, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1867>

Editor: Román Castañeda

***Corresponding autor:**
Santiago Vargas-Domínguez;
svargasd@unal.edu.co

Received: February 14, 2023

Accepted: May 20, 2023

Published on line: June 8, 2023



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

resultados brindan información valiosa sobre la creciente amenaza de la contaminación lumínica en Colombia y respaldan la necesidad de tomar medidas que ayuden a controlar la degradación ambiental asociada.

Palabras clave: Contaminación lumínica; Brillo del cielo; Observación astronómica; Medio ambiente; Teledetección.

Introduction

Light pollution is the excess or misdirection of artificial light in the environment. It is generally caused by building lights, streetlights, and other artificial lighting not properly designed or positioned. Besides disrupting natural darkness and limiting the visibility of the stars (Falchi *et al.*, 2022), light pollution can have a number of negative effects on the environment and on human health as commented extensively in multiple studies in the last twenty years (Cinzano *et al.*, 2001; Falchi *et al.*, 2016; Góez-Therán & Vargas-Domínguez, 2021; Bará *et al.*, 2022). One of the main causes of the increase in light pollution is the rapid growth of urbanization and the accompanying expansion of artificial lighting in urban areas (Stone, 2017). As more people move into cities and towns, there is an expected increase in the amount of artificial light in the environment that can lead to a phenomenon known as "skyglow" by which the night sky appears washed out and is difficult to see due to the excess of light in the atmosphere (Kyba & Hölker, 2013). Other factors contributing to the magnification of light pollution include the proliferation of electronic devices and the increasing use of light-emitting diode (LED) lighting with a more intense and longer wavelength than other forms of lighting. Additionally, light-colored surfaces in urban areas reflect and amplify the effect of artificial lighting further contributing to light pollution.

Overall, the increase in light pollution can have several associated direct and indirect adverse effects including plant life damage, interference with animals' migration patterns, and disruption of the natural sleep cycle, among others currently being studied. It is important for individuals and communities to be aware of the potential impacts of light pollution and to take steps to reduce it where possible. Besides these environmental and health impacts, light pollution wastes energy and resources. Excessive lighting is often used unnecessarily resulting in increased energy consumption and greenhouse gas emissions. Given the interest in light pollution and the dark side of light worldwide in recent years (Hölker *et al.*, 2010), strategies have been developed to characterize the levels of light pollution and diagnose the situation in various sites of the world relying mainly on satellite imagery (Sánchez-de Miguel *et al.*, 2021). Photographs of the planet taken by satellites are extensively being used to explore and study various Earth features including land and water bodies, vegetation, and human-made structures such as cities and infrastructure. A very recent study pointed out that the problem of light pollution could be worse than it seemed from the astronomical point of view highlighting the possibility of losing in a few years the visibility of stars (Kyba *et al.*, 2023). The study relied on citizen scientists' observations of naked-eye stellar visibility and estimated an increase in sky brightness of 7% to 10% per year in the human visible band. The incidence of light pollution in Colombia has been barely studied but it is an increasing topic of interest considering the impact that it may have on astronomy and astrotourism (Brieva, 1985; Pinzón *et al.*, 2016), biodiversity and sustainability (Altamar-Consuegra *et al.*, 2020).

Here we used satellite imagery to measure light pollution emphasizing the need to consider it a new form of pollution that must be considered as newly illuminated areas appear in previously dark places and blue emission peaks from LED lights occur. Furthermore, we include a qualitative analysis of the relationship between the increase in light pollution and other variables such as population and gross domestic product (GDP).

Methods

Study areas

We focused on the main Colombian cities: Bogotá, Medellín, Cartagena, Cali, Barranquilla, and Bucaramanga, using the irradiance map from 2012 (**Figure 1**) to explore the evolution of artificial light in the last decade in urban centers and surrounding areas. We evaluated the most affected areas and the changes in emitted radiance taking a 0.1-degree window around the rectangle enclosing each area to identify the growth around the cities and the convergence with more rural areas.

Satellite data

Our main source of data was monthly and annual Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) images of nighttime light. The VIIRS, VNP46A3, and VNP46A4 data products are global, gridded data products containing the means and standard deviations of radiance values measured at different angles (**Kyba *et al.*, 2015**) and collected by a sensor in the Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP) satellite used to monitor and



Figure 1. Irradiance image acquired with VIIRS in 2012 overplotted on the map of Colombia. The main urban centers analyzed in this study are labeled in white color.

track various environmental parameters such as land cover, vegetation, snow and ice cover, atmospheric aerosols, among others. The data is subjected to a series of preprocessing steps: radiometric and geometric corrections, atmospheric correction, cloud masking, and data formatting to make it more accurate and valuable. The product shows a group of bands where the Moon illumination has been removed and only retains the measurements produced by artificial lights that are of interest for this work (Wang *et al.*, 2022). Here we used the all-angle composite snow-free band whose sensor's spatial resolution ranges from 750 to 375 meters. The VNP46A3 data product reports radiance values in $nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$. We obtained data from January 2012 to December 2022 framing the latitude (0° to 20°) and longitude (-80° to -70°) region. **Figure 2** shows an example of Bogotá's radiance maps from June 2012 and 2022 using the color convention of the Bortle scale (Bortle, 2001) (see also **figure 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>).

Data extraction

As we mentioned, our objective was to investigate the night light emitted by the main Colombian cities. We obtained shapefiles from the *Centros poblados y cabeceras municipales de Colombia* (Populated centers and municipal capitals in Colombia) dataset at the official website of the Colombian National Geographic Institute (*Instituto Geografico Agustin Codazzi*, IGAC). These shapefiles contain geographic information including a set of points that represent population centers and polygons with the boundaries of administrative divisions (cities and municipalities). Using these polygons, population centers within the cities were detected from VIIRS images to analyze the radiance by extracting mean radiance values and creating difference maps in the urban areas. An example of the resulting data and analysis for Bogotá is shown in **figure 3a-c**.

Light pollution trends in urban areas

The study of radiance emitted by a city can be complex, as some areas may have higher emission rates than others due to the type and form of public lighting or the presence of parks, sporadic massive events, and commercial areas, among others. To examine the cities' overall emissions over the past decade, we determined a representative value for each month by computing the average radiance emitted by all the urban centers in the analyzed cities after excluding null data found in the images. Furthermore, we removed any

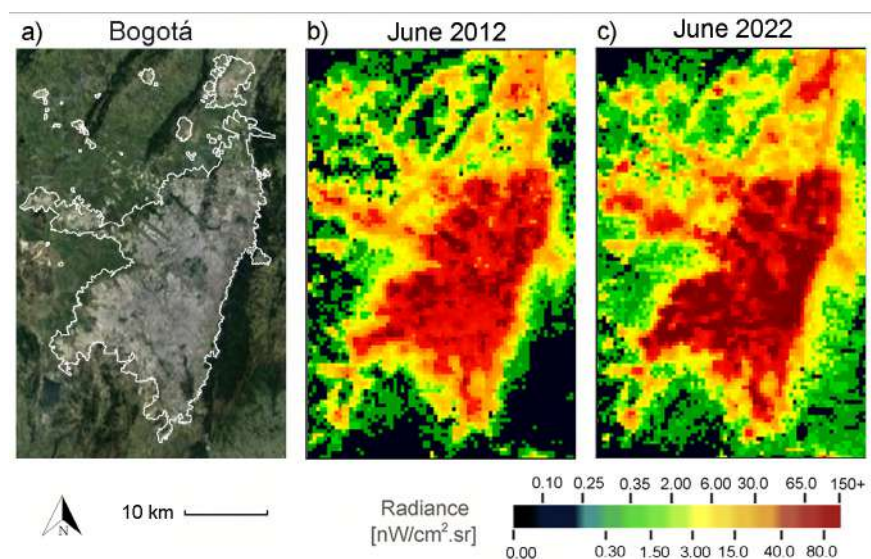


Figure 2. Comparative maps of light measured in Bogotá (a) through satellite sensors, obtained in June 2012 (b) and June 2022 (c), as labeled. The white contours delimit the urban areas in the city. North is up.

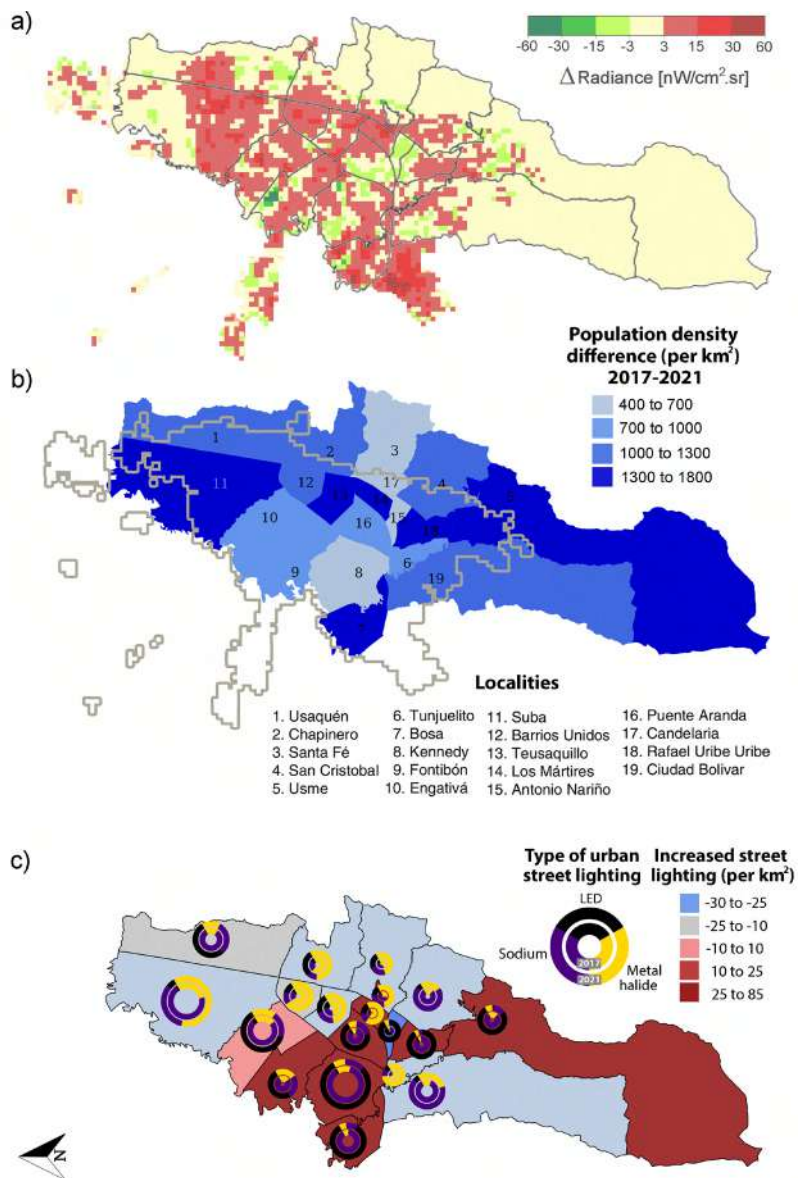


Figure 3. Maps for Bogotá. a. Increments in light emissions from 2017 to 2021 based on satellite imagery overplotted on the map of the city. b. Organization of the 19 urban localities in the city. c. Street lighting growth in localities from 2017 to 2021. The gray contour in the middle panel represents the limits of the urban areas in the city. North is to the left.

outliers through interquartile range analysis to ensure data accuracy. The monthly images enabled us to assess the fluctuations in radiance levels during each month over the years. Therefore, we computed the mean radiance value for every quarter from 2012 to 2022. **Figure 4** shows the plot for Bogotá with color stripes and dots representing the different time periods: January-March, April-June, July-September, and October-December (**Figure 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>). The plots of the other cities are shown in the analysis and the supplementary material (**Figures 3S-8S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>).

For the spatial comparative analysis not dependent on the month selected to compare areas of significant increase in cities, we obtained annual images and compared them by taking the difference between the years of interest (**Figure 3a**) for Bogotá between 2017

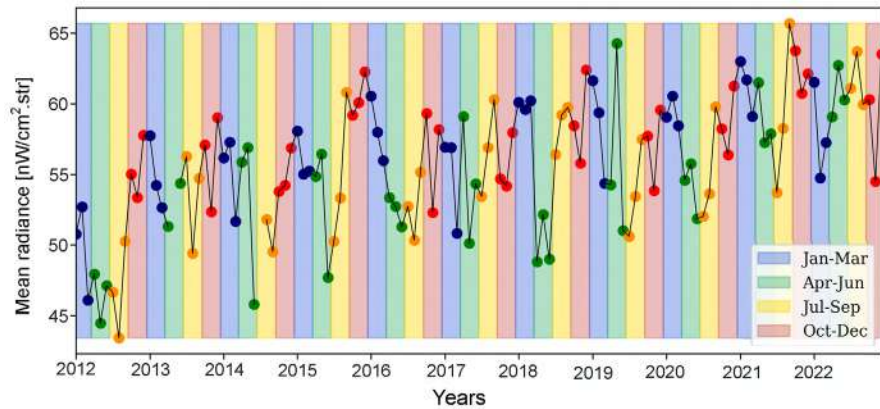


Figure 4. Average monthly light emissions in Bogotá for the decade 2012-2022. Color stripes represent the different quarters for every year, as labeled. The colors of the points correspond to the quarter to which they belong.

and 2021. To visualize and quantify the change in the emitted light, we reported a radiance difference image for each city under study, as will be described in the results. Such maps are particularly useful since they allow the spatial identification of those specific city areas where light emission increases or decreases.

Estimation of transition to LED lighting effects in public luminaries

One of the difficulties we found in the study of light pollution using the VIIRS sensor is that its spectral response is between 480 and 900 nm. Although this range allowed us to study the emission of traditional lights, it left out an emission peak of white LED lights with a wavelength of around 460 nm (Basu *et al.*, 2013). Consequently, most of the values are underestimated. A partial solution to this was to study the increase of LED lights in Bogotá using the correction proposed in a previous study (Sánchez-de Miguel *et al.*, 2021).

To correct the radiance measured for the increase in LEDs’ blue light emission, we analyzed available data about public lighting in Bogotá. Figure 5a shows the increase in the number of LED lights from 2017 (when the transition to LED lights began in Bogotá) to 2021 (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos-UAESP, 2022). This allowed us to establish the increase in the number of installed luminaires and the progress of transitioning from traditional technologies, such as high-pressure sodium lamps (HPS) and metal halide lamps, to energy-efficient LED technology. To standardize the comparison of the number of lights across different localities, we calculated the density of lights by dividing the total number of each type of lamp by the area of urban centers in each locality. The unit of measurement was lamps.km⁻².

For the correction, we calculated the percentage of LED lights in the total number of public luminaires (p_{LED}). Since it was not possible to distinguish in the radiance measured by the sensor the percentage of light coming from streetlights and other sources such as houses or cars, we assumed the case where all the measured light came from luminaires and used it as an upper bound for LEDs’ effect. The correction was then made by multiplying the percentage of emitted radiance corresponding to LED lights by an increase factor (f) between 1.1 and 1.5 depending on the type of LED:

$$R_{corrected} = R(1 + p_{LED}(f - 1)) \quad (1).$$

For blue light low levels, we used a correlated color temperature (CCT) of 2000 K, and for medium levels (the maximum suggested for LED technology lights), we used a CCT value of 3000 K. With these assumptions for CCT values, the corresponding f values were 1.1 in the case of the 2000 K flux and 1.25 for the 3000 K flux (Sánchez-de Miguel *et al.*, 2021).

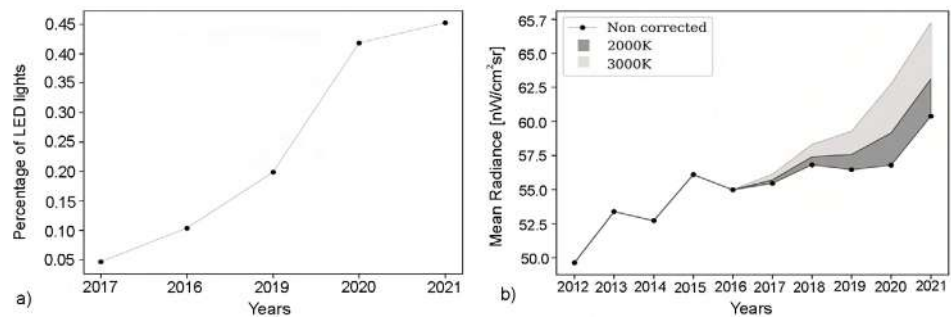


Figure 5. a. Percentage of LED lights replaced in Bogotá's public lighting system. **b.** Average annual light emission from 2012 to 2021. The corrections to be made considering the change to LED light in public luminaries and the type of LED light are shown in gray tones.

Delineating illuminated areas and analyzing urban expansion

The above procedures were designed to extract results for the urban area of each city, i.e., the area delimited by the contours shown in **figure 6**. However, city expansion processes result in newly illuminated areas in the vicinity of the urban centers contributing to the impact of artificial lighting in the context of this study. To study this process, we extracted a fraction of the VIIRS image equal to the smallest square enclosing the urban area of the city and then added 0.1 degrees to each side to obtain a zone that allowed us to study the growth of the cities. Next, we applied thresholding to separate what we considered illuminated zones. The threshold value used was $3.0 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, which corresponds to the beginning of the transition from a rural to a suburban sky on the Bortle scale (Bortle, 2001), and served to categorize an area as illuminated in our analysis. After separating the zones, we calculate the closed contours of the illuminated areas and the difference between the total illuminated areas in 2022 and 2012. The corresponding contours are plotted in **figure 6** and the difference of areas is listed in **table 1**.

Exploring the relationship between economic growth and light pollution in Bogotá

Recent studies have compared the relationship between the nighttime light index and various social indicators in China and India concluding that the integral indicator GDP has a good linear correlation with radiance when regression is performed in administrative regions (Han *et al.*, 2022). However, in previous studies, the data from light pollution remote sensors were combined with economic information from the World Bank to estimate fractional logistic regression models of light pollution. The results indicated that population and GDP per capita were key factors in determining light pollution levels in a country. Besides, it has been established that the relationship between income and light pollution is non-linear and that other economic factors such as foreign investment and land use patterns are also relevant (Galloway, 2010).

Here we aimed to analyze the relationship between Bogotá's GDP and the radiance emitted by the city as a first approach to this type of study in Colombia. To this end, we obtained annual GDP data by departments from the National Statistics Administrative Department (*Departamento Administrativo Nacional de Estadística*, DANE) and the percentage variation by quarters in Bogotá, especially from 2019 to the present to include the COVID-19 pandemic. However, the GDP data for the 2022 fourth quarter was not available at the time of our study, so we assumed that the average growth of the first three quarters of the year would serve for the fourth quarter. We acknowledged that more advanced statistical techniques, such as economic models or time series, could provide more accurate projections. However, our goal was to have a rough estimate of the GDP growth for 2022, and anyway, projections are only approximations that may differ significantly from actual values. After estimating the GDP, values were plotted against the

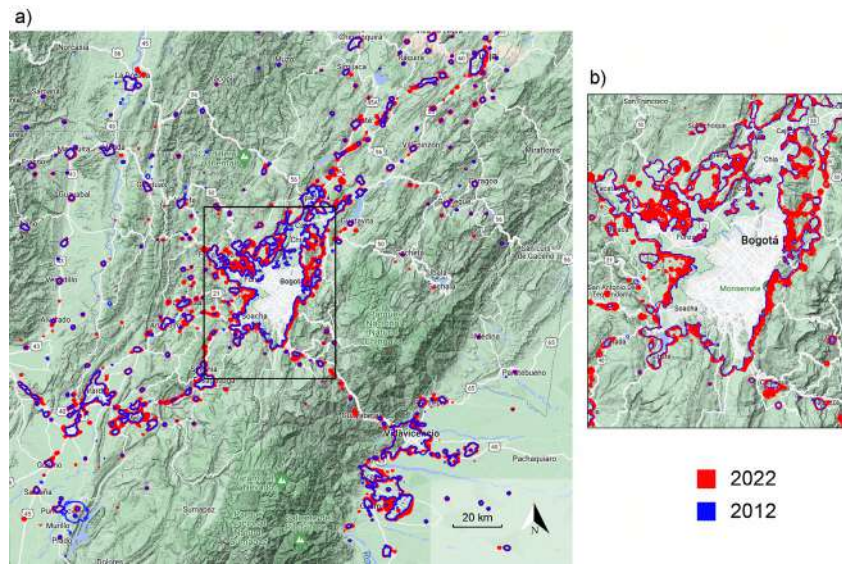


Figure 6. Shaded relief maps of the Savanna of Bogotá (a) and Bogotá city (b). The blue contours delimit the coverage of illuminated areas according to the mean radiance for 2012. The red contours/areas correspond to the extension of the illuminated land over a decade ending in 2022.

Table 1. Data comparison for 2012 - 2022 in all cities under analysis

City	Δ Population density (people/km ²)	Radiance growth rate (%/year)	Δ Illuminated area (km ²)
Bogotá	1677.74	1.73	392
Medellín	1898.59	-1.85	190
Cali	627.54	-1.37	192
Bucaramanga	779.97	-2.26	85
Barranquilla	1008.80	0.56	178
Cartagena	1142.28	1.29	147

emitted radiance in Bogotá for each year as shown in **figure 7a**. We proposed a relationship between the variables based on their apparent behavior that will be commented on in the following section.

Results and discussion

We present first the diagnosis of the city of Bogotá and then that of the rest of the cities under study (**Figure 8a-f**). In the case of Bogotá, we delved into more relevant aspects with readily accessible information, e.g., public lighting and population density variation, as a guide for other large urban centers in Colombia.

The case of Bogotá

In the following subsections, we focused on the description of the case of Bogotá where we used additional information to extract results. **Figure 4** provides an overview of the lighting in Bogotá on a monthly temporal scale visualized by color per quarter. At first glance, it is evident that there has been an increasing trend in light pollution in the city characterized by seasonal oscillations during specific periods of the year. The plot shows, for instance, that in five of the 11 years considered, the maximum yearly radiance value occurred in December from where a relationship with the Christmas season can be inferred.

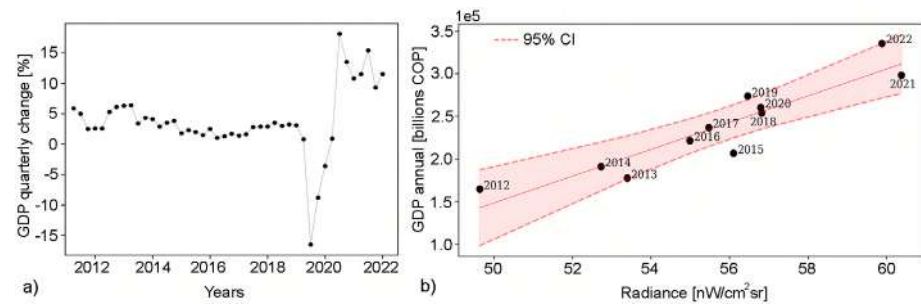


Figure 7. a. Growth rates of Bogotá's GDP compared to the same quarter of the previous year, 2012-1/2022-4. The value of the last quarter of 2022 was assumed, so it may present a significant variation from the value reported by DANE. **b.** Annual Bogotá's GDP as a function of the radiance emitted in the city in the same year. The red line shows the linear fit of the data with the respective confidence intervals.

Two of the other peaks (2014 and 2016) occurred in January following two December peaks, probably as a residual effect of Christmas. Although it would be expected, this behavior was not repeated in all cities. A similar plot for Cali (**Figure 5S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>) showed that the peaks in nine of the 11 years occurred from July to September. In general, the annual cycles in each city were different but consistent on an annual scale. This means that about 15% of the possible light sources were variable, as evidenced by the annual oscillations of $\sim 10 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ in Bogotá. Regarding the growing trend, the annual value was calculated as the average of the year's 12 months (**Figure 9**). After fitting a linear model based on the observations of the figure, the radiance growth rate per year was calculated (**Table 1**). In Bogotá, the night radiance increased by 1.73% each year since 2012. Results for other cities are presented in the same table.

From a spatial point of view, **figure 8a-f** shows difference maps for Bogotá and the other cities quantifying the change in the radiance emitted from 2012 to 2022. For Bogotá, the map evidenced that light emissions have increased to worrying levels (shown in red) in almost all sectors except for tiny areas including city parks such as the Simón Bolívar Park, the area around the international airport, and few others. In the following subsection, we present the results of a more in-depth analysis of Bogotá considering the changes in the last five years (2017-2021).

Lighting installation and population data overview for Bogotá

The 2017 and 2021 radiance maps were used to calculate the difference in the radiance emitted over the years including data from light fixtures in Bogotá (**Figure 3a**) with values ranging from -60 to $60 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$. Our approach leveraged the power of satellite resolution to conduct studies on smaller scales. By using this methodology, we gain a more comprehensive understanding of how light pollution was influenced by factors such as public lighting and population growth in each locality.

The map of the radiance differences was overlaid on a map with the different localities of Bogotá. **Figure 3b** shows the population density difference between 2017 and 2021. The gray contour represents the urbanized areas of the city, i.e., those with the highest construction density according to the definition by the local government. The zones outside the gray limits include non-urban areas, agricultural areas, or environmentally protected lands. The main population of a locality is concentrated between the limits of the localities and the urbanized area (gray contours).

Between 2017 and 2021, Teusaquillo, Suba, and Bosa localities had the largest increase in population density accompanied by an increase in emitted radiance levels averaging over $4.5 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ and reaching $8.5 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$. Los Mártires locality had the highest

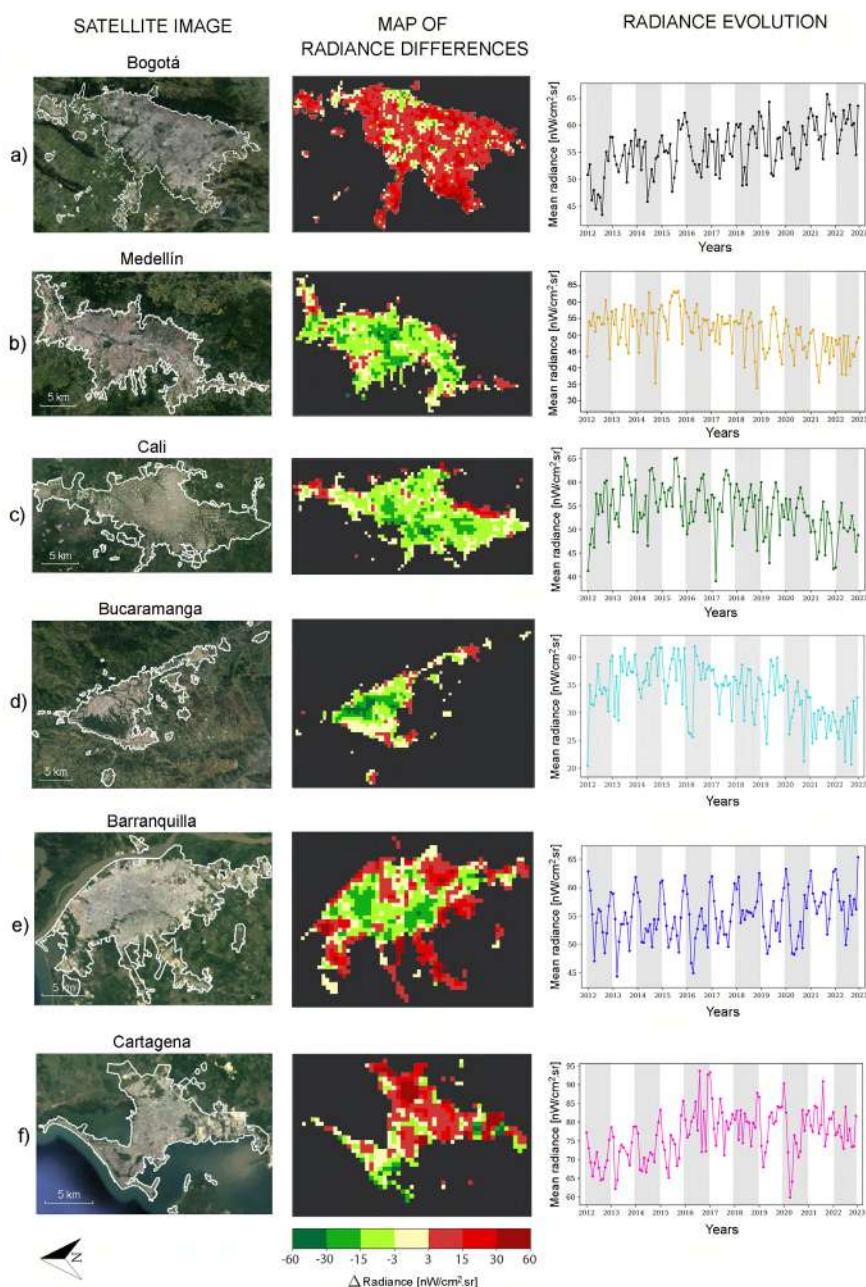


Figure 8. Evolution of the annual mean radiance in main urban Colombian centers for the years 2012 and 2022. Each row shows the results for Bogotá (a), Medellín (b), Cali (c), Bucaramanga (d), Barranquilla (e), and Cartagena (f). The left column shows the corresponding satellite image. The middle column shows maps resulting from the radiance difference in the last decade. The plots in the right column correspond to the evolution of the corresponding mean radiance value year after year during the interval analyzed with the corresponding uncertainty bars for each value. The contours superimposed on the satellite images correspond to the delimitation of the urban area in each city as established by the current classification.

population density increase with 1585 people/km² and an emitted radiance of 12.46 nW.cm⁻².sr⁻¹ followed by Soacha, a neighboring municipality almost attached to Bogotá, with 12.72 nW.cm⁻².sr⁻¹; Soacha also showed the most significant increase in population density with 5242 people/km². On the other hand, the locality of Antonio Nariño showed

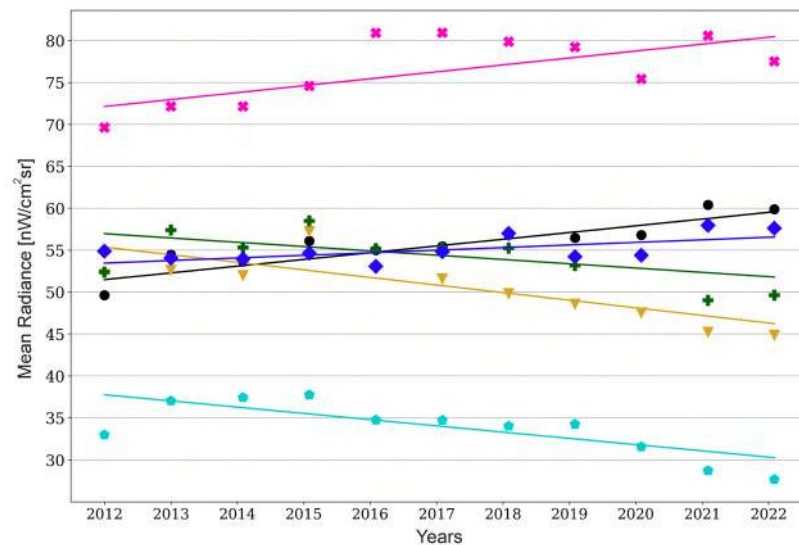


Figure 9. Evolution of the the annual mean radiance over a decade for the five cities analyzed in this work: Bogotá (●), Medellín (▼), Cali (+), Bucaramanga (◆), Barranquilla (◆), and Cartagena (×). The solid lines are the result of linear fits applied over the data in every case.

the most significant decrease in emitted radiance with a decrease of $4.93 \text{ nW.cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ and the lowest increase in population density with 588 people/km^2 , only below La Candelaria locality with a decrease in the emitted radiance of $2.95 \text{ nW.cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$.

However, it cannot be categorically stated that the increase in population density is the main cause of light pollution increases in Bogotá. There are localities, e.g., Rafael Uribe and Usme, with significant increases in population density (over 1600 people/km^2) but reductions in the radiance emitted. Similarly, some localities had low rates of population density increase, e.g., Santa Fé, but high levels of radiance emitted with $5.89 \text{ nW.cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. In future studies, therefore, we propose to consider other factors before determining with certainty the reason behind the increase in light pollution in Bogotá.

Here we analyzed the available data on public lighting in Bogotá focusing on the number of metallic halogen, LED, and sodium lamps. km^{-2} in each locality as shown in **figure 3c**. Bogotá's localities started transitioning from sodium lamps to LED or metallic halogen lamps and six out of eight experiencing decreases in the average radiance as compared to 2017 have completed or nearly completed the transition to LED lamps. La Candelaria started a mixed transition that included replacements with metallic halogen lamps. Ciudad Bolívar changed almost entirely to metallic halogen lamps and experienced a reduction in the total number of lamps. km^{-2} . Suba started its transition to metallic halogen lamps and experienced a positive difference in radiance. Out of the nine localities that changed to LED, replaced more than $200 \text{ lamps.km}^{-2}$, and removed at least $200 \text{ sodium lamps.km}^{-2}$, three registered higher radiance values compared to 2017. Localities with a higher number of LED lamps. km^{-2} , such as La Candelaria and Santa Fé, generally emit higher radiance per unit area. Of the eight localities that as of 2021 had metallic halogens in at least 50% of their public lighting, five emitted radiances above $70 \text{ nW.cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. Of the nine localities where LED lamps were installed in at least 50% of their public lighting, four exceeded the $70 \text{ nW.cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ threshold. The two localities where sodium lamps represented more than 50% of their public lighting emitted radiance not exceeding $50 \text{ nW.cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$.

Based on these data, it is possible to create a better model of how the type of lighting installed in each locality influences radiance, but this goes beyond the scope of this study. In summary, the data from the public lighting study in Bogotá revealed that the transition from sodium to LED or metallic halogen lamps has impacted the radiance emitted. The

number and type of lamps installed also affect light pollution. However other factors such as lamp installation and other sources of lighting, e.g., building lighting and nighttime traffic, should be considered for a more precise assessment of light pollution in the city. It should also be noted that the radiance emitted by public lighting does not represent the total light pollution, which varies depending on the season and human activities.

Pros and cons of LED implementation in Bogotá's public lighting

Despite representing a revolution worldwide and in Bogotá's public lighting since 2017, the low energy consumption resulting from the implementation of white LED light does not imply a reduction in light pollution. Its implementation in shopping malls, warehouses, sports centers, etc., may generate well-being, comfort, and security in some environments of the main cities studied, but its use should be regulated to control the impact of light pollution and its negative implications compared to other types of luminaries like high-pressure sodium and low-pressure or amber LED. It is evident that LED unrestricted use prevails (**Figure 5a**), as evidenced by the increase in light pollution resulting in little benefit to humans and the environment.

In the case of Bogotá, we found that the installation of LED lights added uncertainty to light pollution values. In 2020, for example, apparently, pollution did not increase compared to 2019, but it is plausible that the actual increase was hidden by the installation of new lights. Therefore, the rate of light pollution increases in Bogotá, reported in **table 1** as 1.73%/year, could actually lie between this value and 2.33%/year for 2000 K lights and 3.22%/year for 3000 K lights. These rates would represent more harmful pollution levels for all the processes that are affected by the increase of night lights, as we comment on in our study conclusions. For these reasons, we recommend reassessing the installation sites of these lights and determining their positive and negative effects.

The intersection of light and migration: the changing landscape of Bogotá

In **figure 6**, the area covered by emitted radiance in Bogotá appears highlighted. We set a threshold value of 3 to mark the transition to the suburban sky in the Bortle scale (**Bortle, 2001**), and compared the years 2012 and 2022. In the plot, the contour of the areas is represented in blue for the year 2012 and in red for the year 2022. The areas that did not reach the threshold value in 2012 but exceeded it in 2022 are marked in red. It is evident that there has been a significant increase in the periphery of Bogotá, especially on its eastern border where the area affected by light pollution is expanding towards the hills threatening the environmental protection zone there. New neighborhoods in this area have grown with no regulation. The increase in light pollution there has serious consequences on the environment. Besides, artificial light can interfere with the activity and migration patterns of animals. This increase in radiance is also evident in Bogotá's connections to the surrounding towns of Mosquera and Madrid and the city's exit towards the west, probably due to the increasing presence of industries in a traditionally agricultural area.

On the other hand, Bogotá's growing population rates have led to its inhabitants' displacement to surrounding locations with better accessibility to housing and lower cost of living. Such displacement is triggered by the arrival of people with a higher purchasing power, which forces the original inhabitants to seek cheaper housing and public services. However, Bogotá's neighboring municipalities are not adequately prepared for population increases that exacerbate mobility, housing, and public services problems (**Herrera, 2015**). Naturally, this also extends the area affected by light pollution in the savannah of Bogotá. A study analyzing migration dynamics in Bogotá's surrounding municipalities using birth, death, population, and migration to and from rates (**Secretaría Distrital de Planeación, Subsecretaría de Información y Estudios Estratégicos, Dirección de Estudios Macro, 2005**) concluded that this migration dynamics will continue until 2050 with an increase in their size and, therefore, in the levels of radiance emitted in areas critical for bird migration. In this sense, we think new studies should focus on understanding how species in the savannah of Bogotá are affected now and in the years to come.

Assessing the correlation between city GDP and radiance emissions in Bogotá

We also analyzed the relationship between light pollution, other relevant variables such as population and economic activity, emitted radiance, and GDP. We found a linear correlation (**Figure 7b**) with a Pearson correlation coefficient of 0.92 and most of the data was within the confidence interval. Notably, in 2019, GDP decreased in some countries and cities, including Bogotá with a 15% reduction. Given the direct correlation with the emitted radiance, this also decreased. **Figure 5b** shows that the radiance emitted in Bogotá remained roughly constant through 2018, 2019 to 2020. However, in 2021, a radical increase in radiance was observed maybe due to the end of the COVID-19 pandemic. To examine the correlation between GDP growth and light pollution, we suggest a comprehensive analysis of economic activity types and land use patterns to determine which sectors and activities contribute the most to the city's light emission increase and be better equipped to make informed decisions and take effective measures to reduce light pollution.

Comparing light pollution across major urban centers in Colombia

The results for all the cities under study (**Figure 8**) include the annual main radiance during 2012 compared to that of 2022. **Figure 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>, shows the annual radiance map for each city; the left column displays the satellite optical image of every city with white contours outlining the urban delimitation; the middle column shows the map of radiance differences in cities' urban areas, which ranged from -60 to 60 nW.cm⁻².sr⁻¹ (color bar), and the right column shows the plots with the evolution of quarterly radiance values over the years.

The radiance differences graph enabled us to determine spatially where the sources of increased pollution were located in each city. **Figure 9** shows the evolution of the annual mean radiance over the 2012-2022 decade in all the Colombian cities under study. A significant decrease in the radiance emitted was observed in Medellín, Cali, and Bucaramanga but the radiance did increase in some areas. In Medellín, these areas were especially the connections between the urban center and the surrounding municipalities. The plot of radiance evolution (in yellow in the Figure) shows a constant decrease in radiance since 2015. In the supplementary **figure 4S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>, for Medellín, radiance levels did not follow a defined pattern, although, the highest indices were usually registered from July to September and the lowest from October to December.

In Cali, the highest levels of radiance were found in the connection to Yumbo in the southeast. The green plot shows a clear decrease year after year with a negative change rate. In **figure 5S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>, it is evident that the brightest months were from July to September.

As for Bucaramanga, the area connecting to Floridablanca and Piedecuesta showed an increase but, in general, radiance decreased in the main urban area. In the cyan plot, Bucaramanga had the best radiance emission indices and the highest improvement rate (**Figure 6S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>).

In its turn, Barranquilla registered an increase in radiance levels with the highest recorded at the city's exits towards the surrounding municipalities and the area bordering the Magdalena River and its coastal areas. An increase was also observed in the center of the city and in the connection to the municipality of Soledad. The dark blue plot shows an increasing rate of 0.56 units of radiance per year that, although apparently small, is significant if compared to the radiance levels of Bogotá, as the increase in the capital's population density was considerably higher. The months with the highest brightness values were November and February (**Figure 7S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>).

Cartagena registered the highest emitted radiance levels in this study. This accelerated increase may be mainly due to tourism and the fact that it is one of the main ports in the country. Radiance levels increased at a rate of 1.29 units per year, only behind Bogotá. The

radiance peaks occurred from November to February (**Figure 8S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>). Measuring light pollution in Cartagena is important given its coastal location, with negative effects such as the disruption of marine organisms' behavior and feeding patterns and the destabilization of the structure and functions of the ecosystem (**Tamir et al.**, 2017). It is important, then, to understand the magnitude of the problem there and take measures to minimize its negative impacts.

Brightest nights: maximum radiance maps for the five cities

To complement the annual averages analyzed so far and illustrate the phenomenon at the monthly level, we computed the worst monthly average of the previous year to identify the highest lighting levels reached, i.e., the worst light pollution scenario to collect inputs to establish the implications of expanded illuminated areas around the main urban cores. **Figures 3S to 8S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>, show these maximum radiance maps for the five cities analyzed here. The maps are superimposed on relief maps with the main names of neighboring towns. In all cases, there is evidence of the extended zones around the demarcation of the urban areas with the maximum radiance (red and yellow areas). Most of the yellow zones correspond to rural lands around the main cities and those close to parks and environmentally protected territories. The maps also reflect the increasing connections between nearby towns and major cities.

Adverse impacts of light pollution and its importance as a measure of sustainability

The protection of the environment from artificial light, or light pollution, is important for various well-documented reasons and its adverse impacts on the following aspects: Biodiversity: Light pollution can disrupt the natural behavior of animals, e.g., birds' migration patterns, and the pollination of plants with negative impacts on biodiversity and ecosystem balance.

Human health: Excessive or inappropriate lighting can disrupt sleep patterns with negative impacts on human health. It can also cause glare, which can be harmful to drivers and pedestrians.

Energy consumption: The use of artificial light consumes energy and resources, which contribute to greenhouse gas emissions and climate change. Reducing light pollution can help conserve energy and reduce the carbon footprint.

Aesthetics: Light pollution can also be negative for the aesthetic and cultural value of the night sky, making it difficult to see the stars and other celestial objects. In indigenous cultures, the stars were used to tell stories and pass down cultural beliefs. The Southern Cross, for example, is an important symbol for many indigenous cultures in the southern hemisphere.

Astronomy: Light pollution can interfere with astronomical observations, making it difficult for astronomers to study the stars and other celestial objects.

Light pollution can be used as a measure of sustainability because it is a proxy for other forms of environmental degradation such as energy consumption, waste, and habitat destruction, and an indicator of the use of energy-efficient and sustainable lighting practices in a community. Reducing light pollution levels can contribute to promoting biodiversity, protecting wildlife, and improving the quality of life in a community. A community with high levels of light pollution is likely to have a high consumption of energy contributing to climate change and low investment in energy-efficient lighting. On the other hand, a community that takes steps to minimize light pollution, such as using shielded lights or turning off lights when they are not needed, is likely to be more energy-efficient and sustainable.

The main Colombian cities have experienced significant growth in the last decade driven by several factors. Colombia has experienced steady economic growth in recent years with a GDP increase of 4% per year on average between 2010 and 2020. This has

contributed to the development and expansion of large cities with growing business and industry investments. Like many other cities around the world, the largest Colombian cities experienced a trend of urbanization with more people moving from rural areas in search of job opportunities and a better quality of life. This has led to population growth in Bogotá, Medellín, Cali, Bucaramanga, and Cartagena with the corresponding increase in the demand for housing, infrastructure, and other urban services. These cities' local governments have invested in the development of roads, public transportation, and utilities, which, in their turn, has helped to support the growth of the cities. In recent years, these cities have also attracted foreign investment with companies and investors recognizing the potential for growth and development resulting in more international businesses operating in the main cities.

Conclusions

Motivated by the lack of research on light pollution in Colombia, our study made the first diagnosis of the situation. Briefly summarized, our results point to the expansion of illuminated areas in all main urban centers in the country with Cali, Medellín, and Bucaramanga as the three cities that have better controlled the levels of mean radiance over the years for reasons that should be further analyzed in future studies.

It is important to note that satellites can detect the light emitted upwards, however, they cannot accurately measure all wavelengths generated by LED lighting or horizontally radiated light, which means that the actual level of light pollution from the ground can increment significantly.

Here we were able to estimate the uncertainty caused by the presence of LED lights in Bogotá. In the worst case, when the light has a color temperature of 3000 K, and under the assumption that all the light emitted comes from public luminaires, the growth would be 3.22%, nearly doubling the values reported. A less pessimistic picture, assuming color temperatures of 2000 K, gave us a 2.33% per year growth. On the other hand, the recent estimation of the levels of sky brightness from ground observations ranged from 7 to 10% per year in the human visible band (*Kyba et al.*, 2023). Since it is not possible to estimate the effect of horizontal irradiance from satellite images, the growth in pollution for ground-based observations in cities like Bogotá could still be in this order of magnitude. Nevertheless, proper in-situ measurements should be done to confirm this fact.

As for the other cities, even those showing decreasing levels of mean radiance in the last decade, the actual situation of sky brightness may also be higher measured from the ground which calls for further studies.

Our analysis of Bogotá's localities showed that the increase in population density does not have a direct relationship with the increase in light pollution and there seems to be no relationship either between density (**Table 1**) and pollution values (**Figure 9**). This suggests that the individual activity of people is not the leading cause of increased damage to the night sky. On the other hand, the correlation between nighttime radiance and GDP growth in Bogotá suggests that lighting linked to the production of goods and services, such as in industrial zones, new significant buildings, and road corridors, could be responsible for the problem in this city.

However, the case of Medellín shows that it is possible not only to maintain but even reduce pollution levels with a growing GDP and population density. This is an incentive to conduct studies to outline the practices and behaviors in the installation of lighting there.

Finally, to address the problem of light pollution it is important to raise public awareness on its negative effects and promote more sustainable practices like the use of low-intensity LED lights and the downward orientation of exterior lights. It is also crucial to limit the amount of artificial light in protected natural areas and encourage the adoption of more efficient technologies in terms of energy and light quality. Future studies should quantify more precisely the impact of artificial high-radiance levels on Colombian

ecosystems, biodiversity, and human health, among others, and send a message to stop the brightening of the night to our children but especially to national authorities and decision-makers in the country.

Supplementary material

See de supplementary material in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1867/3366>

Acknowledgments

To the anonymous referee for the comments which improved the presentation of the results; to the Beyond Research project (Faculty of Sciences, *Universidad Nacional de Colombia*).

Contribution of the authors

KJRE and AFGG: data search and selection, image processing, analysis of the data, and writing of the manuscript. SVD: bibliographic search, image processing, analysis of the data and results, analysis of the results, and writing of the manuscript. MVT, CGT: analysis of the results.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Altamar-Consuegra, A. del S., Meneses-Velosa, S. L., Arias, C., Vallejo-Moreno, G., Herrera-Ladino, D.A., Herrera-Ladino, I.A., Mercado-Suárez, Á.L., Medina-Vargas, M.R., Giraldo-Arcila, S.V., Góez-Therán, C., Vargas-Domínguez, S., Echeverri-Gutiérrez, P.A., Valencia-Salazar, J.D., Aristizábal-Torres, D., Gutiérrez, A.S., Barrera-Rodríguez, A.M., Ramírez-Castañeda, L.N., Obregón-Neira, N., González-Angarita, G.P., ..., Giraldo-Castro, N. (2020). *Desarrollo sostenible: casos y aplicaciones en el contexto colombiano*. <http://hdl.handle.net/10882/12237>
- Bará, S., Bao-Varela, C., Falchi, F. (2022). Light pollution and the concentration of anthropogenic photons in the terrestrial atmosphere. arXiv e-prints, arXiv:2210.14131.
- Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M., Roth, B. (2013). Lighting with laser diodes. *Advanced Optical Technologies*, 2(4), 313-321. <https://doi.org/10.1515/aot-2013-0031>
- Bortle, J. E. (2001). Introducing the Bortle Dark-Sky Scale. *Sky and Telescope*, 101(2), 126.
- Brieva, E. (1985, March). Search for a Site for an Astrophysical Station in Colombia - Preliminary Results. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 10(1), 397.
- Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C. D. (2001). The first World Atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328(3), 689-707.
- De Servicios Públicos, U. A. E. (2022). Alumbrado público, Bogotá D.C. Retrieved from <https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/>
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C.C.M., Elvidge, C.D., Baugh, K., Portnov, B.A., Rybnikova, N.A., Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), e1600377-e1600377
- Falchi, F., Ramos, F., Bará, S., Sanhueza, P., Jaque Arancibia, M., Damke, G., Cinzano, P. (2022). Light pollution indicators for all the major astronomical observatories. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519(1), 26-33.
- Gallaway, T., Olsen, R. N., Mitchell, D. M. (2010). The economics of global light pollution. *Ecological economics*, 69(3), 658-665.
- Góez-Therán, C., Vargas-Domínguez, S. (2021). Comparative Analysis of Sky Quality and Meteorological Variables During the Total Lunar Eclipse on 14-15 April 2014 and their Effect on Qualitative Measurements of the Bortle Scale. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 57(1), 57-66.
- Han, G., Zhou, T., Sun, Y., Zhu, S. (2022). The relationship between night-time light and socio-economic factors in China and India. *PLOS ONE*, 17(1), 1-22.

- Herrera, O.J.M.** (2015). El proceso de urbanización en los municipios de la sabana de Bogotá. *Ánfora: Revista Científica de la Universidad Autónoma de Manizales*, 22(38), 85-111.
- Hölker, F., Moss, T., Griefahn, B., Kloas, W., Voigt, C.C., Henckel, D., Hänel, A., Kappeler, P.M., Völker, S., Schwope, A., Franke, S., Uhrlandt, D., Fischer, J., Klenke, R., Wolter, C., Tockner, K.** (2010). The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecology and Society*, 15(4), 13. URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art13/>
- Kyba, C.C.M., Hölker, F.** (2013). Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes? *Landscape Ecology*, 28(1), 1637-1640.
- Kyba, C.C.M., Garz, S., Kuechly, H., De Miguel, A. S., Zamorano, J., Fischer, J., Hölker, F.** (2015). High-resolution imagery of earth at night: New sources, opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 7(1), 1-23.
- Kyba, C. C. M., Öner Altıntaş, Y., Walker, C. E., Newhouse, M.** (2023). Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science*, 379(6629), 265-268.
- Pinzón, G., González, D., Ramírez, A.** (2016). Análisis comparativo de seis lugares de interés para la ubicación de instrumentación astronómica en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(154), 53-68.
- Stone, T.** (2017). Light pollution: A case study in framing an environmental problem. *Ethics, Policy & Environment*, 20(3), 279-293.
- Sánchez-de Miguel, A., Bennie, J., Rosenfeld, E., Dzurjak, S., Gaston, K. J.** (2021). First estimation of global trends in nocturnal power emissions reveals acceleration of light pollution. *Remote Sensing*, 13(16), 1-12.
- Secretaría Distrital de Planeación, Subsecretaría de Información y Estudios Estratégicos, Dirección de Estudios Macro.** (2005). *Dinámica de los movimientos migratorios entre Bogotá y su área metropolitana, y sus implicaciones en el mercado de vivienda en la región, 2005-2050*. Secretaría Distrital de Planeación.
- Tamir, R., Lerner, A., Haspel, C., Dubinsky, Z., Iluz, D.** (2017). The spectral and spatial distribution of light pollution in the waters of the northern Gulf of Aqaba (Eilat). *Scientific Reports*, 7, 42329, 1-10.
- Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, UAESP.** (2022). *Alumbrado público*, Bogotá, D.C. <https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/70e93f88>
- Wang, Z., Shrestha, R. M., Román, M. O., Kalb, V. L.** (2022). Nasa's black marble multiangle nighttime lights temporal composites. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19(1), 1-5.

Artículo original

Análisis espectroscópico de estrellas enanas y gigantes en los cúmulos abiertos IC 2391 y NGC 6475

Spectroscopic analysis of dwarf and giant stars in the open clusters IC 2391 and NGC 6475

Ángela Catalina Franco-Becerra^{1*}, Orlando J. Katime-Santrich², Nelson Vera-Villamizar¹

¹ Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

² Departamento de Ciencias Exatas, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Bahia, Brasil

Resumen

Los cúmulos abiertos son objetos muy útiles en astrofísica; se han utilizado para estudiar la teoría de la formación y la evolución estelar, así como la estructura de la vía láctea. En ese contexto, se analizaron estrellas enanas y gigantes pertenecientes a los cúmulos abiertos IC 2391 y NGC 6475. Los espectros de alta resolución se obtuvieron de la base de datos ESO/Archive. Para obtener los parámetros atmosféricos (T_{eff} , $\log g$, ϵ , [Fe/H]) y las abundancias químicas, se aplicó la hipótesis del equilibrio termodinámico local (*local thermodynamic equilibrium*, LTE). Nuestros resultados corroboraron el comportamiento de las abundancias químicas en el disco galáctico.

Palabras clave: Cúmulos abiertos; Abundancias químicas.

Abstract

Open clusters are very useful objects in astrophysics; they have been used to study the theory of star formation and evolution and the structure of the Milky Way. We analyzed here dwarf and giant stars belonging to the open clusters IC 2391 and NGC 6475. The high-resolution spectra were obtained from the ESO/Archive database. To calculate the atmospheric parameters (T_{eff} , $\log g$, ϵ , [Fe/H]) and chemical abundances we applied the local thermal equilibrium (LTE) hypothesis. Our results confirmed the behavior of the chemical abundances in the galactic disk.

Keywords: Open clusters; Chemical abundances.

Cúmulos abiertos en astrofísica

Los cúmulos abiertos son piezas fundamentales en el estudio de la astrofísica estelar y galáctica. Los análisis detallados de estos objetos arrojan luz sobre importantes campos de la astronomía y son útiles específicamente en el estudio de la dinámica y estructura de la Vía Láctea y de la formación y la evolución de las estrellas.

En el estudio de la dinámica de la Vía Láctea son fundamentales porque ayudan a comprender el movimiento de los brazos espirales y, en general, de grupos de estrellas en movimiento. A partir de su análisis, se obtiene la curva de rotación galáctica con datos precisos de velocidades radiales (V_r), distancias y edades, que ayudan en la determinación de las órbitas estelares. Su dinámica y composición química se utilizan como criterios de pertenencia de las estrellas a un cúmulo o asociación estelar.

En el examen de la estructura galáctica es importante la hipótesis propuesta por **Beers & Carollo** (2009), en el sentido de que nuestra galaxia, de tipo espiral, posee dos discos, uno fino (*thin disc*) y uno grueso (*thick disc*). Esta hipótesis se comprueba a partir de la evolución química y el comportamiento dinámico de los brazos espirales de nuestra galaxia. La evolución de los elementos químicos se estudia a través de gradientes radiales de metalicidad y abundancias químicas. El gradiente radial consiste en la disminución de

Citación: Franco-Becerra ÁC, Katime-Santrich OJ, Vera-Villamizar N. Análisis espectroscópico de estrellas enanas y gigantes en los cúmulos abiertos IC 2391 y NGC 6475. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):259-269, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1891>

Editor: José Gregorio Portilla Barbosa

***Correspondencia:**

Angela Catalina Franco-Becerra;
angela.franco01@uptc.edu.co

Recibido: 18 de marzo de 2023

Aceptado: 30 de mayo de 2023

Publicado en línea: 20 de junio de 2023



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

las abundancias químicas a medida que aumenta la distancia galactocéntrica (R_{gc}), es decir, la distancia entre el centro de nuestra galaxia y el cuerpo celeste analizado. Los resultados hasta hora reportados han venido corroborando la existencia de los dos discos (**Jacobson et al.**, 2016; **Magrini et al.**, 2017; **Magrini et al.**, 2022).

En el caso de la formación y evolución estelar, los cúmulos abiertos son importantes porque permiten verificar una hipótesis fundamental: la formación de estrellas a partir de la misma nube molecular al mismo tiempo. El cálculo de las abundancias químicas es un instrumento necesario para comprobar esta hipótesis, pues asume que las estrellas dentro de una misma nube molecular deben haber evolucionado de manera similar y, por lo tanto, deben tener parámetros estelares y abundancias también similares. La hipótesis de la evolución simultánea debe considerar situaciones adicionales, como el enriquecimiento por efecto de la transferencia de masa en sistemas binarios, situación en la que es posible encontrar estrellas con abundancias muy diferentes a la media del cúmulo (**Santrich et al.**, 2013).

La observación de los gradientes de metalicidad y de las abundancias y el estudio de la evolución estelar, se han beneficiado de la espectroscopia de alta resolución y, más recientemente, de los grandes catálogos (*surveys*), como el Gaia, de la misión de la Agencia Espacial Europea (ESA), que obtiene la distancia, los movimientos propios y las velocidades radiales con notable precisión, aproximadamente de 10^9 estrellas en nuestra galaxia, y como el APOGEE (*Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment*) y el GALAH (*GaLactic Archaeology with HERMES*), los cuales recopilan datos espectroscópicos de estrellas específicas y de la galaxia en general, utilizando el espectrógrafo HERMES (*High-Efficiency and High-Resolution Mercator Echelle Spectrograph*). Estos catálogos han aumentado de manera significativa el número de espectros estudiados, con resultados estadísticamente relevantes para el estudio de la evolución estelar y el disco galáctico.

Los espectros de las estrellas analizadas en el presente estudio corresponden a objetos en fase de secuencia principal (tres estrellas) y en fase gigante RGB (*red giant branch*) (dos estrellas). Los parámetros atmosféricos y las abundancias químicas se calcularon en las cinco estrellas de la muestra para una mejor comprensión de la teoría de la formación y evolución estelar. Con ese fin, se explica el origen de los espectros de alta resolución utilizados en el análisis, y se presenta el proceso de obtención de cada uno de los parámetros atmosféricos y las abundancias químicas.

Datos observacionales

En astrofísica estelar un análisis espectroscópico se entiende como el estudio detallado de las líneas de absorción o emisión de los diferentes elementos químicos presentes en las atmósferas estelares. Dicho análisis se basa en la medición de las anchuras equivalentes, teniendo en cuenta los parámetros electrónicos de las respectivas transiciones atómicas o moleculares. Los espectros pueden ser de baja o alta resolución dependiendo del número de rejillas de difracción del espectrógrafo del telescopio.

El diagrama de color-magnitud (*colour magnitude diagram*, CMD) es la versión observacional del diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R) en el que se relaciona el color con la magnitud de las estrellas pertenecientes al cúmulo. Aquí presentamos el diagrama de color-magnitud de cada uno de los cúmulos analizados (**Figura 1**).

Las estrellas de la muestra se seleccionaron porque de ellas sólo hay estudios fotométricos y astrométricos consistentes, en tanto que su estudio espectroscópico se ha limitado a unos pocos elementos químicos. Se destaca, además, la ausencia de las abundancias de los elementos que se forman vía captura neutrónica y el hecho de que sus resultados se refieren exclusivamente a algunos elementos en algunas estrellas.

Los dos cúmulos estudiados son objetos jóvenes (edades < 1 Gy) y hacen parte del disco interno de la Vía Láctea ($d < 1$ Kpc). Los valores de metalicidad del IC 2391 se obtuvieron vía calibraciones fotométricas. Cabe resaltar, asimismo, que en él la estrella E-44 (**Cantat-Gaudin et al.**, 2020) no está catalogada, por lo que se la ubicó en los respectivos CMD (**Figura 1**).

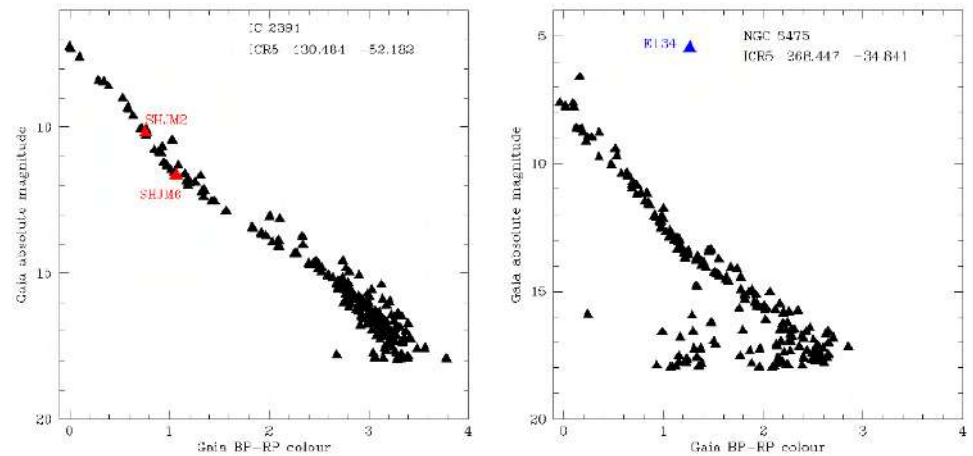


Figura 1. Diagramas de color-magnitud (CMD) de los cúmulos de la muestra. Los triángulos rojos (IC 2391) y azules (NGC 6475) indican las estrellas estudiadas en este trabajo, en tanto que los negros son el resto de las estrellas pertenecientes a cada cúmulo. Fotometría obtenida de la colaboración Gaia (Cantat-Gaudin *et al.*, 2020)

Los espectros de alta resolución se obtuvieron a partir de las bases de datos de *ESO/Archive* (<http://archive.eso.org/cms.html>) (Figura 2), específicamente de los espectrógrafos FEROS, HARPS y UVES, instalados en los telescopios ubicados en el observatorio de La Silla-Paranal. El poder de resolución espectral de los espectrógrafos es de 48.000, 120.000 y 80.000 (región azul) y de 110.000 (región roja), respectivamente. Nuestro grupo ya ha hecho observaciones utilizando esos mismos espectrógrafos. La muestra analizada en este estudio contiene estrellas pertenecientes a los cúmulos IC 2391 y NGC 6475, cuyos parámetros observacionales se obtuvieron del portal WEBDA (<https://webda.physics.muni.cz>) (Tabla 1), en tanto que la información de las estrellas de la muestra proviene de la base de datos SIMBAD (Tabla 2).

En todos los casos la señal ruido (S/N) se mantuvo en ≥ 150 , con el fin de obtener parámetros y abundancias con la mayor precisión posible, es decir, incertidumbres de $\leq 0,05 dex$.

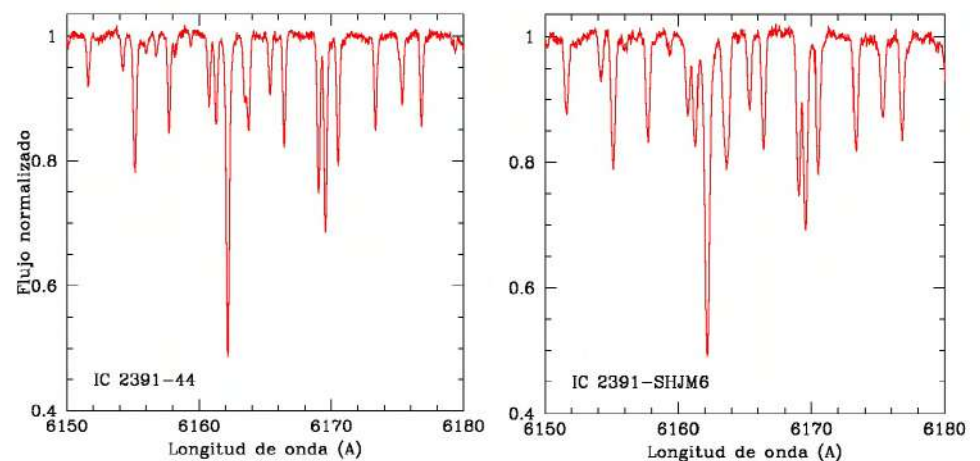


Figura 2. Espectros analizados de algunas estrellas de la muestra en el rango de 6155-6175 Å donde se pueden identificar líneas de CaI(λ 6161,29); NaI(λ 6160,75), y FeI(λ 6157,72)

Tabla 1. Parámetros observacionales de los cúmulos analizados en este trabajo. Donde las variables α y δ representan la ascensión recta y la declinación. d es la distancia heliocéntrica y $E(B - V)$, el enrojecimiento. La edad de cada cúmulo se expresa en Gyrs (10^9 años) y la metalicidad fotométrica como $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{fot}}$.

Cúmulo	IC 2391	NGC 6475
α	084032	175351
δ	-530200	-344736
d [pc]	175	301
$E(B - V)$ [mag]	0,008	0.103
Edad [Gyrs]	0,03	0.30
$[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{fot}}$ [dex]	-0,09	—

Tabla 2. Parámetros observacionales de la muestra de estrellas. Identificación: número Gaia DR3; coordenadas: α y δ ; filtro V e índice de color ($B - V$) de la banda Johnson

Estrella	Gaia DR3	α	δ	V	B-V
IC 2391-44	5318630973868090496	08 45 34,1	-52 25 08,4	9,74	0,46
IC2391-SHJM 6	5318545521198976000	08 39 53,0	-52 57 56,8	12,75	0,86
IC2391-SHJM 2	5318487208427013632	08 41 20,2	-52 50 11,2	10,3	0,4
NGC 6475-58	—	17 53 23,5	-34 53 42,4	5,60	1,09
NGC 6475-134	4041599414270468480	17 52 19,7	-34 25 00,6	5,85	1,1

Metodología

El primer paso en el análisis de cualquier espectro implica la identificación del continuo, el cual se define como un espectro sin líneas de absorción ni emisión, cuyo trazo pasa sobre las alas de las respectivas líneas. El segundo paso es la identificación de las líneas de cada elemento químico a partir de una lista previamente medida en un laboratorio de investigación espectroscópica. El tercer paso consiste en la correcta identificación de la longitud de onda de cada una de esas líneas, teniendo en cuenta el corrimiento Doppler. Por último, debe normalizarse el espectro observado llevando el flujo relativo al valor de 1,0, teniendo como referencia el espectro continuo.

La intensidad de las líneas se analiza a partir del ancho equivalente, el cual es el área rectangular bajo el perfil de la línea. La ecuación que permite calcular las anchuras equivalentes está dada por:

$$\log\left(\frac{\omega}{\lambda}\right) = \log\left(\frac{\pi e^2 N_r / N_E}{mc^2 Z(T)_I} N_H\right) + \log A + \log(gf\lambda) - \left(\frac{5040}{T}\right)x - \log kv \quad (1)$$

donde la fracción (ω/λ) es la anchura equivalente reducida, la cual se utiliza para normalizar el corrimiento Doppler; m_e y e son la masa y la carga del electrón, respectivamente; c es la velocidad de la luz, $Z(T)$ la función de partición, N_r la densidad de átomos en el r -ésimo estado de ionización, N_E la densidad de átomos de una especie determinada E, N_H la densidad de átomos de hidrógeno, A la abundancia del elemento que genera la línea medida, g el peso estadístico, f la fuerza del oscilador de cada línea, λ la longitud de onda del respectivo elemento, T la temperatura de excitación, x el potencial de excitación y kv el coeficiente de absorción del continuo.

Por consiguiente, las anchuras equivalentes dependen del perfil de las líneas, y este, a su vez, de las variables físicas que caracterizan la atmósfera: temperaturas efectivas, gravedades superficiales, abundancias químicas y opacidades. Las medidas de las anchuras equivalentes determinadas en este estudio se obtuvieron mediante el ajuste gaussiano utilizando la tarea `ondespect/plot/pyraf` (Pyraf es la versión en Python del código IRAF desarrollado por NOAO y disponible en <https://pyraf.readthedocs.io/en/latest/>).

Tal como se ve en la ecuación 1, el ancho equivalente aumenta en forma proporcional a la abundancia química, así, para calcular la cantidad de átomos de un elemento en fase neutra se utiliza la ecuación de Boltzman, en tanto que para determinarla en un elemento en estado de ionización se utiliza la ecuación de Saha.

Las atmósferas estelares conectan las observaciones con el resto de la astrofísica estelar, y constituyen la herramienta para comprender las abundancias estelares. Un espectro estelar no está relacionado de forma simple con el estado físico de la atmósfera, existen muchas variables que requieren un modelado cuidadoso. A partir de un modelo atmosférico podemos deducir propiedades de una estrella, como la temperatura, la gravedad superficial, el radio, la composición química, la tasa de rotación, etc., y, por ende, las propiedades termodinámicas de la propia atmósfera.

Los modelos atmosféricos requieren algunas simplificaciones o suposiciones para el análisis de espectros estelares, específicamente: la geometría plano-paralela, que permite que todas las variables físicas sean función de una sola coordenada espacial; el equilibrio hidrostático, sin aceleraciones a gran escala en la fotosfera y comparable con la gravedad de la superficie sin pérdida significativa de masa; la ausencia de estructuras finas como granulaciones o manchas, y la necesidad de no tener en cuenta los campos magnéticos. Aquí utilizamos los modelos atmosféricos de **Kurucz & Peytremann (1975)**, los cuales dividen la atmósfera estelar en 72 capas plano, paralelas bajo condiciones de equilibrio termodinámico local (LTE), utilizando la última versión de esa cuadrícula atmosférica (disponible en <http://kurucz.harvard.edu>).

Hipótesis LTE

Cuando el equilibrio termodinámico se aplica a volúmenes relativamente pequeños de la fotosfera, es decir, con dimensiones de orden 1 en profundidad óptica, se tiene una aproximación local termodinámica que supone que los componentes de un gas (átomos, electrones, fotones) interactúan lo suficiente como para que la energía se distribuya por igual entre todas las formas posibles (cinética, radiante, excitación, etc.). A partir de este concepto y de la física presente en el modelo atmosférico utilizado, los parámetros atmosféricos estelares pueden calcularse de la siguiente forma.

- Temperatura efectiva (T_{eff}), presente en la superficie estelar: bajo condiciones de LTE, la temperatura de excitación en la atmósfera es aproximadamente igual a la temperatura superficial. Su valor se obtiene a partir de la independencia entre las abundancias de FeI y el potencial de excitación de cada línea, tal como lo muestra la ecuación 2:

$$T_{eff} = \frac{d(\delta A_i^{FeI})}{d(x_{exc})} \approx 0.00 \quad (2),$$

donde X_{exc} es el potencial de excitación y δA_i^{FeI} la abundancia diferencial de FeI, es decir, la que se obtiene a partir de:

$$\delta A_i^{FeI} = A_{i,*}^{FeI} - A_{i,\odot}^{FeI} \quad (3),$$

donde $A_{i,*}^{FeI}$ representa la abundancia absoluta de FeI en la línea i en la estrella A^{FeI} , en tanto que $A_{i,\odot}^{FeI}$ representa también la abundancia de FeI en la misma línea pero en el espectro solar de Juno.

- Velocidad microturbulenta (ξ): se define como la velocidad que presenta el gas en la atmósfera estelar; su valor influye en el ensanchamiento de las líneas. Se obtiene a partir de la pendiente 0,00, o independencia entre la abundancia de FeI y las anchuras equivalentes reducidas:

$$\xi = \frac{d(\delta A_i^{FeI})}{d(w/\lambda)} \approx 0.00 \quad (4).$$

- Gravedad superficial ($\log g$): la gravedad en la fotosfera estelar que, bajo la aproximación LTE, está relacionada con la presión electrónica. Sus efectos se notan en el perfil de la línea, específicamente en el alargamiento. El valor se puede determinar fotométricamente a partir del brillo estelar y espectroscópicamente por el equilibrio de ionización entre las abundancias medias de FeII y FeI, es decir:

$$\langle A_i^{FeII} \rangle - \langle A_i^{FeI} \rangle \approx 0.00 \quad (5),$$

donde $\langle A_i^{FeII} \rangle$ y $\langle A_i^{FeI} \rangle$ son las abundancias medias de *FeII* y *FeI*, respectivamente.

• **Metalicidad ($[Fe/H]$):** se define como la proporción de metales presentes en la atmósfera estelar. En astronomía se le da el nombre de metales a todos los elementos distintos al hidrógeno, los cuales se pueden medir espectroscópicamente gracias a las líneas de absorción de *FeI* y *FeII* presentes en el espectro estelar. Matemáticamente se obtiene a partir de la ecuación 6:

$$[Fe/H] = \log\left(\frac{A^{Fe}}{A^H}\right)_* - \log\left(\frac{A^{Fe}}{A^H}\right)_\odot \quad (6),$$

donde $[Fe/H]$ es la metalicidad; A^{Fe} y A^H son las abundancias de hierro e hidrógeno; los símbolos * y \odot representan la estrella de interés y el Sol, respectivamente. La metalicidad, y en general las abundancias solares, se toman como referencia en el análisis. De hecho, la metalicidad solar es $[Fe/H]_\odot = 0,00$ dex. $[Fe/H]$ tiene un valor inicial de entrada en el análisis espectroscópico, siendo este una interpolación en la cuadrícula de modelos atmosféricos de **Kurucz** (1981) bajo condiciones de LTE.

Listas de líneas y modelo solar

En la actualidad el Sol es nuestro referente cuando se estudian las otras estrellas. Para obtener las abundancias solares, se utilizaron las líneas del espectro de Juno (Juno es un asteroide cuyo espectro se obtiene vía reflexión del Sol), el cual se tomó con el espectrógrafo HARPS de ESO. El modelo atmosférico solar usado como referencia en nuestro análisis, se calculó con base en los modelos atmosféricos de Kurucz bajo condiciones de LTE. Ese modelo es el siguiente: $T_{eff} = 5777$ K, $\log g = 4,44$ dex y $\zeta = 0,75$ kms^{-1} . Para más información de los modelos solares y su comparación, así como de las líneas de absorción estudiadas en cada una de las estrellas de la muestra, puede consultarse el artículo de **Katime-Santrich et al.** (2022).

Los parámetros atmosféricos y las abundancias químicas se obtuvieron con la ayuda de la última versión (2019) del *software* espectral Moog (disponible en <https://www.as.utexas.edu/chris/moog.html>). Este programa determina los parámetros y abundancias finales en la estrella a partir de las anchuras equivalentes previamente calculadas y los modelos de Kurucz mediante un proceso iterativo que requiere de un modelo atmosférico inicial hasta que la solución bajo las condiciones LTE se cumpla. El proceso iterativo se hace con el *software* qoyllur-quipu (última versión disponible en <https://github.com/astroChasqui/q2>), el cual recurre al programa Moog para calcular diferentes modelos hasta que las ecuaciones 2 a 6 se cumplan simultáneamente. En todo el proceso se aplicó un análisis línea a línea en relación con el espectro solar de Juno para evitar la dependencia de las abundancias con el $\log gf$ de cada línea.

Resultados y análisis

Los parámetros atmosféricos obtenidos se encuentran en los siguientes intervalos: $T_{eff} = [4435, 5575]K$; $\log g = [1,62, 4,57]$ dex; $\zeta = [1,12, 4,25]$ km/s; $[Fe/H] = [-0,26, 0,14]$ dex.

Los resultados muestran que nuestras estrellas son de los tipos espectrales F, G, K y de metalicidad de tipo solar. Tal como se muestra en la **tabla 3**, las tres estrellas dentro del IC 2391 corresponden a estrellas enanas, pues presentan gravedades superficiales de $\log g > 4,0$ dex. Esto significa que la fase evolutiva de las estrellas del IC 2391 es la secuencia principal, tal como está indicado en el CMD de la **figura 1** (izquierda), en tanto que en el NGC 6475 las estrellas son gigantes RGB porque sus gravedades superficiales son $\log g < 3,0$. Los valores de la gravedad superficial son típicos de las estrellas que están en el primer ascenso de la fase gigante, la llamada RGB. Es decir que las estrellas del NGC 6475 son estrellas más evolucionadas que las del IC 2391 porque ya pasaron la fase de secuencia principal.

Los resultados obtenidos se presentan en dos partes: los elementos formados vía fusión nuclear y aquellos formados vía captura neutrónica lenta (procesos).

Tabla 3. Parámetros atmosféricos para cada estrella de la muestra. T_{eff} en Kelvins, ($\log g$) y $[Fe/H]$ en unidades logarítmicas dex, (ϵ) en km/s. La incertidumbre σ corresponde a la desviación estándar.

Estrella	$T_{eff} \pm \sigma$	$(\log g) \pm \sigma$	$[FeI/H] \pm \sigma$ (#)	$[FeII/H] \pm \sigma$ (#)	$(\zeta) \pm \sigma$
IC 2391-44	6575±52	4,41±0,06	-0,02±0,03 (49)	-0,02±0,03 (11)	2,00±0,09
IC 2391-SHJM6	5426±71	4,02±0,15	-0,05±0,05 (54)	-0,05±0,10 (6)	4,24±0,38
IC 2391-SHJM2	6104±62	4,46±0,13	0,17±0,05 (53)	0,17±0,06 (10)	2,29±0,17
NGC 6475-58	4981±45	2,56±0,11	0,06±0,03 (77)	0,07±0,00 (13)	2,12±0,07
NGC 6475-134	4963±59	2,15±0,17	0,08±0,06 (71)	0,08±0,09 (13)	2,28±0,10

Elementos formados vía fusión nuclear

En las estrellas de la secuencia principal (enanas) y aquellas en la fase RGB (gigantes) los elementos químicos se originan por medio de la fusión nuclear; este proceso se da a partir de tres tipos de reacción: la cadena protón-protón, el ciclo carbono nitrógeno oxígeno y los procesos alfa. Consecuentemente, dada la fase evolutiva de las estrellas analizadas en este trabajo, encontramos abundancias de los siguientes elementos: Al, Mg, Na, Si, Ca, Ti, Cr, Ni.

En la comparación de este trabajo y el de **Luck (2015) (Figura 3)**, se comprobó que las abundancias químicas de los elementos que se forman vía fusión nuclear concuerdan con las abundancias químicas calculadas para las estrellas de campo que se encuentran en el disco galáctico. Este resultado es importante porque el trabajo de **Luck (2015)** analiza

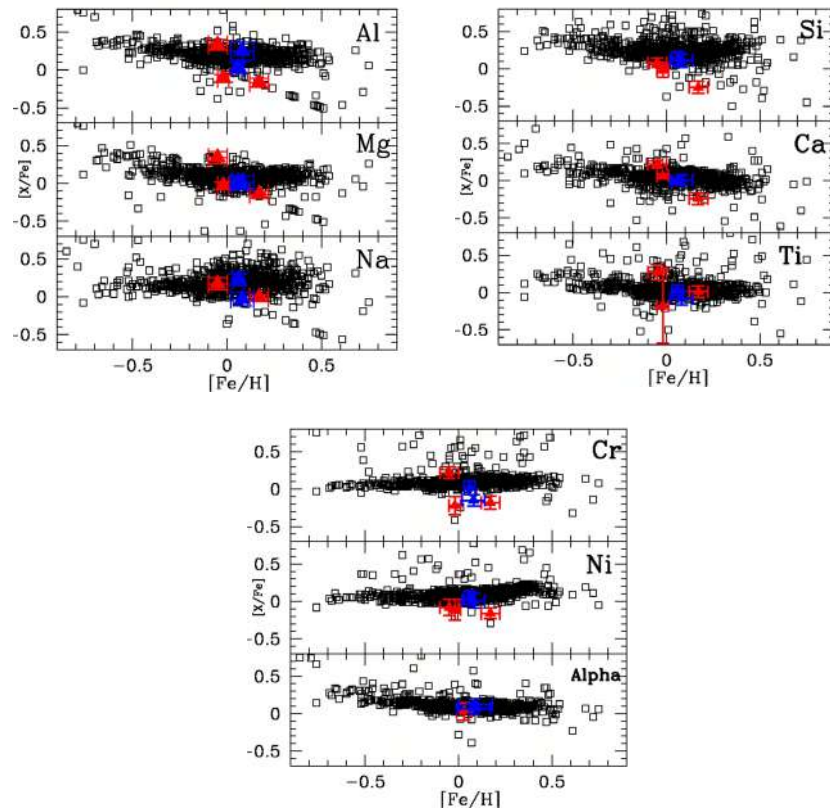


Figura 3. Abundancias químicas de los elementos formados vía fusión nuclear en la muestra. Los triángulos rojos representan las estrellas enanas de IC 2391; los azules, las gigantes de NGC 6475, y los cuadrados son las gigantes de campo de **Luck (2015)**

más de 1.000 estrellas en forma homogénea a partir de la espectroscopia de alta resolución. La muestra de **Luck** (2015) está limitada a estrellas del disco interno o de la denominada región local. Mas recientemente, **Jacobson et al.** (2016) y **Delgado-Mena et al.** (2019) analizaron también alrededor de 1.000 estrellas y encontraron resultados muy similares a los de **Luck** (2015) y, por ende, también muy similares a los obtenidos en nuestro estudio.

Proceso-s

Este es el proceso de formación de elementos a partir de la captura neutrónica y no de la fusión nuclear. El proceso-s se presenta en las estrellas gigantes de la rama asintótica gigante (*asymptotic giant branch, AGB*), y aunque nuestras estrellas no se encuentran en esa fase, los elementos pesados se encuentran en las fotosferas de las estrellas enanas y gigantes RGB debido a que heredan parte de la contaminación inicial de la nube molecular donde se formaron. Los elementos pesados, es decir, los formados en el proceso-s, calculados en este trabajo fueron Y, Zr, La, Ce, Nd.

En la **figura 4** se observa que, de forma similar al proceso alfa, los elementos pesados del cúmulo NGC 6475 también están en la tendencia evolutiva del disco galáctico. La situación es muy diferente en el IC 2391, pues fue mucho más difícil obtener estas abundancias debido a la ausencia de varias líneas de estos elementos. Este hecho se hizo evidente cuando la fracción [s/Fe] se comparó en los dos cúmulos.

Discusión

A partir del análisis hecho por **Cantat-Gaudin et al.** (2020), se encontró que las estrellas IC 2391–SHJM2 e IC 2391–SHJM6 tienen una alta probabilidad ($\approx 1,0$) de pertenecer al cúmulo; sin embargo, el análisis espectroscópico evidenció que las abundancias químicas de las dos estrellas son muy diferentes. Este comportamiento, que en teoría contradice el resultado de **Cantat-Gaudin et al.** (2020), podría explicarse porque se ha propuesto la estrella IC 2391–SHJM2 como candidata a ser una binaria espectroscópica (**Mermilliod et al.**, 2009). No obstante, al analizar las velocidades radiales calculadas por nosotros y las previamente reportadas en la literatura, encontramos que no se han producido diferencias significativas en los últimos 20 años, tal como se aprecia en la **tabla 4**.

Una explicación alternativa de las diferencias entre las abundancias de la IC 2391–SHJM2 y la IC 2391–SHJM6 se fundamentaría en las altas velocidades rotacionales de $V_{\text{seni}} = 10,1$ y $12,6$ km/s, respectivamente, reportadas en la literatura (**Mermilliod et al.**, 2009; **De Silva et al.**, 2013).

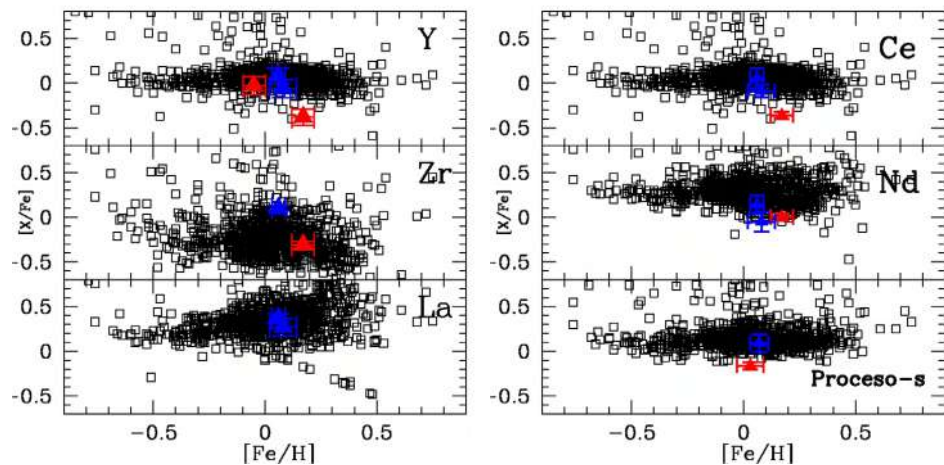


Figura 4. Abundancias químicas de los elementos del proceso-s. Se usan los mismos símbolos de la Figura 3. Proceso-s significa la media de los elementos mencionados

Tabla 4. Velocidades radiales de las estrellas de la muestra (V_{rad}), donde V_{lit1} , V_{lit2} y V_{lit3} son las velocidades radiales reportadas en **Gaia Collaboration** (2018, 2022) y en **Mermilliod et al.** (2009). Todas las velocidades se expresan en km/s.

Estrella	$V_{rad} \pm \sigma$	V_{lit1}	V_{lit2}	V_{lit3}
IC2391-SHJM2	$12,59 \pm 2,15$	14,33	15,25	-
IC2391-SHJM6	$10,96 \pm 1,25$	14,70	16,85	15,22
IC2391-E44	$29,69 \pm 6,30$	25,48	19,0	-
NGC 6475-E58	$7,83 \pm 1,24$	-7,0	-19,0	-22,90
NGC 6475-E134	$10,02 \pm 1,46$	-15,57	-15,57	-22,50

Estos valores son típicamente altos para estrellas F, G, K de la secuencia principal, tal como lo explican **Santrich et al.** (2013). Los valores típicos para estrellas de la secuencia principal y las de fase gigantes presentan velocidades rotacionales menores a 7 km/s a partir de los 10 km/s. El efecto de la rotación empieza a notarse en el perfil de las líneas, disminuyendo su profundidad y alargando sus alas.

La estrella IC 2391-E44 tiene abundancias de algunos elementos similares a las otras dos integrantes del cúmulo. En otros casos, presenta abundancias similares solamente a las de una de las estrellas integrantes y, en otro caso, completamente diferentes a los otras dos integrantes del cúmulo. Este comportamiento se ilustra en las **figuras 3 y 4**. Según el análisis de **Cantat-Gaudin et al.** (2020), esta estrella no pertenece a este cúmulo, hecho que puede verse reforzado por la ausencia total de líneas de los elementos del proceso-s.

En términos generales, las dos estrellas del cúmulo NGC 6475 presentan abundancias similares, con la excepción del sodio y el aluminio, cuya diferencia es mayor a 0,20 dex. El caso del sodio se explicaría porque en algunas estrellas las líneas de absorción ((5148,84, 5682,63, 6154,23, 6170,75) Å) sufren desvíos del LTE, lo cual ocasiona aumento en la profundidad de las líneas y, por lo tanto, un incremento considerable en el valor de las abundancias. La estrella NGC 6475-134 tiene una probabilidad de $\approx 0,8$ de pertenecer al cúmulo según **Cantat-Gaudin et al.** (2020), pero la estrella NGC 6475-E58 no está catalogada y no se incluyó como miembro de ese cúmulo. Las velocidades radiales medidas en el presente estudio evidenciaron diferencias mayores a 10 Km/s (**Tabla 4**), lo cual podría indicar binariedad o pertenencia a un sistema múltiple, tal como está reportado por **Feinstein** (1961) y **Mermilliod et al.** (2008), aunque esto no se reflejó en nuestro análisis espectroscópico.

Conclusiones

En este trabajo hemos analizado cinco estrellas de tipo espectral FGK pertenecientes a los cúmulos IC 2391 y NGC 6475. Las tres estrellas del primer cúmulo presentan parámetros atmosféricos correspondientes a objetos en fase de secuencia principal, en tanto que los parámetros de las estrellas del segundo cúmulo corresponden a estrellas en fase gigante RGB. Para la obtención de los parámetros y las abundancias utilizamos como metodología de trabajo la hipótesis LTE. Asimismo, discutimos en el contexto de la evolución estelar y la estructura galáctica los resultados obtenidos en las estrellas de la muestra.

- El cúmulo IC 2391 presentó la mayor dispersión entre sus estrellas al analizar las fracciones de abundancia $[X/Fe]$. Además, las abundancias de sus elementos alfa se encontraron en el límite dentro de la tendencia reportada para las gigantes de campo y de los cúmulos abiertos estudiados por **Luck** (2015). También fue evidente que este cúmulo es pobre en elementos del proceso-s, comparado con los otros cúmulos de la muestra, las gigantes de campo y los cúmulos analizados por **Luck** (2015). Estos resultados indican que, muy probablemente, el cúmulo está dentro del disco interno de la Vía Láctea y que su formación ocurrió en un ambiente poco contaminado por las generaciones

previas de estrellas. Sin embargo, esto no es concluyente de manera absoluta, ya que las altas velocidades rotacionales pueden alterar el perfil de las líneas y, por lo tanto, las abundancias de IC 2391–SHJM2 e IC 2391–SHJM6, las cuales tienen una probabilidad de $\approx 1,0$ de estar dentro del cúmulo. Por ello se requiere el estudio de más estrellas F, G, K con alta probabilidad de pertenecer a este cúmulo, para así determinar la veracidad del comportamiento detectado a partir del análisis espectroscópico que hicimos.

- Como ya lo habíamos anotado, en el cúmulo NGC 6475 se registró una dispersión mínima en las abundancias de las estrellas NGC 6475–58 y NGC-6475 – 134, por lo que a partir del análisis espectroscópico puede afirmarse que la estrella NGC 6475–58 debe estar dentro del cúmulo. La binariedad y multiplicidad reportadas deben analizarse más cuidadosamente con base en observaciones en diferentes épocas. De todas maneras, el que realmente tengan compañeras estelares no parece estar afectando sus abundancias químicas. Las abundancias de sus elementos alfa y del proceso-s corroboran que el cúmulo está dentro de la tendencia marcada por el disco galáctico interno.

- Los resultados muestran que deben estudiarse más estrellas por espectroscopia de alta resolución en los dos cúmulos de la muestra, para así despejar estas dudas y contribuir al estudio de los cúmulos en el contexto de la evolución química del disco galáctico. Normalmente, en la literatura se analizan pocas estrellas en cada cúmulo; en algunos pocos trabajos publicados se ha demostrado que cuando más de 10 estrellas por cúmulo se analizan, es posible descubrir todo tipo de objetos. Por ejemplo, en su estudio, **Sales-Silva et al.** (2014) reportaron la existencia de estrellas de bario y rezagadas amarillas dentro de los cúmulos NGC5822, NGC 3680 y NGC 2360 que, hasta ahora, son las únicas estrellas de esos tipos reportadas en cúmulos abiertos.

Agradecimientos

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por permitir el desarrollo de este trabajo; a las bases de datos internacionales de la ESO, WEBDA y SIMBAD, cuyos datos y permisos de uso fueron fundamentales en esta tesis, y a los evaluadores anónimos, por sus importantes contribuciones para mejorar la calidad del estudio.

Contribución de los autores

ACFB y OKS trabajaron por igual en el análisis espectroscópico y posterior discusión de los resultados obtenidos. NVV participó en las discusiones y colaboró con la elaboración del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener conflicto de intereses por la publicación de este trabajo.

References

- Beers, T.C., Carollo, D.** (2009). Galactic archaeology: Overcoming great barriers. *Nature Physics*, 5(7), 463-464.
- Cantat-Gaudin, T., Anders, F., Castro-Ginard, A., Jordi, C., Romero-Go´mez, M., Soubiran, C., Casamiquela, L., Tarricq, Y., Moitinho, A., Vallenari, A., Bragaglia, A., Krone-Martins, A., Kounkel, M.** (2020). Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters. *Astronomy and Astrophysics*, 640, Article A1, A1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038192>
- De Silva, G. M., D’Orazi, V., Melo, C., Torres, C. A. O., Gieles, M., Quast, G. R., Sterzik, M.** (2013). Search for associations containing young stars: chemical tagging IC 2391 and the Argus association. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 431(2), 1005-1018. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt153>
- Delgado-Mena, E., Moya, A., Adibekyan, V., Tsantaki, M., González-Hernández, J. I., Israelian, G., Davies, G. R., Chaplin, W. J., Sousa, S. G., Ferreira, A. C. S., Santos, N. C.** (2019). Abundance to age ratios in the HARPS-GTO sample with Gaia DR2. Chemical clocks for a range of [Fe/H]. *Astronomy and Astrophysics*, 624, A78. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834783>

- Feinstein, A.** (1961). Spectroscopic Observations of M 7. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 73(435), 452. <https://doi.org/10.1086/127728>
- Gaia Collaboration.** (2018). VizieR Online Data Catalog: Gaia DR2 (Gaia Collaboration, 2018). *VizieR Online Data Catalog*, Article I/345.
- Gaia Collaboration.** (2022). VizieR Online Data Catalog: Gaia DR3 Part 1. Main source (Gaia Collaboration, 2022). *VizieR Online Data Catalog*, Article I/355.
- Jacobson, H. R., Friel, E. D., Jilková, L., Magrini, L., Bragaglia, A., Vallenari, A., Tosi, M., Randich, S., Donati, P., Cantat-Gaudin, T., Sordo, R., Smiljanic, R., Overbeek, J. C., Carraro, G., Tautvaišienė, G., San Roman, I., Villanova, S., Geisler, D., Muñoz, C., . . . Zaggia, S.** (2016). The Gaia-ESO Survey: Probes of the inner disk abundance gradient. *Astronomy and Astrophysics*, 591, Article A37. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527654>
- Katime-Santrich, O. J., Kerber, L., Abuchaim, Y., Gonçalves, G.** (2022). On the validity of the spectroscopic age indicators [Y/Mg], [Y/Al], [Y/Si], [Y/Ca], and [Y/Ti] for giant stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 514(4), 4816-4827. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1183>
- Katime-Santrich, O.J.K., Pereira, C.B., Drake, N.A.** (2013). Chemical analysis of giant stars in the young open cluster NGC 3114. *Astronomy and Astrophysics*, 554, Article A2, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220252>
- Kurucz, R. L.** (1981). *A table of semiempirical gf values. Pt 1: Wavelengths: 5.2682 NM to 272.3380 nm; Pt 2: Wavelengths: 272.3395 NM to 599.3892 nm; Pt 3: Wave-lengths: 599.4004 NM to 9997.2746 NM Pt 4: FeII.*
- Kurucz, R. L., Peytremann, E.** (1975). A table of semiempirical gf values. Pt 1: Wave-lengths: 5.2682 NM to 272.3380 nm; Pt 2: Wavelengths: 272.3395 NM to 599.3892 nm; Pt 3: Wavelengths: 599.4004 NM to 9997.2746 NM. SAO Special Report.
- Luck, R. E.** (2015). Abundances in the Local Region. I. G and K Giants. *The Astrophysical Journal*, 150(3), Article 88. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/150/3/88>
- Magrini, L., Randich, S., Kordopatis, G., Prantzos, N., Romano, D., Chieffi, A., Limongi, M., François, P., Pancino, E., Friel, E., Bragaglia, A., Tautvaišienė, G., Spina, L., Overbeek, J., Cantat-Gaudin, T., Donati, P., Vallenari, A., Sordo, R., Jiménez-Esteban, F. M., . . . Zaggia, S.** (2017). The Gaia-ESO Survey: radial distribution of abundances in the Galactic disc from open clusters and young-field stars. *Astronomy and Astrophysics*, 603, Article A2. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630294>
- Magrini, L., Viscasillas-Vázquez, C., Spina, L., Randich, S., Romano, D., Franciosini, E., Recio-Blanco, A., Nordlander, T., D’Orazi, V., Baratella, M., Smiljanic, R., Dantas, M. L.L., Pasquini, L., Spitoni, E., Casali, G., Van der Swaelmen, M., Bensby, T., Stonkute, E., Sacco, S.F.G.G., . . . Morbidelli, L.** (2022). The Gaia-ESO survey: mapping the shape and evolution of the radial abundance gradients with open clusters. *arXiv e-prints*, Article arXiv:2210.15525.
- Mermilliod, J. C., Mayor, M., Udry, S.** (2008). Red giants in open clusters. XIV. Mean radial velocities for 1309 stars and 166 open clusters. *Astronomy and Astrophysics*, 485(1), 303-314. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200809664>
- Mermilliod, J., Mayor, M., Udry, S.** (2009). Catalogues of radial and rotational velocities of 1253 F-K dwarfs in 13 nearby open clusters. *Astronomy and Astrophysics*, 498(3), 949-960. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810244>
- Sales-Silva, J.V., Peña-Suárez, V.J., Katime-Santrich, O.J., Pereira, C.B., Drake, N.A., Roig, F.** (2014). High-resolution Spectroscopic Observations of Binary Stars and Yellow Stragglers in Three Open Clusters: NGC 2360, NGC 3680, and NGC 5822. *The Astrophysical Journal*, 148(5), Article 83. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/148/5/83>

Artículo original

Caracterización del desempeño de una celda de punto fijo de indio (In) y estimación de incertidumbre de medición debido a la repetibilidad de la transición de fase de solidificación

Characterization of the performance of an Indium (In) fixed-point cell and estimation of the uncertainty measurement due to the phase transition repeatability

Juan David Hernández^{1,*}, Andrés J. Bohórquez², Hector Castro¹

¹ Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

² Instituto Nacional de Metrología de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

Resumen

Se diseñó y construyó una celda de punto fijo de indio en el Instituto Nacional de Metrología (INM) como parte de la implementación de un patrón termométrico de la escala internacional de temperatura (EIT-90). Para corroborar el correcto funcionamiento de la celda, se estimó la incertidumbre de medición debida a la repetibilidad de la transición de fase. Se encontró que esta fuente representaba un 1,5 % de la incertidumbre expandida de medición, lo que permite concluir que no se depositaron cantidades importantes de impurezas durante el proceso de fabricación de la celda. Se implementó un algoritmo computacional para determinar de forma automatizada el momento de terminación del proceso de solidificación.

Palabras clave: Celda de punto fijo de indio; Repetibilidad de la transición de fase; Curva de solidificación; Patrón termométrico; Termometría.

Abstract

We designed and built an indium fixed-point cell at the *Instituto Nacional de Metrología* (INM) as part of the implementation of a thermometric standard of the international temperature scale (ITS-90). To confirm the correct operation of the cell, we estimated the measurement uncertainty due to the repeatability of the phase transition. We found that this uncertainty source represented 1.5% of the expanded measurement uncertainty, which allowed us to conclude that no significant amounts of impurities were deposited during the filling process of the cell. We implemented a computational algorithm to automatically determine the moment when the solidification process ends.

Keywords: Indium fixed-point cell; Phase transition repeatability; Solidification curve; Thermometry standard; Thermometry.

Introducción

La diseminación de la trazabilidad metrológica a las unidades base del Sistema Internacional de Unidades (SI) constituye un aspecto fundamental en la consolidación de la calidad y el progreso de la economía de un país. En Colombia, el Instituto Nacional de Metrología (INM) tiene la responsabilidad de establecer los patrones de referencia para medición de varias magnitudes físicas, como bien lo establece en su misión: “Coordinar la metrología científica e industrial, desarrollar actividades de ciencia, tecnología e innovación, asegurar la trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades (SI) y prestar servicios metrológicos contribuyendo a la confiabilidad de las mediciones, la productividad y competitividad de sectores productivos y el bienestar de los ciudadanos.” (INM, 2019).

Citación: Hernández JD, Bohórquez AJ, Castro H. Caracterización del desempeño de una celda de punto fijo de indio y estimación de incertidumbre de medición debido a la repetibilidad de la transición de fase de solidificación. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 47(183):270-280, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1775>

Editor: Gabriel Téllez Acosta

***Correspondencia:**

Juan David Hernández;
judhernandezra@unal.edu.co

Recibido: 23 de septiembre de 2022

Aceptado: 4 de junio de 2023

Publicado en línea: 23 de junio de 2023



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

En particular, la temperatura es una de las magnitudes base más críticas del SI en procesos científicos e industriales; la gran mayoría de resultados de medición y presupuestos de incertidumbre incluyen correcciones o fuentes de incertidumbre por temperatura. En este sentido, la diseminación de la trazabilidad a la unidad base del Kelvin es crucial para el mantenimiento y desarrollo de una sociedad. En el INM, el Laboratorio de Temperatura y Humedad de la Subdirección de Metrología Física se encarga de esta labor.

La rama de la metrología que se encarga del estudio de la temperatura se conoce como termometría. En 1989 el Comité Internacional de Pesas y Medidas adoptó la escala internacional de temperatura (EIT-90) a partir de los denominados “puntos fijos” de temperatura, los cuales se determinan con base en el equilibrio de fases de sustancias puras y de elementos de interpolación, como los termómetros de gas de helio a volumen constante, los termómetros de resistencia de platino (*Standard Platinum Resistance Thermometers*, SPRT) y los termómetros de radiación (Carvajal, 2019). Actualmente la EIT-90 está constituida por 17 puntos fijos (Tabla 1) (Preston-Thomas, 1989).

En la tabla 1 el parámetro de referencia $W_r(T_{90})$ viene dado por:

$$W_r(T_{90}) = \frac{R_i}{R_{H_2O}} \tag{1}$$

donde R_i es el valor de la resistencia eléctrica del SPRT en el punto fijo y R_{H_2O} el valor de la resistencia en el punto triple del agua, es decir que todas las mediciones de resistencia del SPRT son referidas a la resistencia del termómetro en el punto triple del agua. Los valores de referencia de $W_r(T_{90})$ se definieron en la EIT-90 a partir de 2 SPRT de alta pureza (Pokhodun *et al.*, 2021).

Tabla 1. Puntos fijos de los patrones termométricos de la EIT-90. En esta tabla aparecen tres tipos de temperatura de referencia establecidos en la escala: punto de solidificación y fusión de metales de alta pureza (a presión atmosférica), puntos triples (los cuales no dependen de la presión) y rango de temperatura para el termómetro de gas de helio de acuerdo con su curva P-T

Sustancia	Temperatura (T_{90}/K)	Temperatura ($t_{90}/^{\circ}C$)	$W_r(T_{90})$
Punto de presión de vapor del helio	3 a 5	- 270,15 a -268,15	–
Punto triple del hidrógeno	13,8033	- 259,3467	0,00119007
Punto de presión de vapor de $e-H_2$	≈ 17	$\approx -256,15$	–
Punto de presión de vapor de $e-H_2$	$\approx 20,3$	$\approx -252,85$	–
Punto triple del neón	24,5561	-248,5939	0,00844974
Punto triple del oxígeno	54,3584	-218,7916	0,09171804
Punto triple del argón	83,8058	-189,3442	0,21585975
Punto triple mercurio	234,3156	-38,8344	0,84414211
Punto triple del agua	273,16	0,01	1,00000000
Punto de fusión del galio	302,9146	29,7646	1,11813889
Punto de solidificación del indio	429,7485	156,5985	1,60980185
Punto de solidificación del estaño	505,1181	231,928	1,89279768
Punto de solidificación del zinc	692,73	419,527	2,56891730
Punto de solidificación del aluminio	933,473	606,323	3,37600860
Punto de solidificación del plata	1234,93	961,78	4,28642053
Punto de solidificación del oro	1337,33	1064,18	–
Punto de solidificación del cobre	1357,77	1084,62	–

El método actual para la reproducción de esta escala se basa en las transiciones de fase hechas a través de sistemas de medición conocidos como “celdas de punto fijo”. Una celda de punto fijo está formada por distintos componentes que garantizan la repetibilidad y reproducibilidad de la transición de fase del elemento que se encuentre en su interior. La medición con una celda de punto fijo conlleva el control de múltiples parámetros que determinan la calidad y la duración de la transición de fase y, de esta manera, la medición de la temperatura de referencia con gran precisión. La presión de referencia para la reproducción de los puntos de fusión y la solidificación de metales corresponde a la presión atmosférica estándar ($p_0 = 101325 \text{ Pa}$). Para transiciones de fase de punto triple, el efecto de la presión sólo es consecuencia de la presión hidrostática del líquido en la parte superior de la celda (Preston-Thomas, 1989).

En el intervalo de temperatura comprendido entre $t_{90}=156,5986 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta $t_{90}=1084,62 \text{ }^\circ\text{C}$, la EIT-90 está constituida por el punto de solidificación de metales de alta pureza. En la **figura 1** se observa la lectura típica de un SPRT durante el proceso de solidificación del indio (Strouse, 2001).

Uno de los factores que más influye en la forma de meseta es la concentración de impurezas en el material de referencia. Esto se debe a que la diferencia de temperatura entre el comienzo y cualquier punto en la curva de solidificación (**Figura 1H**) viene dada por (Strouse, 2001):

$$T - T_{max} = \frac{c_1}{A} \left(1 - \frac{1}{F}\right) \tag{2}$$

donde T_{max} es la temperatura del metal justo después de la recalcencia, c_1 es la concentración de impurezas, A es la constante crioscópica (para el caso del indio $A_m = 0,002143\text{K}^{-1}$) y F es la fracción líquida del material cuando está completamente fundido ($T = T_{max}$) (Strouse, 2001).

La incertidumbre de medición del cambio de temperatura debido a la presencia de impurezas viene dada por:

$$u^2(\Delta T_{imp}) = \frac{1}{3} \left(\frac{c_1}{A}\right)^2 \tag{3}$$

Es importante realizar de manera periódica (por lo menos cada 6 meses) mediciones en las celdas de punto fijo, con el fin de determinar el parámetro de repetibilidad de la transición de fase, este parámetro hace referencia a la variabilidad en el tiempo de la diferencia de temperatura entre el comienzo y el final de la meseta (**Figura 1H**), con el fin de determinar si se han depositado de manera progresiva impurezas en el material de referencia (Strouse, 2008).

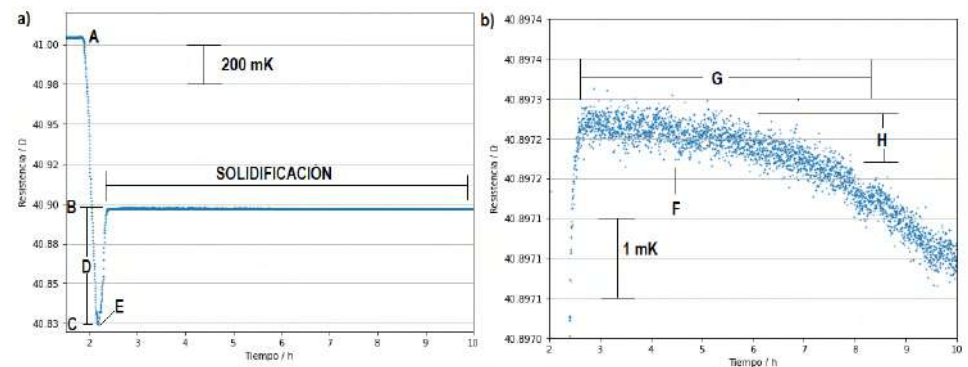


Figura 1. Proceso de solidificación del indio de alta pureza. **a)** A: Temperatura a la cual se encuentra el indio fundido. B: Temperatura del punto de solidificación. C: Consigna del horno empleada para generar el proceso de solidificación. D: Subenfriamiento del indio fundido. E: Recalcencia. **b)** Ampliación de la curva de solidificación. F: Zona de meseta. G: Solidificación. H: Diferencia de temperatura entre el comienzo y final de la solidificación

La incertidumbre asociada a la repetibilidad de la transición de fase viene dada por:

$$u^2(R_{Rep,PhT}) = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta R_i - \overline{\Delta R})^2}{N-1} \quad (4),$$

donde ΔR_i es la diferencia del valor de resistencia al comienzo y el final de la meseta de cada una de las mediciones.

En esta investigación se calculó la incertidumbre asociada con la repetibilidad de la transición de fase de la primera celda de punto fijo de indio diseñada y construida en el Instituto Nacional de Metrología con el fin de determinar si el proceso de llenado y ensamble era satisfactorio.

Materiales y métodos

Diseño y construcción de la celda

El esquema de la celda y el ensamble completo se observan en la **figura 2**.

Las siguientes piezas se diseñaron y luego se construyeron con el apoyo del taller de manufactura del INM: tapa del crisol, espaciadores, moduladores de flujo de calor (*heat shunts*), crisol, soporte y termopozo. Estas piezas se hicieron con grafito de 99,95 % de pureza; la tapa de la celda es de corcho, el termopozo que recubre el termómetro, de borosilicato y la cubierta, de cuarzo.

El volumen disponible para el llenado del crisol se estableció en aproximadamente 77 cm³, lo cual permitió incorporar una masa de 500 g de indio de tipo 6N. Se fabricaron cuatro espaciadores y diez moduladores de flujo de calor para disminuir la transferencia de calor entre el crisol y la parte superior de la celda. Primero, la cubierta de cuarzo y las piezas de grafito (crisol, tapa, soporte, termopozo, moduladores de flujo de calor y espaciadores) se sometieron a un recocido a 600 °C durante 24 horas, con el fin de eliminar contaminantes orgánicos y otras impurezas (Strouse, 2001).

Después del recocido, se llenó el crisol empleando un tubo de acero cerrado en un extremo, donde se coloca el crisol de grafito con el material de referencia en su interior. Con ayuda de un aditamento de teflón en la parte superior, se conectó una línea de gas inerte (nitrógeno) a una presión de 20 PSI durante el proceso de llenado, de manera que

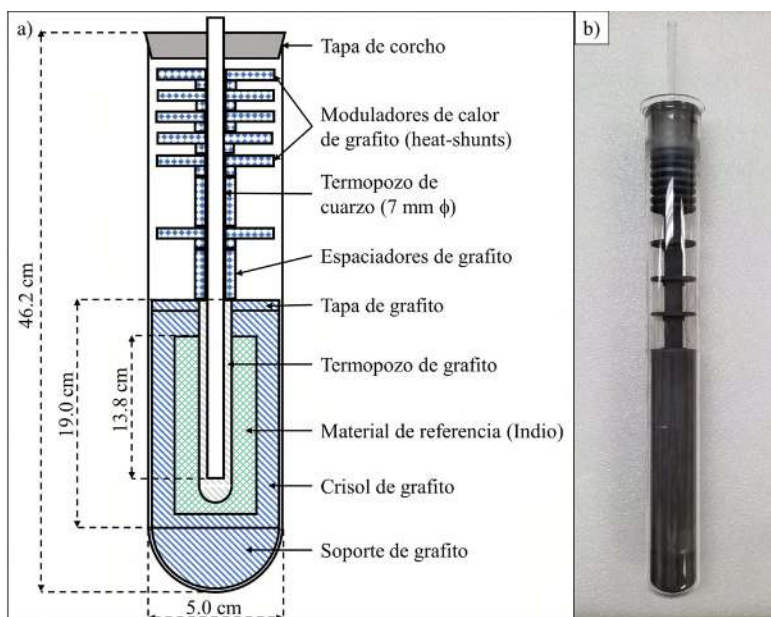


Figura 2. a) Esquema de la celda de punto fijo de indio. **b)** Ensamble de la celda de punto fijo de indio

se desplazara el oxígeno del ambiente sobre la celda. Por último, se empleó un horno de tubo de calor (*heat pipe*) de alta temperatura, el cual garantiza condiciones uniformes de temperatura a lo largo del eje axial de los tubos de llenado (Lopardo, *et al.*, 2022).

Se hizo un primer llenado del crisol con 375 g de indio en forma de gránulos; el tubo de acero se mantuvo a una temperatura de 170 °C, con el fin de garantizar la completa fundición del material; posteriormente, el sistema se llevó a temperatura ambiente para introducir los 125 g restantes de indio, completar el llenado del crisol y volver a llevar todo el ensamble a una temperatura de 170 °C. La posible existencia de vacancias entre los gránulos se subsanó sumergiendo de forma repetida el termopozo de grafito en el material fundido.

El termopozo de grafito se introdujo dentro del material de referencia únicamente durante el segundo proceso de llenado. Una vez lleno el crisol con una masa total de 500 g de indio en su interior, se llevó el sistema a temperatura ambiente para ensamblarlo con los demás componentes.

Sistema de medición

El esquema del montaje experimental se muestra en la **figura 3** (Carvajal, 2019). Los datos de resistencia eléctrica se recolectaron mediante el puerto GPIB y se analizaron con el programa LabVIEW 2012 v.12.01 (National Instruments). Los elementos del montaje son los siguientes:

1. Celda de punto fijo de indio
2. Horno de tubo de calor (ISOTECH 17702W)
3. Puente de termometría de precisión MicroK (ISOTECH)
4. Termómetro de resistencia de platino (SPRT) Pt 25.5 Ω (modelo 670, ISOTECH), calibrado según la norma de la EIT-90 desde el punto triple del agua hasta el punto de fusión del galio
5. Programa para la obtención de datos (LabVIEW 2012 v.12.01)
6. Resistores de referencia (modelo CER6000, WIKA)
7. Baño para el mantenimiento de los resistores de referencia (modelo 455, ISOTECH), el cual emplea aceite siliconado para mantener una temperatura controlada de 23 °C.

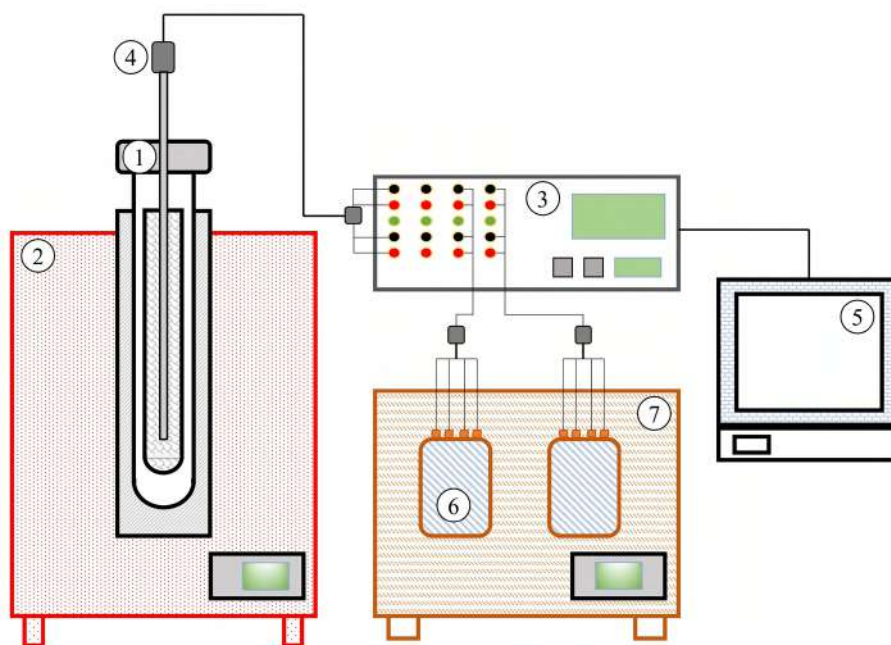


Figura 3. Esquema del sistema de medición de temperatura en la celda de punto fijo

Para el análisis de los datos se definió la siguiente variable:

$$X = \frac{R_{SPRT}}{R_s} \quad (5),$$

siendo R_{SPRT} la resistencia medida por el termómetro de platino y R_s la resistencia de referencia a 23 °C.

Determinación del comienzo y el final de la meseta

Para calcular el valor de la resistencia del SPRT durante el proceso de solidificación, primero hay que determinar los puntos de inicio y final de la meseta (**Figura 1G**). El punto inicial de la meseta corresponde al punto donde la temperatura es máxima después del proceso de recalentamiento o nucleación (**Januarius et al., 2010**). Esto se debe a que el indio se encuentra completamente en estado líquido y se asume que cualquier porción del metal en estado líquido se encuentra a una temperatura mayor que la de la fracción sólida (**Pearce et al., 2013**). Existen tres métodos principales para determinar el punto donde finaliza la transición de fase. Usualmente se hace una extrapolación lineal de los puntos que se encuentran antes y después del cambio de concavidad en la curva de solidificación o fusión, donde el intercepto de estas dos líneas marca el final de la transición de fase (**Pearce et al., 2013**), como se observa en el punto T_e de la **figura 4** (**Krapf & Schalles, 2009**).

El segundo método consiste en monitorear la potencia consumida por el horno, la cual exhibe un cambio abrupto en el momento en que finaliza la transición de fase dentro de la celda (**Yamazawa et al., 2007**).

El tercer método consiste en graficar la diferencia (residuales) entre una función analítica y los puntos experimentales obtenidos al medir la resistencia mediante el SPRT en función del tiempo. El final de la meseta se puede observar como ruido en la gráfica de los residuales (**Pearce et al., 2013**). La función analítica se construye a partir de una interpolación hecha mediante *splines*, la cual permite encontrar un polinomio que suavice el comportamiento de los datos experimentales y sus derivadas (**de Boor C., 1978**), como se observa en las **figuras 5 y 6**.

La curva de interpolación se construyó siguiendo el método de **Drudy (2017)**, el cual utiliza la librería Scikit-Learn de Python para obtener una función analítica a partir de una expansión en funciones de base (para este caso se tomaron polinomios de grado 3) del

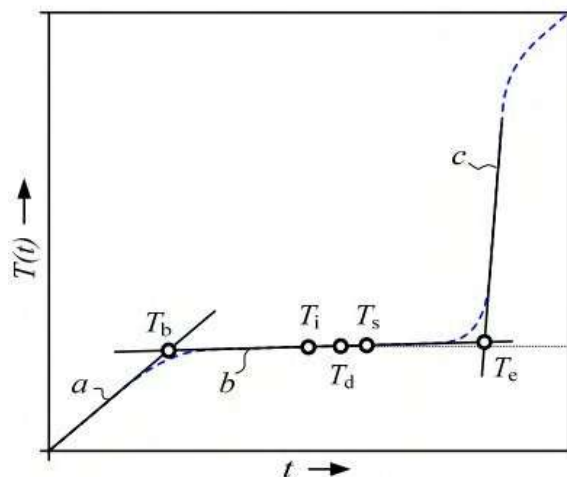


Figura 4. Esquema de una curva de fusión y la estimación de los puntos de inicio y final de la transición de fase. T_b : inicio de la fusión; T_e : final de la fusión; $T_{i,d,s}$: puntos de corte de un polinomio de grado 3 para determinar el valor de la temperatura de fusión; a: interpolación lineal de los puntos antes de la fusión; b: interpolación lineal de los puntos durante la fusión; c: interpolación lineal de los puntos después de la fusión

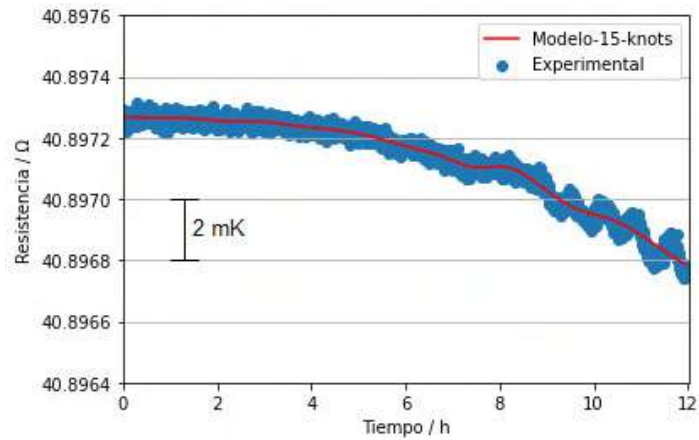


Figura 5. Interpolación mediante *splines* de una curva de solidificación obtenida a partir de la celda de punto fijo de indio

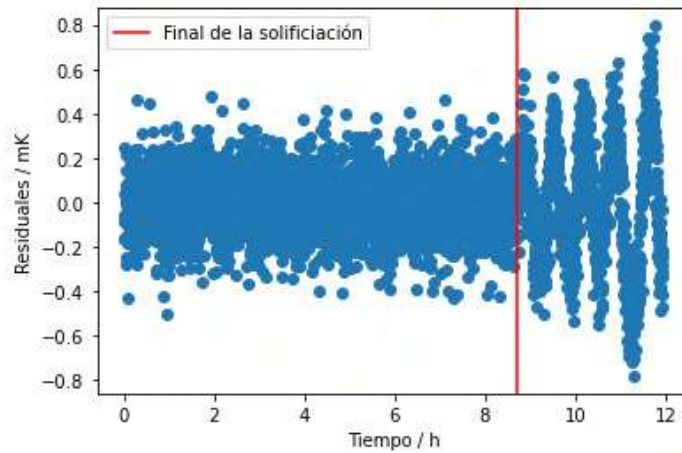


Figura 6. Diferencia entre el valor experimental y la curva construida a partir de la interpolación mediante *splines*. Se observa la presencia de ruido en la gráfica a partir de 8,7 h.

conjunto de datos suministrado. El código depende de un parámetro (*knots*) que define la “suavidad” de la curva de interpolación. Este método permite determinar de manera precisa el final del proceso de solidificación y así establecer la región que contiene la información del valor de temperatura de la transición de fase.

Modelo matemático

Una vez se ha delimitado el conjunto de datos que pertenecen a la meseta, se calcula el valor promedio del cociente numérico X (Ecuación 5) durante la meseta y luego se utiliza el siguiente modelo matemático para determinar la resistencia eléctrica del SPRT:

$$R_i = R_s(T_{bath})[X_i(i = 0) + \Delta X_{INL}] + R_{H2O} \frac{dW_{r,i}}{dT} [\Delta T_{hyd} + \Delta T_p + \Delta T_{imp} + \Delta T_{plateau} + \Delta T_{rep,SPRT} + \Delta T_{hf} + \Delta T_{cert} + \Delta T_{iso} + \Delta T_{rep,PhT}] \tag{6}$$

donde R_i es la resistencia en el punto fijo i ; R_s , el valor de la resistencia patrón a la temperatura del baño (T_{bath}); X, el cociente entre la resistencia medida por el SPRT y el resistor patrón a 0 mA; ΔX_{INL} representa las no-linealidades integrales; R_{H2O} , la resistencia

en el punto triple del agua; W_r , la función de referencia de la ITS-90; ΔT_{hyd} , la corrección debida a la presión hidrostática; ΔT_p , la corrección debida a la presión en el interior de la celda (**Pokhodun et al.**, ; ΔT_{imp} , la corrección debida a las impurezas (**Fellmuth et al.**, 2015); $\Delta T_{rep,SPRT}$, la corrección debida a la repetibilidad del SPRT; ΔT_{hf} , la corrección debida a la inmersión del SPRT; ΔT_{cert} , la corrección debida a la calibración de la celda; ΔT_{iso} , la corrección debida a la composición isotópica (**CCT**, 2017), y $\Delta T_{rep,PhT}$, la corrección debida a la repetibilidad del cambio de fase.

La determinación de la resistencia conjuntamente con las correcciones conlleva la estimación de la incertidumbre de medición correspondiente, la cual se puede obtener aplicando la siguiente ecuación:

$$u^2(W_i) = \frac{1}{R_{H2O}} [u^2(R_i + W_{r,i}^2 u^2(R_{H2O}))] \quad (7),$$

donde $u^2(R_i)$ es la incertidumbre asociada al modelo matemático descrito por la Ecuación 6 y viene dada por:

$$\begin{aligned} u^2(R_i) = & u^2(R_s) X_i^2 (i = 0) + R_s^2 u^2(X_i (i = 0)) + R_s^2 u^2(\Delta X_{INL}) \\ & + \left[R_{H2O} \frac{dW_{r,i}}{dT} \right] [u^2(\Delta T_{hyd}) + u^2(\Delta T_p) + u^2(\Delta T_{imp}) + u^2(\Delta T_{plateau})] \\ & + u^2(\Delta T_{rep,SPRT}) + u^2(\Delta T_{hf}) + u^2(\Delta T_{cert}) + u^2(\Delta T_{iso}) + u^2(\Delta T_{rep,PhT}) \end{aligned} \quad (8).$$

En la Ecuación 8, $u^2(\Delta T_{rep,PhT})$ corresponde a la incertidumbre de medición debida a la reproducibilidad de la transición de fase, la cual debe ser menor al 5 % de la incertidumbre expandida de medición total para concluir que el proceso de llenado y construcción de la celda fue satisfactorio y que no se depositó una cantidad apreciable de impurezas en el material de referencia (**Carvajal**, 2019; **Strouse**, 2008).

Análisis estadístico

Para poder evaluar la incertidumbre de medición asociada a la repetibilidad de la transición de fase por medio de la Ecuación 4, los datos no deben estar autocorrelacionados (**Croarkin & Tobias**, 2013b). La autocorrelación se puede evaluar por medio de un *lag plot*, el cual consiste en graficar el valor del dato Y_i con respecto al dato Y_{i-1} de un conjunto de datos repartidos en intervalos de tiempo determinados (**Croarkin & Tobias**, 2013a). Se dice que el conjunto de datos no está autocorrelacionado cuando muestra una dispersión aleatoria en el *lag plot*. Sin embargo, es necesario que los datos sigan una distribución normal para poder evaluar la autocorrelación utilizando el *lag plot*. Como el número de datos obtenido del valor de la resistencia del punto de solidificación del indio es bastante reducido (menor a 50), es recomendable utilizar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (**Shapiro & Wilk**, 1965). El estadístico de Shapiro-Wilk (S) viene dado por:

$$S = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9),$$

donde $x_{(i)}$ es el i -ésimo dato más pequeño de la muestra y $\bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n}$ es el promedio.

Además, las variables a_i son las componentes del vector, el cual viene dado por:

$$(a_1, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}} \quad (10),$$

donde las entradas del vector m corresponden a los valores esperados del estadístico de orden de variables independientes e idénticamente distribuidas en una distribución normal ($m_i = E[x_{(i)}]$) y V es la matriz de covarianzas del estadístico de orden ($V_{ij} = E[x_{(i)} - m_i][x_{(j)} - m_j]$).

La hipótesis nula en este análisis respondió al hecho de que los datos se distribuyeron normalmente. La hipótesis se rechaza si el valor de S es muy pequeño (S oscila entre 0 y 1)

o si p es menor al nivel de significación (usualmente se toma $\alpha=0,05$) (Shapiro & Wilk, 1965); p hace referencia a la probabilidad de que al tomar un dato éste se distribuya de forma normal.

Resultados

Se realizaron diez curvas de solidificación a lo largo de cuatro meses; el valor promedio de la resistencia durante la meseta después de las correcciones del modelo matemático descrito por la Ecuación 6, y el coeficiente W_i de las mediciones, se encuentran en la **tabla 2**.

Se utilizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los valores de diferencia de resistencia al comienzo y final de la meseta (ΔR_i) que se observan en la **tabla**; se obtuvo un $p = 0,3139 > \alpha = 0,05$ y $W = 0,9134$; como el valor de W fue cercano a 1 y p , mayor al nivel de significación, se puede asumir que los datos se distribuyeron normalmente. Con estos resultados se pudo emplear el *lag plot* para determinar si existió autocorrelación entre los valores de resistencia (**Figura 7**).

Dado que no se apreció ninguna tendencia en el *lag plot*, se puede concluir que se presentó una dispersión aleatoria, por lo que fue posible calcular la incertidumbre asociada a la repetibilidad de la transición de fase mediante la Ecuación 4. En la **tabla 3** se muestran los valores asociados con cada una de las fuentes de incertidumbre representadas en la Ecuación 8, así como su contribución a la incertidumbre expandida de medición.

Tabla 2. Valores registrados de diez mediciones del coeficiente W_i , resistencia del SPRT y diferencia en la resistencia entre el comienzo y el final de la meseta de la celda de punto fijo de indio fabricada

Medición	Fecha	W_i	$R_i (\Omega)$	$\Delta R (m\Omega)$
1	2022-04-05	1,609 604	40,897 048	0,019 848
2	2022-04-12	1,609 605	40,897 074	0,164 473
3	2022-05-13	1,609 608	40,897 150	0,025 465
4	2022-05-18	1,609 607	40,897 124	0,050 103
5	2022-06-22	1,609 611	40,897 226	0,061 390
6	2022-06-23	1,609 612	40,897 252	0,067 604
7	2022-07-07	1,609 612	40,897 252	0,099 373
8	2022-07-22	1,609 611	40,897 226	0,018 783
9	2022-08-03	1,609 613	40,897 277	0,099 503
10	2022-08-04	1,609 611	40,897 226	0,096 300

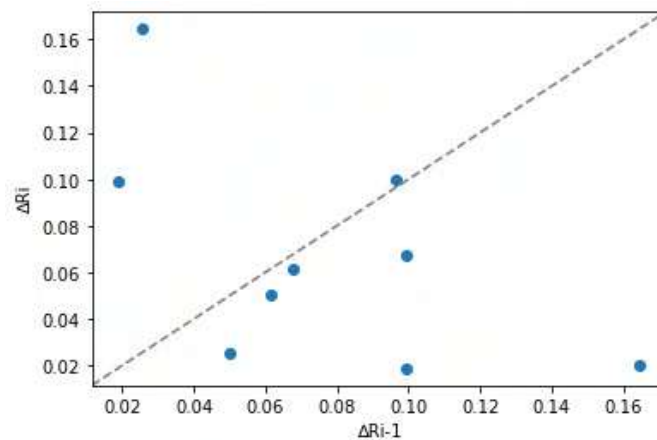


Figura 7. *Lag plot* de los valores registrados en la **Tabla 2** para la diferencia en la resistencia al comienzo y al final de la meseta de diez mediciones distintas realizadas en la celda de punto fijo

Tabla 3. Presupuesto de incertidumbre de medición y su respectiva contribución a la incertidumbre expandida de medición

Medición	$u(mK)$	Contribución %
Resistor de referencia	0,32	9,61
Puente de resistencia	0,03	0,90
Autocalentamiento	0,40	12,01
Impurezas	0,01	0,30
Inmersión	0,87	26,13
Repetibilidad del SPRT	0,13	3,90
Corrección de presión hidrostática	0,04	1,20
Zona de meseta	0,42	12,61
Presión del gas	0,19	5,71
Calibración	0,13	3,90
Composición isotópica	0,00	0,00
Repetibilidad de la transición de fase	0,05	1,50
Propagación del punto triple del agua	0,74	22,22

Discusión

Dado que la contribución a la incertidumbre expandida de medición total debida a la repetibilidad de la transición de fase fue inferior al 5 %, puede concluirse que no se depositaron cantidades significativas de impurezas durante la realización de la celda. No obstante, es necesario hacer curvas de solidificación periódicamente para comprobar que no se han depositado progresivamente impurezas en el material de referencia que se encuentra dentro del crisol de grafito. Por otro parte, la mayor contribución al presupuesto de incertidumbre en la celda construida se debió a la inmersión, pues la profundidad a la cual se introdujo el termómetro SPRT dependió, principalmente, de que la altura del termopozo dentro del crisol no era la óptima. Esta información deberá tenerse presente cuando se diseñen futuras celdas en el INM para asegurar una profundidad óptima del elemento sensor.

El método de interpolación mediante *splines* para determinar el punto final de la curva de solidificación, comparado con el que se basa en el intercepto de interpolaciones lineales (**Figura 4**), tiene mayor precisión, ya que no da lugar a los errores espurios que pueden cometerse en el momento de separar manualmente los puntos ubicados en la meseta. Además, al tener el código implementado, se reduce el tiempo de determinación de los puntos inicial y final de la meseta, los cuales se han venido calculando de forma manual con el método de intercepto de las interpolaciones lineales en el INM. Las perspectivas de este estudio se orientan a hacer una comparación directa de los tres métodos descritos para la determinación del punto final de la curva de solidificación.

Conclusiones

Se diseñó y construyó una celda de punto fijo de indio en el Instituto Nacional de Metrología, lo cual abre paso a futuras investigaciones referentes a la termometría de contacto.

Se determinó la incertidumbre de medición debida a la repetibilidad de la transición de fase de la celda de punto fijo de indio. Al obtener un valor de la contribución a la incertidumbre expandida de medición menor al 5 %, se pudo concluir que el diseño y el proceso de ensamblaje se hicieron de forma satisfactoria.

Se implementó un algoritmo que permite calcular el punto final del proceso de solidificación, el cual tiene mayor precisión que el método de la intercepción de interpolaciones lineales, además de que reduce el tiempo de cálculo de estos dos puntos en la curva de solidificación.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación se realizó en el marco del proyecto Plan de Fortalecimiento del INM como Centro de Investigación (código 9932100271370), financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y realizado conjuntamente entre el INM y la Universidad Nacional de Colombia a través del convenio especial de cooperación 001 de 2020.

Contribución de los autores

JH: diseño del experimento, llenado de la celda, toma y análisis de datos, programación, análisis de resultados, discusión y conclusiones. AB: diseño del experimento, llenado de la celda, toma de datos, revisión de forma y contenido del manuscrito; HC: análisis de resultados, introducción, revisión de forma y contenido del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Carvajal, S. A.** (2019). Desarrollo de un patrón termométrico basado en la solidificación del estaño. Universidad Nacional de Colombia.
- CCT, B.** (2017). Technical annex for the international scale of 1990 (its-90). Editores: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).
- Croarkin, C., Tobias, P.** (2013a). nist/sematech e-handbook of statistical methods, chapter 1.3.3.15. NIST/SEMATECH E-handb. Stat. Methods.
- Croarkin, C., Tobias, P.** (2013b). nist/sematech e-handbook of statistical methods, chapter 7. NIST/SEMATECH E-handb. Stat. Methods.
- de Boor C.** (1978). A practical guide to splines. Springer.
- Drudy, M.** (2017). Basis-expansion. <https://github.com/madrury/basis-expansions.git>. GitHub
- Fellmuth, B., Hill, K., Pearce, J., Peruzzi, A., Steur, P., J.Zhang.** (2015). Fixed points: Influence of impurities. Guide to the Realization of the ITS-90. Editores: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).
- Instituto Nacional de Metrología.** (2019). Misión, visión y creación, objetivo y funciones del INM. <https://inm.gov.co/web/mision-y-vision/> (última revisión 2022-06-20).
- Widiatmo, J.V., Sato, K., Yamazawa, K., Tamba, J., Masaru, A.** (2010). Study on the realization of indium point. *Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 3(3), 178-186.
- Krapf, G., Schalles, M.** (2009). Comparison of different methods of fixed-point temperature evaluation. *IMEKO World Congress, (XIX)*, 1509-1513.
- Lopardo, G., Dematteis, R., Steur, P.P.M.** (2022). Characterization of a new zinc fixed-point cell for its-90 realization. Springer US.
- Pearce, J.V., Veltcheva, R.I., Large, M.J.** (2013). Impurity and thermal modelling of SPRT fixed points. In C. W. Meyer (Ed.), *Temperature: its measurement and control in science and industry, AIP Conference Proceedings*, 1552(1), 283-288. <https://doi.org/10.1063/1.4819554>
- Pokhodun, A., Fellmuth, B., Pearce, J., Rusby, R., Steur, P., Tamura, O., Tew, L., White, D.** (2021). *Guide to the realization of the ITS-90 platinum resistance thermometry*. CCT- BIPM.
- Preston-Thomas, H.** (1989). The international temperature scale of 1990 (its-90). *Metrologia*, 27(1), 3-10.
- Shapiro, S. S., Wilk, M. B.** (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3), 541-611.
- Strouse, G.** (2001). Indium freezing-point standard—SRM1745 and indium DCS melting-point standard —SRM2232. *NIST Special Publication*, 260(132).
- Strouse, G.** (2008). Standard platinum resistance thermometer calibrations from the Ar TP to the Ag FP. *NIST Special Publication*, 250(81).
- Yamazawa K., Widiatmo, J. V., Arai, M.** (2007). Thermal analysis of the heater-induced realization of the tin point. *International Journal Thermophysics*, 28(6), 1941.

Ciencias Naturales

Artículo original

Patrón de riqueza de flora y vegetación del páramo El Romeral - macizo de Santurbán

Richness pattern of flora and vegetation from El Romeral Páramo - Santurbán Massif

✉ Sandra Y. Galván-Carvajal¹, ✉ Nelcy Y. Ortiz-Rodríguez¹, ✉ Jairo Pinto-Zárate^{2,3},
✉ J. Orlando Rangel-Ch.^{3,*}, ✉ Roberto Sánchez⁴

¹ Escuela de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia

² Herbario J.J. Triana, Fundación Trópico Alto, Bogotá, D.C., Colombia

³ Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

⁴ Universidad de Pamplona (Norte de Santander), Colombia

Resumen

A partir de los inventarios detallados del componente vegetal del páramo de El Romeral Cucutilla, Norte de Santander, y California, Santander (07°22'-07°24' N, 72°51'-72°05' W, entre los 3400 y los 3920 m), se registraron 252 especies agrupadas en 157 géneros y 72 familias de plantas con flores, helechos y briófitos. Se encontraron 190 especies de 120 géneros y 45 familias entre las plantas con flores (grupo mayoritario). En la caracterización de la vegetación con enfoque fitosociológico se determinaron la clase *Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietea effusae*, el orden *Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae* y cuatro alianzas. La alianza con mayor número de asociaciones (cuatro) fue *Espeletio conglomeratae-Chusqueion tessellatae*. En la distribución de la vegetación a nivel de alianza se diferenció un patrón de los sitios de suelos húmedos-encharcados asociados con un microclima muy húmedo donde predominó *Chusquea tessellata*, como en las alianzas *Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae* y *Espeletio conglomeratae-Chusqueion tessellatae*. En sitios asociados con fases de transición en la humedad del suelo (áreas bien drenadas) disminuyó la importancia ecológica y la frecuencia de aparición de *Chusquea tessellata*, como en la alianza *Acaeno elongatae-Hypericion phelli*, en tanto que en sitios secos se encontró vegetación de la alianza *Arcytophylo mutici-Calamagrostion effusae*, en la que generalmente están ausentes elementos característicamente ligados a las condiciones de humedad-encharcamiento del suelo. La vegetación era de porte bajo con mayor cubrimiento de los estratos herbáceo (dominante) y rasante. El número total de especies varió entre 26 *Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae* y 37 *Hyperico phelli-Puyetum bicoloris*, sintaxón que igualmente presentó el mayor índice de riqueza (77×10^{-2}).

Palabras clave: Páramo; Fitosociología; Macizo de Santurbán; Flora - vegetación; Riqueza - estructura.

Abstract

From detailed field inventories of the plant component at El Romeral Cucutilla Páramo, Norte de Santander, and California, Santander (07°22'-07°24'N, 72°51'-72°05'W, between 3400 and 3920 m), we recorded 252 species of 157 genera and 72 families of flowering plants, ferns, and bryophytes. We found 190 species of 120 genera and 45 families among flowering plants (the majority group). In the phytosociological characterization of the vegetation, we differentiated the *Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietea effusae* class, the *Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae* order, and four alliances. The alliance with the highest number of associations (four) was *Espeletio conglomeratae-Chusqueion tessellatae*. Regarding vegetation distribution, we observed a pattern of sites with humid, waterlogged soils associated with a very humid microclimate where *Chusquea tessellata* predominated, as in the case of the alliances *Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae* and *Espeletio conglomeratae-Chusqueion tessellatae*. In sites associated with transition phases in soil moisture (well-drained areas), the ecological importance and frequency of appearance of *Chusquea tessellata* decreased, as in the case of the *Acaeno elongatae-Hypericion phelli* alliance while in

Citación: Galván-Carvajal SY, Ortiz-Rodríguez NY, Pinto-Zárate J, et al. Patrón de riqueza vegetal (flora y vegetación) del páramo El Romeral-macizo de Santurbán. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):281-300, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1872>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Jesús Orlando Rangel Churio;
jorangelc@gmail.com

Recibido: 22 de febrero de 2023

Aceptado: 14 de abril de 2023

Publicado en línea: 25 de abril de 2023



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

dry sites, elements linked to moisture-waterlogged soils (*Chusquea* and *Cortaderia* species) were generally absent, as in the case of the *Arcytophylo mutici-Calamagrostion effusae* alliance. The vegetation was low with greater coverage of the herbaceous (dominant) stratum. The total number of species varied between 26 *Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae* and 37 *Hyperico phelli-Puyetum bicoloris*, a syntaxon that also presented the highest richness index (77x10⁻²).

Keywords: Paramo; Phytosociology; Santurbán massif; Flora - vegetation; Richness - structure.

Introducción

Al extremo norte de los Andes colombianos, entre los departamentos de Santander y Norte de Santander, se eleva el complejo de páramos Jurisdicciones-Santurbán-Berlín, el cual constituye la divisoria de aguas natural entre los departamentos de Norte de Santander y Santander y alcanza las máximas elevaciones del extremo norte de la cordillera Oriental, con sectores como Morro Nevado y la cuchilla Salados donde se presenta una franja reducida característica del superpáramo inferior (*ca.* 4000-4200 m).

En sus alrededores se encuentra el páramo El Romeral, ubicado bajo jurisdicción de los municipios de Cucutilla y California (07°22'-07°24'N, 72°51'-72°05'W), en las franjas del subpáramo y el páramo medio (3470-3920 m) de los valles de las quebradas Romeral y Páez, afluentes de los ríos Cucutilla-Zulia y La Baja-Suratá, los cuales surten tanto al municipio de Cucutilla como al área metropolitana de Bucaramanga (**Figura 1**).

Entre las menciones iniciales sobre la vegetación de estas localidades paramunas figuran las de **Cuatrecasas** (1934, 1958), **Cleef** (1981) y la síntesis de **Rangel** (2018). Asimismo, sirven como referencias apropiadas las caracterizaciones florísticas integrales (flora, vegetación) de localidades cercanas realizadas por **Sturm & Rangel** (1985),

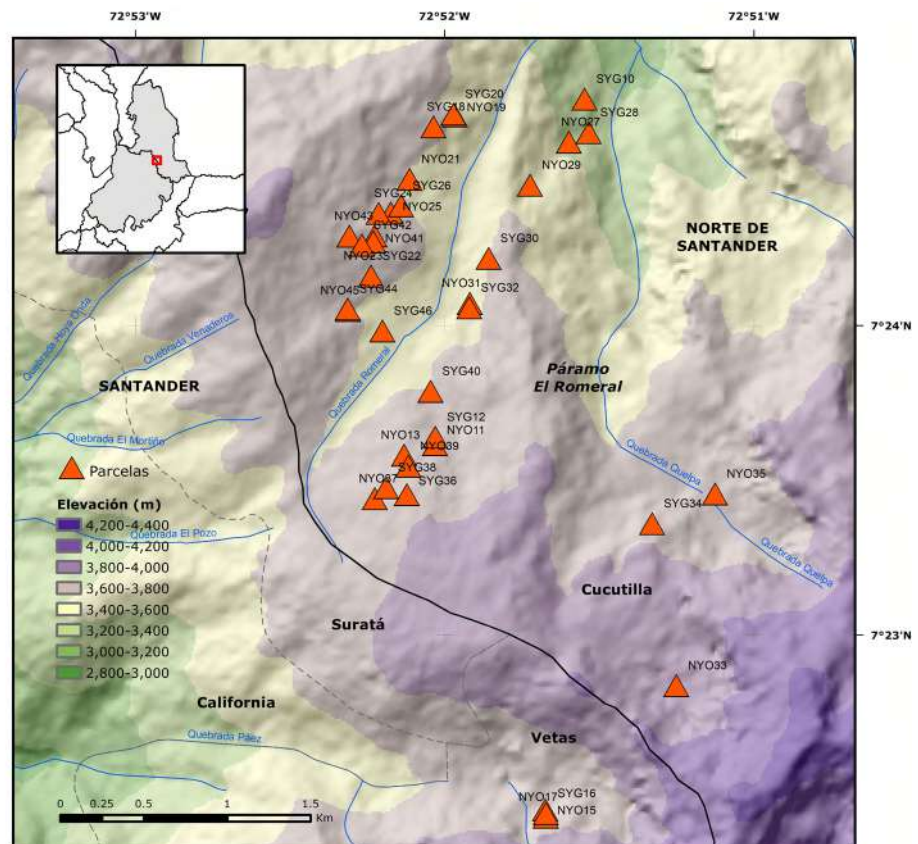


Figura 1. Localización del área de estudio y de los puntos de muestreo

Rangel & Sturm (1995), **Hernández** (2002), y **Hernández & Rangel** (2003), que presentan aspectos generales sobre los tipos de vegetación del área bajo estudio (chuscales, matorrales, pajonales y combinaciones). Debido al interés económico por la explotación de minerales en los últimos años, la región del nudo de Santurbán ha sido objeto de numerosas evaluaciones en el marco de estudios ambientales de consultorías privadas orientados al sustento jurídico de las propuestas mineras, pero son pocos los aportes de rigor académico sobre la flora y la vegetación regionales que estén disponibles para la comunidad científica y el público general. En el caso particular de Sisavita figuran las contribuciones de **Córdoba et al.** (2002) desarrollada por el Grupo de Exploración y Monitoreo Ambiental – GEMA del Instituto Alexander von Humboldt.

Con el propósito de aportar al conocimiento del patrón de riqueza del componente vegetal regional (flora y vegetación), en el presente estudio se presentan resultados sobre la riqueza y la diversidad de las plantas con flores, de varios grupos no vasculares y de las unidades vegetales definidas. Las fuentes básicas fueron las herborizaciones y los análisis florísticos (inventarios detallados, **Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1872/3358>) adelantados por Sandra Y. Galván (SYG) y Nelsy Ortiz (NOR). Los análisis y tratamientos fitosociológicos posteriores fueron fruto de la colaboración entre las universidades Industrial de Santander y Nacional de Colombia y su grupo de investigación en biodiversidad y conservación en el Instituto de Ciencias Naturales.

Metodología

La fase de exploración botánica se adelantó entre abril de 2001 y febrero de 2002 (**Galván & Ortiz**, 2003). Los sitios de muestreo se eligieron con base en la homogeneidad fisionómica, procurando no incluir áreas con marcados rastros de intervención humana (ganadería, agricultura, minería artesanal). Las superficies de muestreo se delimitaron de manera precisa y comprendieron desde 16 m² en los pajonales hasta 25 y 50 m² en los frailejonales y matorrales. Entre los parámetros ecológicos utilizados en el censo figuraron la estratificación (**Rangel & Lozano**, 1986) y la cobertura (%) estimada como la proyección del área cubierta por el individuo sobre la superficie del área de inventario. Las observaciones adicionales cubrieron aspectos de la inclinación del terreno, las condiciones de humedad del sustrato, la altitud y la influencia antrópica. El material herborizado se determinó y depositó en el herbario de la Universidad Industrial de Santander, y se enviaron duplicados a los herbarios de la Universidad de Pamplona y al Nacional Colombiano (COL). En la revisión y actualización de la nomenclatura la fuente de homologación fueron las bases Trópicos (www.tropicos.org.co) y Taxonomic Name Resolution Service (<https://tnrs.biendata.org/#>). También se revisó la información del Herbario Nacional Colombiano en línea (<http://www.biovirtual.unal.edu.co/es/colecciones/search/plants>).

En la clasificación fitosociológica se utilizó el programa Twispaan (**McCune & Mefford**, 1999). La fidelidad se estimó de acuerdo con la escala de Szafer y Pawloski de 1934 (**Braun-Blanquet**, 1979). Para la descripción de las unidades de vegetación se siguió la recomendación del Código Internacional de Nomenclatura Fitosociológica (**Izco & del Arco**, 2003; **Theurillat et al.**, 2020).

Resultados

Patrón de riqueza de la flora

De los inventarios detallados se obtuvieron registros de 252 especies de 157 géneros y 72 familias de plantas con flores, helechos y briófitos.

Se encontraron 190 especies de 120 géneros y 45 familias de plantas con flores. Las familias con mayor número de géneros y especies fueron Asteraceae (25 gen. / 36 sp.) Poaceae (12/22), Rosaceae (6/18), Ericaceae (7/9) y Apiaceae (5/8). Otras familias y sus valores de riqueza aparecen en la **tabla 1**. Entre los géneros con mayor número de especies figuraron *Lachemilla* (10 sp.), *Hypericum* (9), *Agrostis* (5), *Carex* (4) y *Baccharis* (4). En la **tabla 1** se mencionan otros géneros y su número de especies.

Tabla 1. Patrón de riqueza de las familias y los géneros más diversificados del páramo El Romeral

Familia	Número de géneros	Número de especies	Género	Número de especies
Asteraceae	25	36	<i>Lachemilla</i>	10
Poaceae	12	22	<i>Hypericum</i>	9
Rosaceae	6	18	<i>Agrostis</i>	5
Ericaceae	7	9	<i>Carex</i>	4
Apiaceae	5	8	<i>Baccharis</i>	4
Melastomataceae	5	8	<i>Pentacalia</i>	4
Rubiaceae	3	5	<i>Valeriana</i>	4
Orobanchaceae	2	4	<i>Castilleja</i>	3
Cyperaceae	4	8	<i>Plantago</i>	3
Hypericaceae	1	8	<i>Chaetolepis</i>	3
Bromeliaceae	3	5	<i>Ageratina</i>	3
Gentianaceae	2	3	<i>Calamagrostis</i>	3
Plantaginaceae	5	8	<i>Aragoa</i>	2
Caprifoliaceae	1	4	<i>Ranunculus</i>	2
Solanaceae	2	2	<i>Arcytophyllum</i>	2
Suma de las 15 familias	83 (70 %)	148 (80 %)	Suma de los 15 géneros	61 (32%)
Resto de familias (30)	37 (30 %)	42 (20 %)	Resto de géneros (105)	129 (68%)
Total 45 familias	120	190	Total 120 géneros	190

En helechos y afines se registraron 16 especies de nueve géneros y ocho familias. En líquenes se encontraron cuatro especies de tres géneros y dos familias. En musgos se registraron 28 especies de once géneros y ocho familias y en hepáticas, 14 especies de diez géneros y nueve familias.

Unidades de vegetación

Los análisis realizados permitieron el agrupamiento de los diferentes levantamientos en unidades sintaxonómicas. A nivel de las asociaciones, estas se encuentran definidas por características como sus rasgos fisionómicos y su composición florística (estructura-riqueza).

Aspectos de la estructura

Cobertura. En la **tabla 2** aparecen los valores de la cobertura (%) según estratos en las asociaciones definidas. Un estrato arbustivo se manifestó en los chuscales *Hyperico phelli-Chusqueetum tessellatae* y *Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae* y en el frailejónal-pajonal *Calamagrostio effusae-Espeletietum canescentis*. El estrato herbáceo era vigoroso y dominante en la mayoría de las asociaciones (excepto en los chuscales) y el estrato rasante cubría entre el 10 y el 50 % de la superficie de muestreo en las diferentes asociaciones.

Riqueza. En la **tabla 2** se muestra la variación en el número de especies según los levantamientos o inventarios de campo: El mayor valor (37) se encontró en las asociaciones *Hyperico phelli-Puyetum bicoloris* y *Plantagino linearis-Cortaderietum hapalotrichae*. En el índice de riqueza (número total de especies/área total de inventario), la mayor expresión (77×10^{-2}) correspondió a *Hyperico phelli-Puyetum bicoloris*.

Tabla 2. Aspectos de la riqueza y de la estructura de las asociaciones del páramo El Romeral

Asociación	Número de levantamientos	Área (m ²)	Variación en número de especies	Número total de especies	i. Riqueza x10 ⁻²	Cobertura (%)		
						Arbustivo	Herbáceo	Rasante
<i>Hyperico phelli-Puyetum bicoloris</i>	3	48	12-25	37	77	No	70	30
<i>Lachemillo orbiculatae-Hypericetum phelli</i>	4	200	14-20	34	17	No	55	50
<i>Hyperici phelli-Chusqueetum tessellatae</i>	3	48	15-20	34	71	75	6	20
<i>Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae</i>	3	48	14-22	26	54	58	1	41
<i>Chusqueo tessellatae-Puyetum bicoloris</i>	5	80	12-20	29	36	No	90	30
<i>Plantagino linearis-Cortaderietum hapalotrichae</i>	5	89	8-22	37	42	No	75	30
<i>Arcytophylo mutici-Espeletietum conglomeratae</i>	5	125	11-17	35	28	No	85	25
<i>Arcytophylo mutici-Espeletietum funckii</i>	3	75	17-20	29	39	No	75	30
<i>Plantagino sericeae-Calamagrostietum effusae</i>	5	80	13-19	33	41	No	60	40
<i>Calamagrostio effusae-Espeletietum canescentis</i>	4	100	21-22	35	35	40	60	10

A continuación se describen las unidades de vegetación caracterizadas, diferenciadas.

Clase *Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietea effusae* (Tabla 3). La clase fue propuesta por **Rangel & Arellano (2019)** e incluye las comunidades secas de la alta montaña de Perijá, abarcando frailejonales, matorrales, chuscales-matorrales y chuscales-frailejonales con matrices de pajonales de *Calamagrostis effusa*.

Orden *Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae* ord. nov. en esta contribución (Tabla 3)

Typus: Acaeno elongatae-Hypericion phelli

Fisionomía-composición: matorrales-chuscales, en ocasiones fue posible diferenciar un estrato arbustivo representado por *Chusquea tessellata*, *Vaccinium floribundum*, *Linochilus rosmarinifolius* y especies de *Hypericum*. El estrato herbáceo estaba dominado por *Calamagrostis effusa* acompañado por *Orthrosanthus chimboracensis*, *Geranium santanderiense* y *Cortaderia cf. hapalotricha*.

Especies características-diagnósticas: *Chusquea tessellata*, *Halenia asclepiadea*, *Geranium santanderiense*, *Breutelia cf. subdisticha*, *Hieracium frigidum* y *Geranium sibaldioides*.

En la vegetación se registró la presencia constante de *Vaccinium floribundum* acompañado de *Chusquea tessellata* e *Hypericum phellos*. En el orden se agruparon matorrales-herbazales con elevada representación de especies de Rosaceae (géneros *Acaena*, *Lachemilla*) y rosetales dominados por especies de *Puya*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal; en áreas planas, laderas, y abrigos rocosos entre los 3500 y los 3900 m de altitud.

Tabla 3. Composición florística de la clase *Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietaea effusae*, del orden *Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae* y de la alianza *Acaeno elongatae-Hypericion phelli* en el páramo El Romeral (N. Santander)

Clase <i>Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietaea effusae</i>							
Orden <i>Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae</i>							
Alianza <i>Acaeno elongatae-Hypericion phelli</i>							
	<i>Lachemillo orbiculatae-Hypericetum phelli</i>				<i>Hyperico phelli-Puyetum bicoloris</i>		
Área (m ²)	50	50	50	50	16	16	16
Altitud (m)	3700	3600	3600	3600	3700	3600	3600
Levantamiento original	NOR43	SYG46	SYG12	NOR37	SYG22	NOR39	NOR13
Cobertura (%)							
Clase <i>Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietaea effusae</i>							
<i>Vaccinium floribundum</i>	0,5	0,5	0,5			0,5	0,5
<i>Calamagrostis effusa</i>	0,3				3,6		
<i>Orthrosanthus chimboracensis</i>	0,3	1,2	0,4				0,8
Orden <i>Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae</i>							
<i>Chusquea tessellata</i>					4	6	2
<i>Halenia asclepiadea</i>	0,3						
<i>Geranium santanderiense</i>		0,3			0,3		0,4
<i>Breutelia cf. subdisticha</i>	2,4			2,8		6,1	
<i>Hieracium frigidum</i>	0,3	0,3		0,4	0,3		
<i>Geranium sibbaldioides</i>	0,3	0,3	0,4	0,4		4,1	4,2
Alianza <i>Acaeno elongatae-Hypericion phelli</i>							
<i>Hypericum phellos</i>	36	1	51	45	7	2	3
<i>Paspalum hirtum</i>	0,3	4,7	0,4	0,4		0,3	
<i>Acaena elongata</i>	0,5	1	0,5	0,5		2	0,5
<i>Carex pygmaea</i>	1		0,4	18	0,3		
<i>Bidens andicola</i>	0,3			0,4	12	0,3	
<i>Muhlenbergia ligularis</i>	0,3						17
<i>Cortaderia cf. hapalotricha</i>	1,2			5,6	0,3		
<i>Cerastium arvense</i>		0,3	0,4			0,3	0,4
<i>Galium hypocarpium</i>		0,3				0,3	
<i>Ribes sp.</i>				0,4		0,3	
<i>Lachemilla andina</i>		0,3					0,4
<i>Nertera granadensis</i>				0,4		1,4	
<i>Stellaria recurvata</i>				0,4		0,3	
Asociación <i>Lachemillo orbiculatae-Hypericetum phelli</i>							
<i>Lachemilla orbiculata</i>	12	23	35	11		0,3	
<i>Oxylobus glandulifer</i>	0,3	1,2		0,4			
<i>Aciachne acicularis</i>	18	5,8					
<i>Lachemilla hispidula</i>		1,2	0,4	0,4			
<i>Rumex acetosella</i>		0,3	0,4				
<i>Anthoxanthum odoratum</i>			0,4	0,4			

Clase <i>Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietea effusae</i>							
Orden <i>Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae</i>							
Alianza <i>Acaeno elongatae-Hypericion phelli</i>							
	<i>Lachemillo orbiculatae-Hypericetum phelli</i>				<i>Hyperico phelli-Puyetum bicoloris</i>		
Área (m²)	50	50	50	50	16	16	16
Altitud (m)	3700	3600	3600	3600	3700	3600	3600
Levantamiento original	NOR43	SYG46	SYG12	NOR37	SYG22	NOR39	NOR13
Cobertura (%)							
Asociación <i>Hyperico phelli-Puyetum bicoloris</i>							
<i>Puya bicolor</i>					52	41	63
<i>Halenia campanulata</i>				2,8	4	8	2
<i>Niphogeton ternata</i>					1,8	0,3	0,4
<i>Disterigma empetrifolium</i>					0,3	1,4	
<i>Linochilus rosmarinifolius</i>				3		0,5	1
<i>Marchantia</i> sp.						14	0,4
<i>Thuidium delicatulum</i>			0,4			0,3	0,4
Otras especies presentes							
<i>Galium</i> sp.						0,3	
<i>Hypericum carinosum</i>							0,4
<i>Equisetum bogotense</i>				0,4			
<i>Elaphoglossum engelii</i>						8,2	
<i>Epilobium denticulatum</i>						0,3	
<i>Hypericum juniperinum</i>		33					
<i>Hesperomeles</i> cf. <i>obtusifolia</i>			0,4				
<i>Hydrocotyle bonplandii</i>				0,4			
<i>Werneria pygmaea</i>							3,4
<i>Carex bonplandii</i>							0,4
<i>Rubus acanthophyllos</i>							
<i>Valeriana quindensis</i>						2	
<i>Escallonia myrtilloides</i>							0,4

Alianza *Acaeno elongatae-Hypericion phelli* all. nov. en esta contribución (Tabla 3)

Typus: Lachemillo orbiculatae-Hypericetum phelli

Fisionomía-composición: la vegetación de la alianza agrupa chuscales de *Chusquea tessellata*, matorrales bajos de *Hypericum phellos* y rosetales de *Puya bicolor*. No se diferenció un estrato arbustivo. En el herbáceo, con una cobertura promedio de 65 %, dominaron *Hypericum phellos*, *Cortaderia* cf. *hapalotricha* y *Acaena elongata*. El estrato rasante incluía diversos elementos de baja cobertura, entre los cuales figuraban *Carex pygmaea*, *Paspalum hirtum*, *Geranium siboldioides*, *Cerastium arvense*, *Hieracium frigidum* y *Bidens andicola*.

Especies características-diagnósticas: *Hypericum phellos*, *Paspalum hirtum*, *Acaena elongata*, *Carex pygmaea*, *Bidens andicola*, *Muhlenbergia ligularis*, *Cortaderia* cf. *hapalotricha*, *Cerastium arvense*, *Galium hypocarpium*, *Lachemilla andina*, *Nertera granadensis* y *Stellaria recurvata*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral, entre los 3600 y los 3700 m, en sectores planos en los alrededores de lagunas y en sitios ligeramente inclinados.

Asociación *Lachemilla orbiculatae-Hypericum phelli* ass. nov. en esta contribución (Tabla 3) (Figura 2A).

Typus: SYG12

Fisionomía-composición: matorral-herbazal con un estrato herbáceo y una cobertura promedio de 55 %, dominado por *Hypericum phellos*, *Vaccinium floribundum* y *Acaena elongata*. En el estrato rasante, con cobertura promedio de 50 %, dominaban *Lachemilla orbiculata*, *Lachemilla hispidula*, *Oxylobus glandulifer*, *Paspalum hirtum*.

Especies diagnósticas: *Lachemilla orbiculata*, *Aciachne acicularis*, *Lachemilla hispidula*, *Oxylobus glandulifer*, *Paspalum hirtum* y *Acaena elongata*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal, cabecera del valle de la quebrada Romeral, laderas sobre las vertientes E y W, ca. 3570-3820 m. Se establecen en laderas pendientes sobre sustratos bien drenados, propios del páramo medio (ca. 3570-3820 m).

Asociación *Hyperico phelli-Puyetum bicoloris* ass. nov. en esta contribución (Tabla 3)

Typus: NOR39

Fisionomía-composición: rosetal-matorral con un estrato herbáceo dominado por *Puya bicolor* (cobertura promedio de 52 %) junto con *Chusquea tessellata*, *Hypericum phellos*, *Halenia campanulata* y *Niphogeton ternata*. En el estrato rasante, *Disterigma empetrifolium*, *Cerastium arvense*, *Geranium santanderiense* y *Geranium sibbaldioides*. Entre las briofitas figuraban *Breutelia* cf. *subdisticha*, *Thuidium delicatulum* y especies de *Marchantia*.

Especies diagnósticas: *Halenia campanulata*, *Niphogeton ternata*, *Thuidium delicatulum*, *Linochilus rosmarinifolius*, *Puya bicolor*, *Disterigma empetrifolium*.

Especies características-dominantes: *Hypericum phellos*, *Chusquea tessellata*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal, cabecera del valle de la quebrada Romeral. Sitios planos muy húmedos, en ocasiones encharcados, entre los 3600 y los 3700 m.

Alianza *Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae* all. nov. en esta contribución (Tabla 4)

Typus: *Hyperici phelli-Chusqueetum tessellatae*

Fisionomía-composición: chuscales-herbazales y chuscales-matorrales. En el estrato arbustivo, con cobertura promedio de 75 %, dominaba *Chusquea tessellata*, cuyas cañas pueden alcanzar 1,6 m de altura; entre las especies asociadas figuró *Vaccinium floribundum*. El estrato herbáceo era de escaso cubrimiento (3 %); aparecían *Hypericum carinosum*, *Hieracium frigidum*, *Hypericum carinosum* y *Epilobium denticulatum*. En el estrato rasante, con cobertura promedio de 30 %, aparecían *Carex pygmaea*, *Nertera grandensis*, *Galium hypocarpium*, *Paspalum hirtum* y *Lachemilla orbiculata*.

Especies diagnósticas: *Carex pygmaea*, *Nertera grandensis*, *Galium hypocarpium*, *Hypericum carinosum*, *Paspalum hirtum* y *Geranium sibbaldioides*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal; vereda Morquecha, alrededores de la laguna El Toro; cerca de la laguna Quelpa, entre los 3570 y los 3900 m. Se establece en sitios planos, húmedos y alrededor de las lagunas.

Asociación *Hyperici phelli-Chusqueetum tessellatae* ass. nov. en esta contribución (Tabla 4)

Typus: SYG36

Fisionomía-composición: chuscal-matorral con un estrato arbustivo y cobertura de 75 % dominado por *Chusquea tessellata*. En el estrato herbáceo con cobertura de 6 % aparecían *Equisetum bogotense*, *Hieracium frigidum*, *Hypericum phellos*, *Acaena elongata*

y *Monnina aestuans*. En el estrato rasante, con cobertura promedio de 20 %, se encontraron *Nertera grandensis*, *Bidens andicola*, *Galium hypocarpium*, *Geranium sibbaldioides* y *Stellaria recurvata*.

Especies diagnósticas: *Hypericum phellos*, *Equisetum bogotense*, *Bidens andicola*, *Monnina aestuans*, *Elaphoglossum engelii*, *Acaena elongata* y *Stellaria recurvata*.

Distribución-ecología: se establece en laderas inclinadas, suelos secos-semihúmedos, entre los 3600 y los 3700 m.

Tabla 4. Composición florística de la clase *Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietea effusae*, del orden *Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae* y de la alianza *Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae* en el páramo El Romeral (N. Santander)

Clase <i>Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietea effusae</i>						
Orden <i>Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae</i>						
Alianza <i>Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae</i>						
	<i>Hyperici phelli-Chusqueetum tessellatae</i>			<i>Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae</i>		
Área (m²)	16	16	16	16	16	16
Altitud (m)	3600	3600	3600	3700	3600	3600
Levantamiento original	SYG36	NOR11	SYG38	SYG34	NOR35	SYG40
Cobertura (%)						
Clase <i>Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietea effusae</i>						
<i>Vaccinium floribundum</i>	0,4			0,3	0,3	0,4
<i>Orthrosanthus chimboracensis</i>	0,4					
Orden <i>Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae</i>						
<i>Chusquea tessellata</i>	78	67	52	57	58	55
<i>Halenia asclepiadea</i>				0,4		
<i>Geranium santanderiense</i>	1,7				1,3	1,3
<i>Breutelia</i> cf. <i>subdisticha</i>				7,6	7,6	9,5
<i>Hieracium frigidum</i>	0,4	0,4		0,3	0,3	0,4
<i>Geranium sibbaldioides</i>	3	17		20	19	2
Alianza <i>Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae</i>						
<i>Carex pygmaea</i>	1	2		2	2	5
<i>Nertera granadensis</i>	0,5	0,5	3	0,5	0,5	5
<i>Galium hypocarpium</i>	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	
<i>Hypericum carinosum</i>	0,5	0,5			0,5	0,5
<i>Paspalum hirtum</i>			5,2	0,5	0,5	5
<i>Lachemilla orbiculata</i>			10	9	9	
<i>Oxalis corniculata</i>	0,4				0,4	
<i>Conyza</i> sp.	0,4				0,4	
<i>Halenia campanulata</i>			1	2,4		
<i>Linochilus rosmarinifolius</i>	15		5			
<i>Epilobium denticulatum</i>			0,4	0,4		
<i>Muhlenbergia ligularis</i>			0,4	2		
<i>Cerastium arvense</i>			0,5			
<i>Galium hypocarpium</i>	0,5		0,5			

Clase <i>Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietaea effusae</i>						
Orden <i>Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae</i>						
Alianza <i>Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae</i>						
	<i>Hyperici phelli-Chusqueetum tessellatae</i>			<i>Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae</i>		
Área (m²)	16	16	16	16	16	16
Altitud (m)	3600	3600	3600	3700	3600	3600
Levantamiento original	SYG36	NOR11	SYG38	SYG34	NOR35	SYG40
Cobertura (%)						
Asociación <i>Hyperici phelli-Chusqueetum tessellatae</i>						
<i>Hypericum phellos</i>	0,4	2	2			
<i>Equisetum bogotense</i>	0,4	0,5	0,5			
<i>Bidens andicola</i>	0,4		1			
<i>Acaena elongata</i>		0,5	0,5			
<i>Monnina aestuans</i>	3	10				
<i>Elaphoglossum engelii</i>	3	0,5				
<i>Stellaria recurvata</i>	0,4	0,5				
Asociación <i>Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae</i>						
<i>Lachemilla moritziana</i>				0,3	0,3	0,4
<i>Niphogeton ternata</i>				1,3	1,3	0,4
Otras especies presentes						
<i>Puya bicolor</i>			3			
<i>Marchantia</i> sp.		0,5				
<i>Oxylobus glandulifer</i>						0,4
<i>Anthoxanthum odoratum</i>			0,4			
<i>Lachemilla andina</i>		0,5				
<i>Hesperomeles</i> cf. <i>obtusifolia</i>	5					
<i>Ribes</i> sp.	0,5					
<i>Hydrocotyle bonplandii</i>			0,5			
<i>Werneria pygmaea</i>						3
<i>Carex bonplandii</i>						0,5
<i>Rubus acanthophyllos</i>		0,5				

Asociación *Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae* ass. nov. en esta contribución **tabla 4**

Typus: SYG34

Fisionomía-composición: chuscal-herbazal, con un estrato arbustivo con cobertura de 58 % dominado por *Chusquea tessellata*. El estrato herbáceo era muy pobre, y estaba representado por *Hieracium frigidum* y *Niphogeton ternata*.

Especies diagnósticas: *Lachemilla moritziana* y *Niphogeton ternata*.

Distribución-ecología: se establece en sitios planos, húmedos, entre los 3600 y los 3700 m.

Alianza *Espeletio conglomeratae-Chusqueion tessellatae* all. nov. en esta contribución (**Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1872/3358>)

Typus: *Arcytophylo mutici-Espeletietum conglomeratae*

Fisionomía-composición: en la vegetación de la alianza se incluyen chuscales-rosetales dominados por *Puya bicolor*, cortaderales-herbazales de *Cortaderia* cf. *hapalotricha*, frailejonales-herbazales de *Espeletia conglomerata* y matorrales de *Linochilus floribundus*. Un estrato arbustivo se diferenció solamente en el matorral de *L. floribundus*. En el estrato herbáceo muy vigoroso, con 80 % de cobertura, dominaban *Calamagrostis effusa*, *Cortaderia* cf. *hapalotricha*, *Espeletia conglomerata*, *Hypericum juniperinum*, *Chusquea tessellata* y *Vaccinium floribundum*. En el estrato rasante, con 30 % de cobertura, las especies más frecuentes fueron *Geranium santanderiense*, *Juncus echinocephalus*, *Oritrophium peruvianum*, *Eryngium humile*, *Hypochaeris sessiliflora* y *Sphagnum* cf. *magellanicum*.

Especies diagnósticas: *Espeletia conglomerata*, *Sphagnum* cf. *magellanicum*, *Juncus echinocephalus*, *Oreobolus goeppingeri*, *Hypericum juniperinum*, *Hypericum mexicanum*, *Arcytophyllum nitidum*, *Eryngium humile*, *Oritrophium peruvianum*, *Phlegmariurus riobambensis*, y *Disterigma empetrifolium*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal, cabecera del valle de la quebrada Romeral, laderas sobre las vertientes E y W, ca. 3560-3790 m; *ibid.*, valle de la quebrada Quelpa, ladera sobre la vertiente W, ca. 3440-3510 m; *ibid.*, sector Sisavita, ca. 3440-3550 m; *ibid.*, vereda Morquecha, alrededores de la laguna El Pico, costado SE, ca. 3810-3870 m. Santander, municipio Vetás, PNR Páramo de Santurbán, páramo El Romeral: vereda Móngora, terraza al ESE de las lagunas Páez, sobre laderas a los costados NE y W, ca. 3600-3700 m. Se establece en sectores desde planos hasta inclinados de laderas y en alrededores de lagunas y corrientes de agua sobre sustratos bien o regularmente drenados, y se distribuye entre el subpáramo y el páramo medio (3350 a 3900 m).

Asociación *Chusqueo tessellatae-Puyetum bicoloris* ass. nov. en esta contribución (Tabla 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1872/3358>)

Typus: SYG26

Fisionomía-composición: rosetal-chuscal con un estrato herbáceo de vigoroso crecimiento y 90 % de cobertura promedio, en el cual dominaban *Puya bicolor*, *Calamagrostis effusa*, *Chusquea tessellata* y *Cortaderia* cf. *hapalotricha*. En el estrato rasante, con 30 % de cobertura, fueron frecuentes *Geranium santanderiense*, *Juncus echinocephalus*, *Sphagnum* cf. *magellanicum* y *Halenia asclepiadea*.

Especies diagnósticas: *Calamagrostis* sp.3, *Puya bicolor* y *Parablechnum loxense*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: veredas Carrizal y Móngora, y alrededor de la laguna Páez, entre los 3500 y los 3770 m. Se establece en sectores planos de laderas sobre suelos con drenaje regular a bueno. El tinajo de páramo (*Agouti taczanowskii*) consume los tallos de *Puya bicolor*.

Asociación *Plantago linearis-Cortaderietum hapalotrichae* ass. nov. en esta contribución (Tabla 2S <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1872/3358>) (Figura 2B)

Typus: SYG44

Fisionomía-composición: herbazal-cortaderal con un estrato herbáceo dominado por *Cortaderia* cf. *hapalotricha* (cob. prom. 60 %), *Calamagrostis effusa*, *Espeletia conglomerata* e *Hypericum* sp. En el estrato rasante, con 20 % de cobertura, dominaban *Oritrophium peruvianum*, *Oreobolus goeppingeri*, *Geranium santanderiense*, *Juncus echinocephalus* y *Plantago linearis*.

Especies diagnósticas: *Agrostis bacillata*, *Sisyrinchium tinctorium*, *Plantago linearis* y *Neobartsia santolinifolia*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal, entre los 3680 y los 3790 m. Se establece en sitios húmedos y en las orillas de riachuelos y quebradas (Figura 2B).

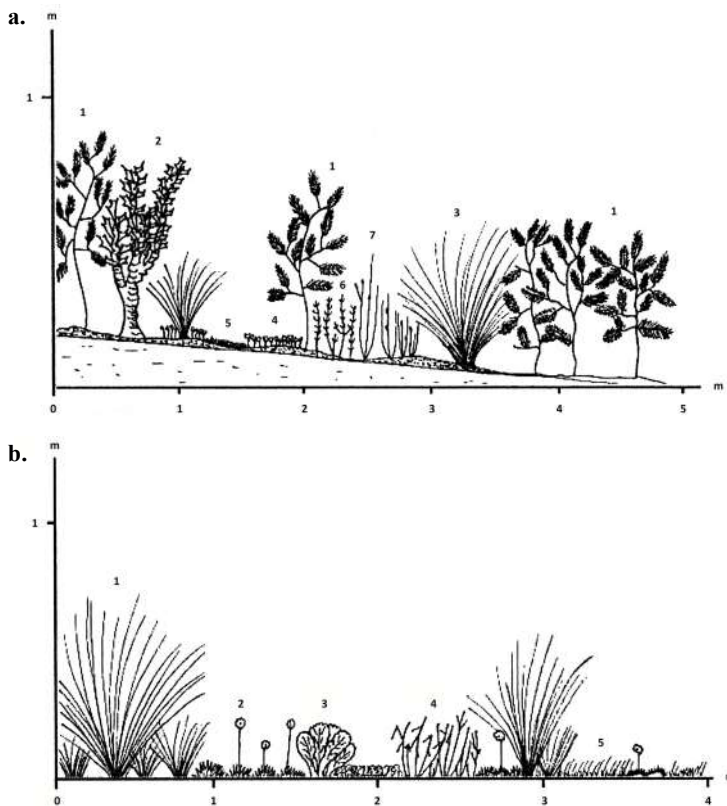


Figura 2. Perfil fisionómico de las asociaciones: A. *Lachemillo orbiculatae*-*Hypericetum phelli*. B. *Plantagino linearis*-*Cortaderietum hapalotrichae*

Asociación *Arcytophylo mutici-Espeletietum conglomeratae* ass. nov. en esta contribución (Tabla 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1872/3358>) (Figura 3A)

Typus: NOR33

Fisionomía-composición: frailejonal-matorral con un estrato herbáceo de crecimiento muy vigoroso con 85 % de cobertura promedio aportado por *Espeletia conglomerata* (cob. prom. 40 %), *Chusquea tessellata*, *Vaccinium floribundum*, *Orthrosanthus chimboracensis* y *Calamagrostis effusa*. En el estrato rasante, con 25 % de cobertura, dominaban *Phlegmariurus cruentus*, *Arcytophyllum muticum*, *Geranium santanderiense* y *Oreobolus goeppingeri*.

Especies diagnósticas: *Espeletia conglomerata*, *Phlegmariurus cruentus*, *Hypericum bryoides*, *Arcytophyllum muticum*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: veredas Carrizal, Móngora y Morquecha, alrededores de las lagunas El Pico y Páez, entre los 3400 y los 3900 m. Se establece en laderas y alrededores de lagunas sobre terrenos planos a ligeramente inclinados con sustratos bien o regularmente drenados, distribuidos entre el subpáramo y el páramo medio (ca. 3470-3870 m, extendiéndose entre ca. 3400-3900 m).

Matorral de *Linochilus rosmarinifolius* y *Chusquea tessellata* (Tabla 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1872/3358>) (Figura 3B)

Levantamiento: SYG01

Fisionomía-composición: matorral con un estrato arbustivo dominado por *Linochilus rosmarinifolius* (cob. prom. 50 %) con *Vaccinium floribundum*. En el estrato herbáceo

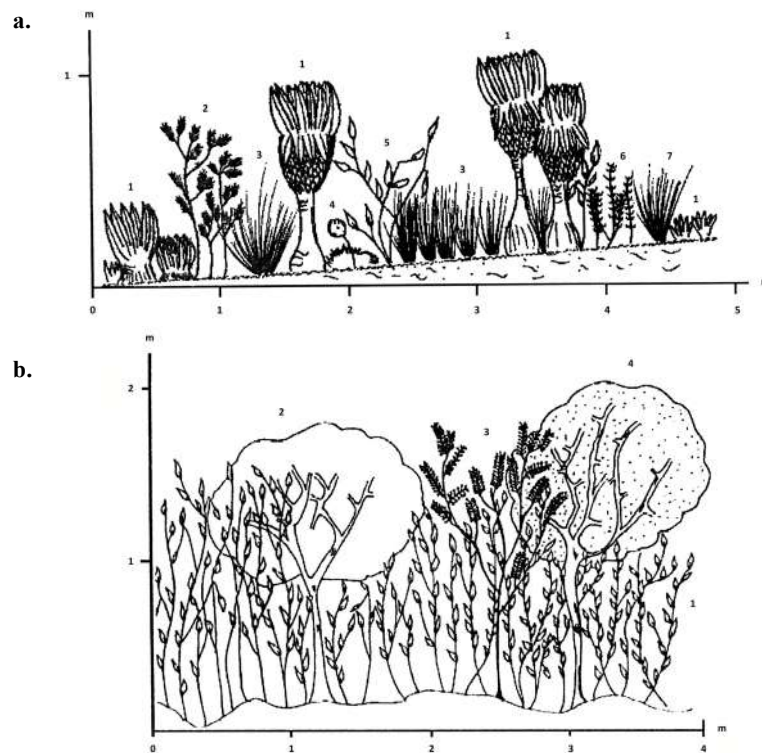


Figura 3. Perfil fisionómico de las asociaciones: **A.** *Arcytophyllum mutici-Espeletietum conglomeratae*. **B.** *Linochilus rosmarinifolius* y *Chusquea tessellata*

figuraban *Chusquea tessellata* (cob. prom. 20 %), *Calamagrostis effusa*, *Castilleja integrifolia* y *Puya bicolor*. En el estrato rasante aparecían *Xyris columbiana*, *Niphogeton kalbreyeri*, *Lachemilla andina*, *Breutelia* cf. *subdisticha* y *Juncus echinocephalus*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal, sector Sisavita, ca. 3450-3550 m. Se establece en sitios secos y húmedos con inclinación mediana, entre los 3400 y los 3600 m. Los matorrales están muy intervenidos por el uso de los elementos leñosos para labores domésticas.

Alianza *Arcytophyllum mutici-Calamagrostion effusae* all. nov. en esta contribución (Tabla 3S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1872/3358>) (Figura 4A)

Typus: *Plantago sericeae-Calamagrostietum effusae*

Fisionomía-composición: la vegetación de la alianza reúne frailejonales-pajonales y pajonales-herbazales, el estrato arbustivo solamente estaba presente en el frailejonal-pajonal de *Calamagrostion effusae-Espeletietum canescentis*. Dominaba el estrato herbáceo muy vigoroso, con 70 % de cobertura y presencia de *Orthrosanthus chimboracensis*, *Halenia asclepiadea*, *Hypericum mexicanum*, *Hypericum juniperinum* e *Hieracium frigidum*. En el estrato rasante, con 25 % de cobertura, dominaban *Arcytophyllum muticum*, *Acaena cylindristachya*, *Eryngium humile*, *Geranium sibbaldioides*, *Geranium santanderiense* e *Hypochaeris sessiliflora*.

Especies diagnósticas: *Arcytophyllum muticum*, *Acaena cylindristachya*, *Eryngium humile*, *Hypericum mexicanum*, *Hypericum juniperinum*, *Arcytophyllum nitidum*, *Oreobolus goeppingeri* y *Lachemilla purdiei*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal; quebrada Quelpa, entre los 3500 y los 3660 m. Se establece sobre suelos bien drenados en laderas con inclinaciones que van desde planas hasta moderadas a fuertes. Había evidencias de perturbación por actividades pecuarias.

Asociación *Calamagrostio effusae-Espeletietum canescentis* ass. nov. en esta contribución **tabla 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1872/3358>, **figura 4A**

Typus: NOR27

Fisionomía-composición: frailejonal-pajonal con un estrato arbustivo dominado por *Espeletia canescens* (cob. prom. 40 %), algunos individuos alcanzaban hasta los 4 m de altura. En el estrato herbáceo, con cobertura de 60 %, dominaban *Calamagrostis effusa* y *Chusquea tessellata*, acompañadas por *Parablechnum loxense*, *Hypericum cardonae*, *Orthrosanthus chimboracensis*, *Cortaderia* cf. *hapalotricha* y *Arcytophyllum nitidum*. En el estrato rasante, con 10 % de cobertura, figuraban *Oreobolus goeppingeri*, *Geranium santanderiense*, *Lycopodium jussiaei*, y *Phlegmariurus riobambensis*.

Especies diagnósticas: *Espeletia* cf. *canescens*, *Sphagnum* cf. *magellanicum*, *Puya bicolor*, *Parablechnum loxense*, *Hypericum cardonae*, *Elaphoglossum minutum*, *Chaetolepis lindeniana*, *Phlegmariurus riobambensis* y *Disterigma empetrifolium*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal, valle de la quebrada Quelpa, entre los 3440 y los 3510 m. Se establece sobre sustratos bien drenados en laderas pronunciadas de sectores abiertos y alrededores de cursos de agua.

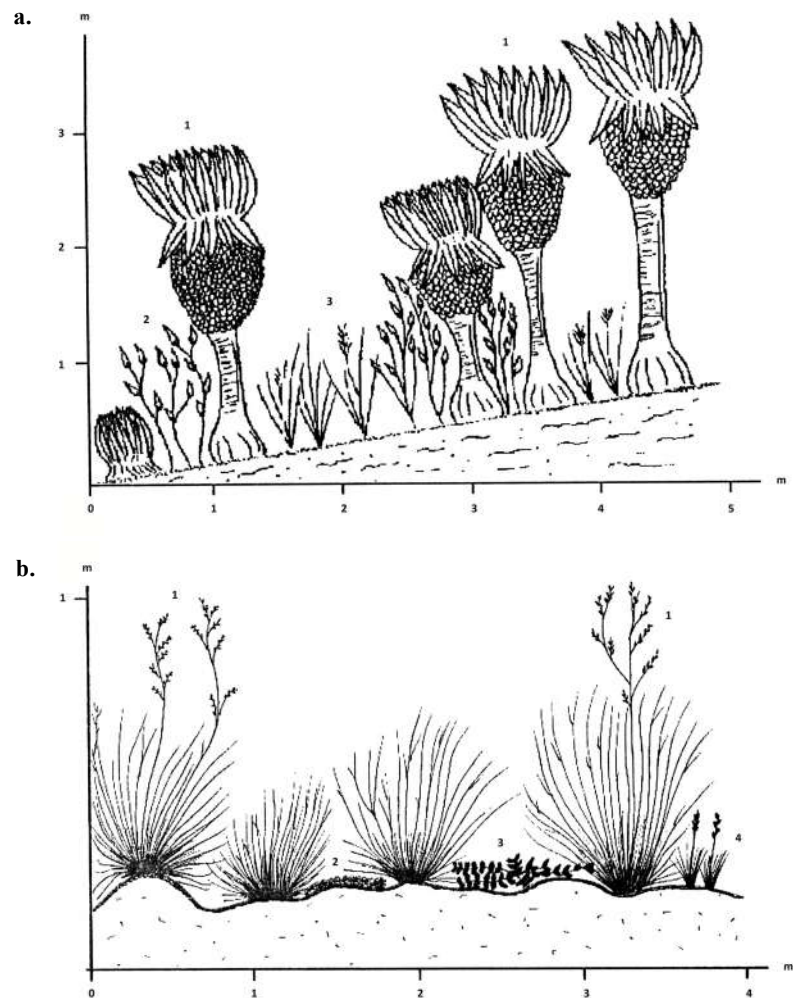


Figura 4. Perfil fisionómico de las asociaciones: **A.** *Calamagrostio effusae-Espeletietum canescentis*. **B.** *Plantagino sericeae-Calamagrostietum effusae*

Asociación *Arcytophylo mutici-Espeletietum funckii* ass. nov. en esta contribución (Tabla 3S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1872/3358>)

Typus: SYG20

Fisionomía-composición: Frailejonal-herbazal con un estrato herbáceo de 75 % de cobertura dominado por *Espeletia funckii* (cob. prom. 22 %), *Agrostis* sp. (cob. prom. 30 %) y *Orthrosanthus chimboracensis*. En el rasante, con cobertura de 30 %, dominaba *Arcytophyllum muticum* (cob. prom. 20 %) junto con *Eryngium humile*, *Acaena cylindristachya*, *Breutelia* cf. *subdisticha* y *Neobartsia laniflora*.

Especies diagnósticas: *Agrostis* sp., *Espeletia funckii*, *Neobartsia laniflora* e *Hypericum cardonae*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal; quebrada Quelpa, entre los 3500 y los 3760 m. Se establece sobre sitios secos, en sitios ligeramente inclinados hasta muy inclinados.

Asociación *Plantagino sericeae-Calamagrostietum effusae* ass. nov. en esta contribución (Tabla 3S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1872/3358>) (Figura 4B)

Typus: NOR23

Fisionomía-composición: pajonal-rosetal bajo con un estrato herbáceo de 60 % de cobertura dominado por *Calamagrostis effusa* (cob. prom. 55 %) acompañada por *Baccharis tricuneata*, *Vaccinium floribundum*, *Hypericum mexicanum* e *Hypericum juniperinum*. En el estrato rasante dominaba ampliamente *Arcytophyllum muticum* junto con *Plantago sericea*, asociadas con *Eryngium humile*, *Valeriana rigida*, *Breutelia* cf. *subdisticha*, *Hypochaeris sessiliflora*, *Geranium sibbaldioides* y *Acaena cylindristachya*.

Especies diagnósticas: *Plantago sericea*, *Baccharis tricuneata*, *Valeriana rigida*, *Breutelia* cf. *karsteniana* y *Noticastrum marginatum*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal, cabecera del valle de la quebrada Romeral, entre los 3200 y los 3950 m. Se establece en sitios planos, secos.

Comunidades transicionales con el bosque altoandino

Asociación *Hesperomelo ferruginae-Ilicetum ellipticae* ass. nov. en esta contribución (Tabla 5)

Typus: NOR07

Fisionomía-composición: matorral alto con un estrato arbustivo dominado por *Ilex elliptica* (cob. prom. 3 %) junto con *Monnina aestuans* (cob. prom. 10 %), *Miconia myrtillifolia* (cob. prom. 8 %) y *Ageratina glyptophlebia* (cob. prom. 3 %). En el estrato herbáceo dominaba *Berberis goudotii* y como especies asociadas figuraban *Linochilus* sp. y *Hesperomeles ferruginea*. En el estrato rasante aparecían *Sibthorpia repens*, *Galium hypocarpium*, *Melpomene flabelliformis*, *Hymenophyllum polyanthos*, *Oxalis* cf. *corniculata*, *Peperomia hartwegiana* y *Campyloneurum amphostenon*.

Distribución-ecología: Norte de Santander, municipio Cucutilla, PNR Sisavita, páramo El Romeral: vereda Carrizal, sector Sisavita, ca. 3200-3600 m. Se establece en sitios secos, en abrigos rocosos y a manera de parches discontinuos.

Consideraciones finales

Patrón de riqueza a nivel taxonómico

En la tabla 4S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1872/3358>, se muestran los valores de las familias más ricas (especies) en El Romeral y su significado con relación al mismo patrón de los páramos de la cordillera Oriental, de los de Colombia y del bioma paramuno (Costa Rica – Bolivia). El patrón encontrado muestra una tendencia similar, pero las familias más ricas concentraron el 76 % de la riqueza, cifra superior al 51 % que se encuentra en los páramos de la cordillera Oriental y en los de todo el país.

Tabla 5. Composición florística de la asociación *Hesperomelo ferruginae-Ilicetum ellipticae* en el páramo El Romeral (Norte de Santander)

Clase, orden y alianza no definidos			
<i>Hesperomelo ferruginae-Ilicetum ellipticae</i>			
Área (m ²)	50	50	50
Altitud (m)	3200-3600		
Levantamiento original	NOR07	NOR47	SYG02
Cobertura (%)			
Asociación <i>Hesperomelo ferruginae-Ilicetum ellipticae</i>			
<i>Ilex elliptica</i>	6	1	2
<i>Ageratina glyptophlebia</i>	5	1	3
<i>Berberis goudotii</i>	0,5	0,5	0,5
<i>Sibthorpia repens</i>	0,5	0,5	0,5
<i>Miconia myrtillifolia</i>	12		6
<i>Hesperomeles ferruginea</i>	0,5		0,5
<i>Linochilus sp.</i>	2		13
<i>Monnina aestuans</i>		16	5
<i>Campyloneurum amphostenon</i>	1		1
<i>Elaphoglossum minutum</i>	0,5		0,5
<i>Hymenophyllum polyanthos</i>	0,5		0,5
<i>Melpomene flabelliformis</i>	0,5		0,5
<i>Oxalis cf. corniculata</i>	0,5	0,5	
<i>Galium hypocarpium</i>		1	0,5
<i>Peperomia hartwegiana</i>		0,5	0,5

En El Romeral es muy particular la ausencia de representantes de Orchidaceae, tanto en los levantamientos de vegetación como en la flora asociada de los alrededores. Fabaceae y Solanaceae solamente presentaron dos especies de dos géneros, y Lamiaceae, una especie.

Los géneros con mayor número de especies mostraron un patrón similar en la cordillera Oriental y en los páramos de Colombia. Es de destacar la riqueza que presentaron *Lachemilla*, *Agrostis* y *Valeriana* (**Tabla 4S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1872/3358>).

Aspectos de la estructura

En la alianza *Acaeno elongatae-Hypericion phelli* se incluyeron chuscales, matorrales bajos y rosetales y en la alianza *Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae*, chuscales-herbazales y chuscales-matorrales. En *Espeletio conglomeratae-Chusqueion tessellatae* se agruparon chuscales-rosetales, cortaderaes-herbazales, frailejonales-matorrales y matorrales, y en la alianza *Arcytophylo mutici-Calamagrostion effusae*, frailejonales-pajonales y pajonales-matorrales.

En general, la vegetación era de porte bajo con predominio en el cubrimiento de los estratos herbáceo y rasante. Un estrato arbustivo bien diferenciado se encontró en las asociaciones *Hyperici phelli-Chusqueetum tessellatae*, *Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae* y *Calamagrostion effusae-Espeletietum canescentis* y en la comunidad de *Linochilus rosmarinifolium* y *Chusquea tessellata*. El estrato herbáceo fue el dominante en la estructura de las asociaciones; los mayores valores se expresaron en las asociaciones *Chusqueo tessellatae-Puyetum bicoloris* y *Arcytophylo mutici-Espeletietum conglomeratae*. El valor máximo de cobertura en el estrato rasante se presentó en *Lachemilla*

orbiculatae-Hypericetum phelli. El número total de especies en las asociaciones varió entre 26 *Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae* y 37 *Hyperico phelli-Puyetum bicoloris*, sintaxón que igualmente presentó el mayor índice de riqueza (77×10^{-2}).

Esquema sintaxonómico

La vegetación del páramo El Romeral (Cucutilla, Norte de Santander), parte del complejo nudo de Santurbán, se clasificó en una clase, un orden y cuatro alianzas. La alianza con mayor número de asociaciones fue *Espeletio conglomeratae-Chusqueion tessellatae*, con tres asociaciones y una comunidad. La alianza *Arcytophylo mutici-Calamagrostion effusae* tuvo tres asociaciones y las alianzas *Acaeno elongatae-Hypericion phelli* y *Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae* incluyeron dos asociaciones cada una.

El arreglo fitosociológico es el siguiente:

Clase *Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietea effusae* (**Rangel & Arellano, 2019**)

Orden *Vaccinio floribundi-Chusquetalia tessellatae* ord. nov.

Alianza *Acaeno elongatae-Hypericion phelli* all. nov.

Asociación *Lachemillo orbiculatae-Hypericetum phelli* ass. nov.

Asociación *Hyperico phelli-Puyetum bicoloris* ass. nov.

Alianza *Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae* all. nov.

Asociación *Hyperici phelli-Chusqueetum tessellatae* ass. nov.

Asociación *Niphogetonis ternatae-Chusqueetum tessellatae* ass. nov.

Alianza *Espeletio conglomeratae-Chusqueion tessellatae* all. nov.

Asociación *Chusqueo tessellatae-Puyetum bicoloris* ass. nov.

Asociación *Plantagino linearis-Cortaderietum hapalotrichae* ass. nov.

Asociación *Arcytophylo mutici-Espeletietum conglomeratae* ass. nov.

Comunidad del matorral de *Linochilus rosmarinifolius* y *Chusquea tessellata*

Alianza *Arcytophylo mutici-Calamagrostion effusae* all. nov.

Asociación *Calamagrostio effusae-Espeletietum canescentis* ass. nov.

Asociación *Arcytophylo mutici-Espeletietum funckii* ass. nov.

Asociación *Plantagino sericeae-Calamagrostietum effusae* ass. nov.

Otras comunidades registradas sin clase, orden o alianza definidas:

Asociación *Hesperomelo ferruginae-Ilicetum ellipticae*

Aspectos sinecológicos

A nivel de categorías superiores (clase y orden), se definió en la región de estudio un arreglo bastante regular. En la distribución de la vegetación a nivel de alianza, se lograron diferenciar dos tendencias que han sido mencionadas y caracterizadas para otras localidades del páramo colombiano. En el patrón asociado con los sitios de suelos húmedos, encharcados, y un microclima muy húmedo predominó *Chusquea tessellata*, como en las alianzas *Carici pygmaeae-Chusqueion tessellatae* y *Espeletio conglomeratae-Chusqueion tessellatae*. Una situación similar ha sido mencionada para los páramos del macizo del Tatamá.

En sitios en los que disminuyó la humedad (encharcamiento del suelo), disminuyó también la importancia ecológica (valores de cobertura y de frecuencia) de *Chusquea tessellata*, como se presenta en la alianza *Acaeno elongatae-Hypericion phelli*. En los sitios secos bien drenados, no se encontraron elementos como *Chusquea tessellata* y *Cortaderia hapalotricha* y se estableció la vegetación de la alianza *Arcytophylo mutici-Calamagrostion effusae*. Este pajonal-matorral es bastante común en otras localidades de la cordillera Oriental que muestran condiciones ecoclimáticas parecidas (**Rangel, 2000; 2018**).

La clase *Orthrosantho chimboracensis-Calamagrostietea effusae* fue propuesta por **Rangel & Arellano (2019)** para la serranía de Perijá con el orden *Espeletio perijaensis-Calamagrostetalia effusae*, que incluye las alianzas *Hyperico magdalenici-*

Calamagrostion effusae, en las cuales se agruparon matorrales y matorrales-pajonales, y *Chusqueo tessellatae-Espeletion perijaensis*, en la que figuraban chuscales y herbazales. Otra alianza de la misma clase y orden, la *Hyperico stricti-Chusqueion tessellatae*, incluía el herbazal de *Geranio holosericei-Plantaginietum sericeae*, mientras que en el páramo de El Romeral se caracterizó la asociación *Plantagino sericeae-Calamagrostietum effusae*. Las dos unidades comparten *P. sericea* y especies dominantes como *Calamagrostis effusa* y *Chusquea tessellata*; las especies diagnósticas en cada caso tipifican de manera clara los dos sintaxones. En Perijá *Arcytophyllum nitidum* es la especie característica dominante a nivel regional, mientras que en Sisavita-Romeral es importante en la alianza *Espeletio conglomeratae-Chusqueion tessellatae*; otra especie muy frecuente en la vegetación del páramo colombiano, *Arcytophyllum muticum*, adquiere valor importante a nivel regional en Sisavita-Romeral. Tanto en Perijá como en Sisavita, varias especies de *Hypericum* dominan en los tipos de vegetación.

Influencia antrópica y conservación de la biodiversidad

En la caracterización de **Galván & Ortiz** (2003), la base principal de disturbios antrópicos era la transformación de áreas planas con pajonales nativos (dominados por *Calamagrostis effusa*) en potreros dedicados a la ganadería extensiva y extensas áreas de cultivo de papa. Asociados con estas dos actividades, se presentan los incendios que poco a poco van modificando la matriz de la vegetación que contiene especies originales hasta homogenizarla con especies tolerantes, pero con un cambio muy fuerte en la fisionomía y en la composición florística original. Este patrón es común a los páramos de la cordillera Oriental y a largo plazo conduce a la pérdida de la biodiversidad por extinciones locales de elementos, como lo ha mencionado **Rangel** (2006, 2018).

Históricamente la zona ha estado vinculada a la minería artesanal del oro, con registros de aprovechamiento activo desde la colonia española. La propuesta de la minería a gran escala, mecanizada y con presencia de grandes corporaciones mineras en la región, tendrá un impacto demasiado fuerte sobre el territorio y las comunidades bióticas, afectará la estructura geológica (superficial) del macizo e interrumpirá la conectividad de los ecosistemas altoandinos con los de la franja paramuna (**Rangel & Arellano**, 2011). Los anteriores eventos ponen en riesgo la continuidad de los servicios ambientales proporcionados por estas zonas altas a los habitantes del área metropolitana de Bucaramanga y de otros municipios que dependen de la disponibilidad y calidad del recurso hídrico del macizo de Santurbán. Se han adelantado variados y diversos esfuerzos desde los entes regionales con el apoyo de la ciudadanía para la conservación de las condiciones originales de la mayor parte del macizo Santurbán. Entre las estrategias apropiadas de conservación está la declaración de los parques Natural Regional Sisavita y Natural Regional Páramo de Santurbán como áreas protegidas por parte de CORPONOR y CDMB, respectivamente.

Aunque aún no se han definido de manera precisa los límites de las áreas protegidas, se encuentra vigente la Resolución 2090 del 19 de diciembre de 2014 por la cual se delimita el Páramo de Jurisdicciones - Santurbán – Berlín. Sin embargo, según la Sentencia T361 (2017) de la Corte Constitucional, se requiere una nueva delimitación. En este ejercicio es importante tener en cuenta propuestas de manejo integrado que permitan consolidar una respuesta apropiada para los intereses de la minería mecanizada a gran escala, como lo establece el documento elaborado por **CORPONOR** (2012).

Material suplementario

Ver el material suplementario en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1872/3358>

Agradecimientos

A la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental – CORPONOR, por su apoyo económico para el trabajo de campo de las autoras principales; al Herbario Nacional

Colombiano (COL), por el acceso a las colecciones, y a la Escuela de Biología y el Herbario UIS de la Universidad Industrial de Santander (Humberto García-Pinzón[†], Adriana Gómez-Reyes), por su apoyo para la revisión de ejemplares y las facilidades logísticas para la preparación del material botánico. A los especialistas que colaboraron generosamente en la determinación de ejemplares (Diego Giraldo-Cañas – COL, Andrey Ojeda – HJTT, Jesús Mavárez – CNRS). A los proyectos “Inventario, sostenibilidad y conservación de la biodiversidad de Colombia” y “Síntesis fitosociológica de la vegetación de la región de vida paramuna colombiana”, desarrollados por los grupos de investigación Biodiversidad y Conservación de la Universidad Nacional de Colombia y Biota y Sociedad del Herbario J.J. Triana, por su apoyo en el proceso de integración y análisis de datos. A Fabio Garcés por la elaboración de los perfiles de vegetación. A los dos revisores anónimos cuyas sugerencias ayudaron a mejorar la presentación final del manuscrito.

Contribución de los autores

S.Y.G.C. y N.Y.O.R. realizaron el trabajo de campo, recolectaron y procesaron el material botánico, y participaron en la discusión de resultados y en la elaboración de la versión final del manuscrito; R.S. colaboró en el trabajo de campo, en la recolección y determinación de material, asesoró en aspectos taxonómicos y participó en la discusión y elaboración de la versión final; J.P.Z. revisó la nomenclatura fitosociológica y actualizó los aspectos taxonómicos de varias familias de plantas y participó en la elaboración del manuscrito; J.O.R.C. participó en la actualización de la nomenclatura taxonómica, y coordinó la elaboración y el formato académico de la presentación de la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos ningún conflicto de intereses personal ni institucional.

Referencias

- Braun-Blanquet, J.** (1979). Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales. H. Blume editores. Madrid. 820 p.
- Cleef, A.M.** (1981). The vegetation of the páramos of the Colombian Cordillera Oriental. *Dissertationes Botanicae*, 61:320. J. Cramer, Vaduz.
- Córdoba-C., S., Estela, F. A., Mendoza, H., Ospina, M., Prieto, A., Pulido, A., Gil, I., Tovar, D., Álvarez, G.** (2002). Caracterización biológica del Sector de Sisavita, municipio de Cucutilla, Norte de Santander. Grupo de Exploración y Monitoreo Ambiental – GEMA, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Informe Técnico Inédito. Bogotá.
- Corporación Autónoma Regional de La Frontera Nororiental - CORPONOR.** (2009). Plan de Administración y Manejo Ambiental Parque Natural Regional Sisavita. 74 pp. Cúcuta.
- Cuatrecasas, J.** (1934). Observaciones geobotánicas en Colombia. Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales. Serie Botánica, 27, 144 pp. Madrid.
- Cuatrecasas, J.** (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 10 (40): 221-268.
- Galván, S.Y., Ortiz, N.Y.** (2003). Análisis florístico y estructural de la vegetación del páramo de Sisavita. Norte de Santander. Trabajo de grado, escuela de Biología Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga).
- Hernández-A, M.** (2002). Caracterización de la diversidad de la vegetación a nivel alfa (familias, géneros y especies) y a nivel beta (comunidades) en un gradiente altitudinal del páramo de la Rusia, Duitama (Boyacá). *Tesis de grado*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, D.C.
- Hernández-A., M., Rangel-Ch., J.O.** (2003). Catálogo florístico del páramo de la Rusia, Duitama (Boyacá). En: Angel-J., C. (ed.). Congreso Mundial de Páramos. Tomo I. 379-428. Conservación internacional-Colombia-Ministerio del medio ambiente ISBN: 9588096251
- Izco, J., Del Arco, M.** (2003). Código Internacional de Nomenclatura Fitosociológica. Universidad de la Laguna. 155 pp. España.

- McCune, B., Mefford, J.** (1999). PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data. Version 4.41 electronic manual. MjM software, Gleneden Beach, Oregon.
- Rangel-Ch., J.O.** (2000). La diversidad beta: tipos de vegetación. En: J.O. Rangel-Ch. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica III: La región de vida paramuna*. Instituto de Ciencias Naturales-Instituto Alexander von Humboldt.
- Rangel-Ch., J.O.** (2006). The biodiversity of the Colombian páramo region and its relation to antropogenic impact: 103-118. En: E. Spehn, M. Liebermann y C. Korner (eds). *Land use change and mountain biodiversity*. CRC Press. Taylor & Francis Group.
- Rangel-Ch., J.O.** (2018). El páramo colombiano: aspectos macroecológicos y ecológicos. En: J.O. Rangel-Ch. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica XVI. Patrones de riqueza y de diversidad de las plantas con flores en el bioma de páramo*. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales.
- Rangel-Ch., J.O., Lozano-C., G.** (1986). Un perfil de vegetación entre la Plata (Huila) y el Volcán del Puracé. *Caldasia* 14 (68-70), 503-547.
- Rangel-Ch., J.O., Sturm, H.** (1995). Consideraciones sobre la vegetación, la productividad primaria neta y la artropofauna asociada en regiones paramunas de la cordillera Oriental. En: L.E. Mora y H. Sturm. (eds.). *Estudios ecológicos del páramo y del bosque altoandino cordillera Oriental de Colombia*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Rangel-Ch., J.O., Arellano-P., H.** (2019). La vegetación de la serranía de Perijá, Colombia: páramo, selvas y bosques. En: J.O. Rangel-Ch., M.G. Andrade-C., C. Jarro-F. & G. Santos-C. (eds). *Colombia Diversidad Biótica XVIII. Biodiversidad y territorio de la serranía de Perijá (Cesar-Colombia)*. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales. Parques Nacionales Naturales.
- Rangel-Ch., J.O., Arellano, H.** (2011). Exploración minera en Santurbán: un nuevo intento de burla. UNPeriódico 143. 10 de abril.
- Sturm, H., Rangel-Ch., J.O.** (1985). *Ecología de los páramos andinos. Una visión preliminar integrada*. Instituto de Ciencias Naturales.
- Theurillat, J.P., Willner, W., Fernández-G., F., Bültmann, H., Čarni, A., Gigante, D., Mucina, L., Weber, H. (†).** (2020). International Code of Phytosociological Nomenclature. 4th Edition. *Applied Vegetation Science* 24, 1-62. <https://doi.org/10.1111/avsc.12491>.

Ciencias Naturales

Artículo original

Sinopsis del género *Micropholis* (Sapotaceae) en Colombia y clave para la identificación de sus especies

A synopsis of the genus *Micropholis* (Sapotaceae) in Colombia with an identification key

✉ Liseth Paola Piñeros-U.^{1,2,*}, ✉ Rocío Cortés-B.¹, ✉ James E. Richardson^{3,4,5}

¹ Herbario Forestal, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia

² Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Bogotá D.C., Colombia

³ School of Biological, Earth and Environmental Sciences, University College Cork, Ireland

⁴ Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia

⁵ Tropical Diversity Section, Royal Botanic Garden Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom

Resumen

Se presenta la sinopsis del género *Micropholis* (Sapotaceae) en Colombia. Se incluye la descripción del género, una clave de identificación de las especies, la descripción de cada una, su distribución geográfica y su fenología. La sinopsis se hizo con base en el estudio de ejemplares de las colecciones de siete herbarios, la observación de algunas especies en su hábitat natural y el estudio de imágenes digitales de los especímenes tipo. Aunque en la última revisión taxonómica se registraron cinco especies en Colombia, el catálogo de plantas y líquenes sugiere la presencia de 18 especies en el país y colecciones posteriores han elevado este número a 19, las cuales se encuentran distribuidas especialmente en los bosques húmedos de tierras bajas, sobre todo en la Amazonía y en el occidente del país. *M. guyanensis* y *M. venulosa* son las especies más ampliamente distribuidas en el país.

Palabras clave: Bosque húmedo tropical; Chrysophylloideae; Especies amazónicas; Flora de Colombia; Neotrópico.

Abstract

We present here a synopsis of the Colombian taxa in the genus *Micropholis* (Sapotaceae) including a genus description, an identification key, and a description of the species with information about their geographical distribution and phenology. The synopsis is based on the observation of specimens from seven herbaria, of some species in their natural habitat, and of digital images from type specimens. In a previous taxonomic revision, only five species were reported from Colombia; however, the catalogue of plants and lichens suggests the presence of 18 species, which we increased here to 19 distributed mainly in lowland wet forests, mostly in the Amazonia and western Colombia. *M. guyanensis* and *M. venulose* are the most widely distributed species in the country.

Keywords: Tropical wet forest; Chrysophylloideae; Amazonian species; Flora of Colombia; Neotropics.

Introducción

Micropholis es el tercer género con mayor número de especies de la familia Sapotaceae después de *Pouteria* y *Chrysophyllum*. Incluye 40 especies distribuidas exclusivamente en el Neotrópico y la mayor diversidad taxonómica se concentra en las áreas tropicales húmedas de Brasil, donde se han registrado 29 especies (Ferreira *et al.*, 2019; de Faria *et al.*, 2017). El género fue descrito por Grisebach en 1864 como una sección del género *Sapota* Plum. (sinónimo de *Pouteria*), y Pierre lo elevó a la categoría de género en 1891 tomando como especie tipo a *Micropholis rugosa* (Swartz) Pierre (anteriormente descrita como *Sapota rugosa* Swartz) (Pennington, 1990). *Micropholis* posee un alto grado de

Citación: Piñeros-U. LP, Cortés-B. R, Richardson JE. Sinopsis del género *Micropholis* (SAPOTACEAE) en Colombia y clave para la identificación de sus especies. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):301-314, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1798>

Editor: Carolina Romero Hernández

***Correspondencia:**

Liseth Paola Piñeros-U.;
lppinerosu@unal.edu.co

Recibido: 27 de octubre de 2022

Aceptado: 19 de abril de 2023

Publicado en línea: 8 de mayo de 2023



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

variación morfológica. Aunque la mayoría de las especies se caracterizan por tener hojas alternas y dísticas con venación secundaria y terciaria paralela, que da a la hoja una apariencia estriada (Pennington, 1990), se presenta variación tanto en la disposición de las hojas en las ramas como en el patrón de venación terciario, por lo que hay especies con hojas en arreglo helicoidal y especies con venación terciaria reticulada. A nivel floral, se diferencia de los demás géneros de la familia por los sépalos dispuestos en un solo verticilo y por presentar estaminodios opuestos a los lóbulos de la corola y en igual número (Morales, 2015). En la familia Sapotaceae sólo el género *Chrysophyllum* incluye especies con patrón de venación terciaria paralela a la secundaria, similar a la de *Micropholis*; sin embargo, *Chrysophyllum* no tiene estaminodios, y cuando los hay, se presentan en un número menor que los lóbulos de la corola (Morales, 2015).

Los estudios filogenéticos ubican el género *Micropholis* en la subfamilia Chrysophylloideae, tribu Chrysophylleae, pero aún no hay claridad sobre las relaciones de parentesco con otros géneros (Swenson & Anderberg, 2005; Swenson *et al.*, 2008). En algunos análisis moleculares, con una muestra muy pequeña del género (tres especies), *Micropholis* no aparece como un género monofilético, ya que una de ellas hace parte de una politomía con otras especies de *Pouteria* y *Chrysophyllum* de distribución neotropical (Anderberg & Swenson, 2003; Swenson & Anderberg, 2005; Swenson *et al.*, 2008). De Faria *et al.* (2017) incluyeron *Pouteria laevigata* (Mart.) Radlk. y *P. maxima* T.D. Penn. en sus análisis, y demostraron la monofilia del género incluyendo estas dos especies, hecho que fue ratificado posteriormente por Swenson *et al.* (2023), quienes generaron tres nuevas combinaciones para el género: *Micropholis laevigata* (Mart.) Swenson & A.D.Faria; *Micropholis maxima* (T.D. Penn.) Swenson & A.D.Faria y *Micropholis oppositifolia* (Ducke) Swenson, transferida también del género *Pouteria*. Recientemente, Sánchez-C. *et al.* (2022) utilizaron códigos de barra para la determinación de especies de *Micropholis* y encontraron que los errores de identificación dentro del género son comunes.

Pennington (1990) reportó solo cinco especies de *Micropholis* para Colombia. Posteriormente, varios estudios realizados en la Amazonía y Orinoquía colombianas registraron siete especies más (Sánchez, 1997; Duivenvoorden *et al.*, 2001, Minorta-Cely & Rangel-Ch., 2014). Por su parte, el Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia (Bernal *et al.*, 2016) reporta 18 especies del género en el país, de las cuales *Micropholis cylindrocarpa* (Poepp. & Endl.) Pierre, *Micropholis humboldtiana* (Roem. & Schult.) T.D. Penn., *Micropholis mensalis* (Miq.) Eyma y *Micropholis retusa* (Spruce ex Miq.) Eyma no se incluyeron en esta sinopsis debido a su determinación incierta. Aquí se reconocen 19 especies del género en Colombia, las cuales se distribuyen desde el piedemonte húmedo de la Sierra Nevada de Santa Marta, pasando por los valles húmedos de la región Andina, la Orinoquía, hasta la Amazonía, y el Chocó biogeográfico. La mayor cantidad de especies del género se encuentran en los bosques amazónicos de la región del medio Caquetá, en el sector de Araracuara y Chiribiquete, donde se han registrado 12 especies.

Los usos de las especies de este género son variados. La madera de *Micropholis guyanensis*, *M. crotonoides* y *M. melinoniana* se usa en la construcción y la de *M. obscura* como combustible en la Amazonía colombiana (Acero, 1982; Pennington, 1990; Cárdenas & López, 2000). Asimismo, se extraen sustancias industriales de algunas especies, como es el caso de *M. guyanensis*, cuyo exudado es usado como pegamento, o sustancias medicinales, como en *M. venulosa*, cuya corteza se emplea para el tratamiento de úlceras estomacales (Pennington, 1990). Especies como *M. crotonoides*, *M. egensis* y *M. melinoniana* tienen gran importancia entre algunas comunidades por tener frutos comestibles (Pennington, 1990).

Teniendo en cuenta que el número de especies de *Micropholis* en Colombia es mucho mayor del que estimó Pennington (1990), que el catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia indica la presencia de al menos 14 especies en el país, que las colecciones de los herbarios registran un número aun mayor, y que es fundamental identificarlas inequívocamente para su eventual manejo, uso y conservación, el objetivo de esta sinopsis

fue aclarar el número de especies que crecen en el país, actualizar las descripciones morfológicas y su distribución geográfica, así como facilitar su identificación con la ayuda de una clave taxonómica.

Materiales y métodos

Se estudiaron ejemplares botánicos de *Micropholis* en los herbarios COL, COAH, FMB, HUA, JAUM, MEDEL y UDBC. Además, se consultaron las colecciones virtuales de los herbarios BR, F, K y NY, así como la colección virtual de especímenes tipo de Jstor. Se realizaron salidas de campo en los departamentos del Meta y Caquetá, donde se recolectaron ejemplares. La sinopsis se basó en la última revisión del género (Pennington, 1990) y en Pennington & Edwards (2005). Se describieron los caracteres morfológicos vegetativos y reproductivos de cada especie y se incluyó información de la distribución y de las zonas de vida siguiendo el sistema de Holdridge (1967). Los caracteres no observados se tomaron de las descripciones hechas por Pennington (1990).

Resultados

Micropholis (Griseb.) Pierre, Notes Bot. Sapot. 37, 1891.

Especie tipo. *Micropholis rugosa* (Swartz) Pierre

Árboles, arbolitos o rara vez arbustos, con exudado; yemas pubérgulas, pubescentes o tomentosas; ramas adultas glabras; sin estípulas. **Hojas** simples, alternas, dísticas o helicoidales; venación primaria pinnada; venación secundaria broquidódroma o craspedódroma; venación terciaria generalmente paralela a la secundaria o en algunos casos reticulada; vena intramarginal presente, generalmente paralela al margen o formada por las venas secundarias o rara vez ausente; vena marginal presente o ausente; pecíolos acanalados, pubérgulos, pubescentes o tomentosos. **Inflorescencia** en fascículos axilares, en algunas especies ramifloros, en otras se desarrollan sobre un braquiblasto pequeño, escamoso; pedicelos generalmente pubérgulos o pubescentes, rara vez tomentosos, ausentes en algunas especies. **Flores** generalmente unisexuales, rara vez bisexuales. **Cáliz** de un solo verticilo de 4-5 (-6) sépalos libres, generalmente pubérgulos o pubescentes con indumento adpreso, rara vez tomentoso, de tricomas erectos por fuera y glabros o adpreso-pubérgulos por dentro. **Corola** generalmente tubular o campanulada, de 4-5 lóbulos, glabra, rara vez adpreso-pubérgula o pubescente. **Androceo** con 4-5 estambres insertos en la base de los lóbulos de la corola, opuestos a ellos, incluidos o exsertos; anteras lanceoladas; estaminodios en igual cantidad que los estambres, alternos a los lóbulos de la corola. **Gineceo** con ovario globoso, ovoide o triangular de 4-5 lóculos; estilo incluido o exserto; estigma simple o lobulado. **Fruto** en baya de 1- varias semillas, glabro o pubérgulo. **Semilla** comprimida lateralmente; cicatriz adaxial que se extiende a lo largo de la semilla.

Composición y distribución. Cerca de 38 especies (Pennington, 1990), distribuidas en Centroamérica, Suramérica y las islas del Caribe. En Colombia se encuentran 19 especies.

Clave para las especies de *Micropholis* presentes en Colombia

1. Hojas estriadas y órdenes de venación superior al secundario, indistinguibles a simple vista (**Figura 1A**) 2
- 1'. Hojas no estriadas y órdenes de venación superior al secundario distinguibles a simple vista (**Figura 1B**) 13
2. Hojas con haz glabro y envés seríceo, pubérgulo o pubescente 3
- 2'. Hojas con haz glabro y envés glabro o con tricomas esparcidos sobre la vena media 4
3. Yemas con indumento erecto, tomentoso, ferrugíneo o dorado; pecíolo tomentoso. Inflorescencias en fascículos que se desarrollan sobre un braquiblasto que perdura en la rama adulta. Flores sésiles. *M. porphyrocarpa*

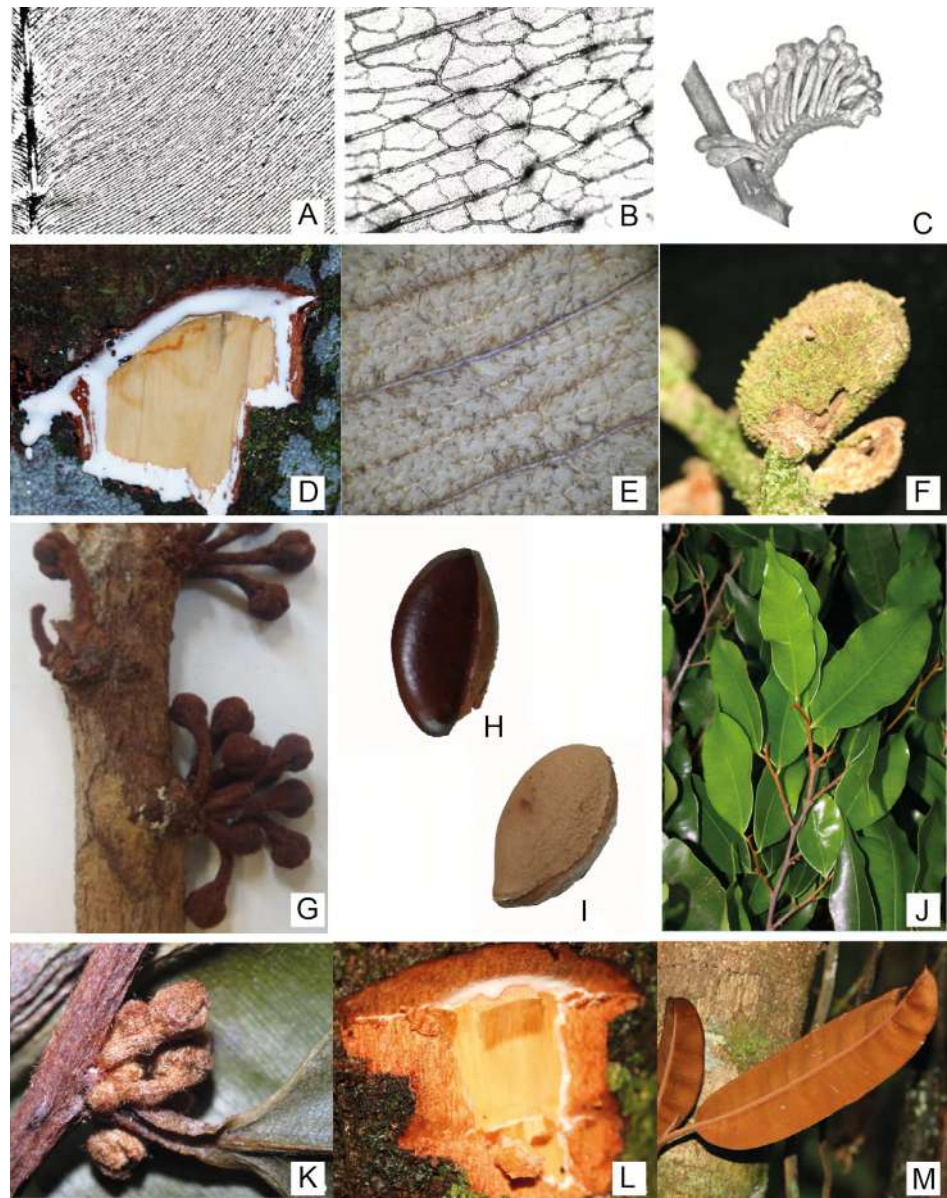


Figura 1. Algunos caracteres morfológicos de *Micropholis*. **A.** Venación estriada **B.** Venación terciaria reticulada. **C.** *M. guyanensis*, inflorescencia sobre braquiblasto. **D-F:** *M. madeirensis*; **D.** exudado; **E.** Envés de la hoja; **F.** fruto sésil. **G.** *M. maguirei*, inflorescencias ramifloras. **H.** *M. venulosa*, semilla brillante, lisa. **I.** *M. egensis*, semilla mate, rugosa. **J-K:** *M. venulosa*; **J.** hojas; **K.** inflorescencia axilar. **L-M:** *M. splendens*; **L.** exudado; **M.** envés ferrugíneo de la hoja

- 3[?]. Yemas con indumento adpreso pubérulo ferrugíneo; peciolo pubérulo, seríceo o glabro. Inflorescencia ramiflora y flores pediceladas..... *M. splendens*
- 4. Venas intersecundarias y terciarias distinguibles de las secundarias con el uso de lentes de aumento..... 5
- 4[?]. Venas intersecundarias y terciarias indistinguibles de las secundarias.....6
- 5. Yemas con indumento pubérulo o pubescente notorio; ápice caudado o acuminado; venación secundaria e intersecundaria ramificada al llegar al margen de la hoja; vena marginal presente; peciolo de 0,1-0,5 cm de largo. Pedicelos pubescentes. Flores unisexuales; cáliz pubescente por fuera y glabro o adpreso pubérulo por dentro *M. venulosa*

- 5°. Yemas con indumento adpreso, no visible a simple vista; ápice acuminado (corto) o convexo; venación secundaria e intersecundaria paralela hasta el margen de la hoja; vena marginal ausente o débil; peciolo de 0,5-1,8 cm de largo. Pedicelos, pubérulos. Flores bisexuales; cáliz pubérulo por fuera y por dentro.....*M. casiquiarensis*
6. Yemas con indumento erecto, tomentoso.....7
- 6°. Yemas con indumento adpreso, pubérulo o pubescente.....8
7. Hojas de 8-13 cm de longitud; venación paralela hasta llegar a la vena intramarginal. Inflorescencias en fascículos axilares o ramifloros. Flores unisexuales de 4-5 sépalos, tomentosos por fuera y glabros por dentro. Fruto con 5 sulcos longitudinales.*M. trunciflora*
- 7°. Hojas de 14-20 cm de longitud; venación paralela que se vuelve ligeramente sinuosa hacia el margen, entrecruzándose. Inflorescencia en fascículos ramifloros. Flores bisexuales de 5 sépalos tomentosos por fuera y por dentro. Cáliz de 5 sépalos, tomentoso por fuera y por dentro. Fruto no sulcado.....*M. maguirei*
8. Vena media hundida en el haz 9
- 8°. Vena media plana o levantada en el haz 10
9. Hojas helicoidales (menos frecuentemente dísticas). Inflorescencias de 2-6 flores. Cáliz de 4-5 sépalos, pubescentes o adpreso-pubérulos por fuera y glabros o con pelos adpresos por dentro.....*M. gardneriana*
- 9°. Hojas dísticas. Inflorescencias de 1-2 flores. Cáliz de 5 sépalos, adpreso pubescente por fuera y con pelos esparcidos por dentro.....*M. sp.1.*
10. Flores con 4 sépalos y 4 lóbulos de la corola; fruto elipsoide, con 4 alas o costillas longitudinales..... *M. acutangula*
- 10°. Flores con 5-6 sépalos y 5 lóbulos de la corola; fruto globoso o elipsoide sin alas ni costillas.....11
11. Flores bisexuales; pedicelos glabros. Estambres exsertos..... *M. obscura*
- 11°. Flores unisexuales; pedicelos adpreso-pubérulos. Estambres inclusos..... 12
12. Venación secundaria que forma un ángulo agudo con la vena primaria, el cual disminuye notoriamente hacia el ápice. Estilo exserto. Semilla 1-numerosas de testa lisa y brillante.....*M. melinoniana*
- 12°. Venación secundaria que forma un ángulo agudo con la vena primaria, el cual se mantiene igual en toda la lámina. Estilo inserto. Semilla solitaria de testa rugosa y mate*M. egenesis*
13. Inflorescencias en fascículos sobre un braquiblasto escamoso persistente en la rama (**Figura 1C**).....14
- 13°. Inflorescencias que no se desarrollan en un braquiblasto escamoso.....15
14. Venas intersecundarias que llegan hasta el margen de la hoja; secundarias 15-30 pares; estilo inserto.....*M. guyanensis*
- 14°. Venas intersecundarias que no llegan hasta el margen de la hoja, secundarias 15-25 pares; estilo exserto.....*M. crotonoides*
- 15°. Hoja de envés pubescente o tomentoso..... 16
15. Hoja de envés glabro o con pelos adpresos esparcidos en el envés.....17
16. Yemas con indumento tomentoso; hojas de envés pubérulo o tomentoso, en combinación de tricomas adpresos o erectos; 40 pares de venas secundarias; fascículos de 1-10 flores sésiles*M. madeirensis*
- 16°. Yemas con indumento pubescente corto; hojas de envés adpreso-pubescente, con pelos erectos muy esparcidos; 40-50 pares de venas secundarias; fascículos de flores numerosas, pediceladas..... *M. sanctae-rosae*

17. Hoja de ápice caudado; vena principal hundida en el haz; 12-15 pares de venas secundarias; venas terciarias reticuladas.....**M. brochidodroma**

17'. Hoja de ápice acuminado; vena principal plana o prominente en el haz; más de 30 pares de venas secundarias; venas terciarias paralelas.....**18**

18. Vena primaria un poco prominente en el haz; venas secundarias: 30-35 pares; vena marginal ausente. Inflorescencia de 5-10 flores.....**M. macrophylla**

18. Vena primaria plana en el haz; venas secundarias: 45-63 pares; vena marginal presente. Inflorescencias de 10-15 flores.....**M. grandiflora**

1. *Micropholis acutangula* (Ducke) Eyma

Árboles de porte medio, con exudado blanco escaso; yemas adpreso-pubéculas. **Hojas** dísticas, haz glabro y envés glabro o con indumento poco notorio en la vena primaria; venas numerosas que dan a la hoja una apariencia estriada, intersecundarias y terciarias paralelas, indistinguibles de las secundarias; peciolo glabro o con pelos adpresos. **Fascículos** axilares de 1-10 flores, con pedicelos adpreso-pubéculos y ferrugíneos. **Flores** unisexuales; 4 sépalos adpreso- pubéculos por fuera y glabros por dentro; corola glabra, 4 lóbulos; 4 estambres inclusos; ovario pubescente, 4 lóculos, estilo inserto, estigma simple. **Fruto** “alado” o con cuatro costillas longitudinales, glabro; semilla solitaria con testa un poco arrugada transversalmente y brillante.

Distribución. Caquetá (*Eusse PA279* -COAH), Parque Nacional Natural Sierra de Chiribiquete, en zona de vida de bosque húmedo tropical y bosque muy húmedo tropical. Florece entre mayo y junio, fructifica entre enero y febrero.

Comentarios. Las hojas y el patrón de venación terciario de esta especie son similares a los de *M. egensis* y *M. melinoniana*, pero son fácilmente reconocibles debido a que sus flores son tetrámeras y su fruto tiene 4 “alas” longitudinales. También puede confundirse a nivel vegetativo con *M. obscura*, pero esta especie tiene estambres exsertos y frutos sin costillas longitudinales.

2. *Micropholis brochidodroma* T.D. Penn.

Arboles de porte medio, con exudado blanco; yemas con pelos adpresos esparcidos. **Hojas** dísticas; ápice caudado largo, que puede ser hasta un tercio de la longitud de la hoja; haz glabro y envés glabro o adpreso pubéculo en la vena principal; venas secundarias: 12-15 pares, venas terciarias poligonal-reticuladas; peciolo con indumento adpreso. **Fascículos** axilares de 1-5 flores con pedicelos seríceos. **Flores** con 5 sépalos adpreso-pubéculos; corola glabra, con 5 lóbulos; 5 estambres inclusos; ovario pubescente, con 5 lóculos, estilo inclusivo. **Fruto** elipsoide, seríceo; semilla solitaria, lisa y brillante.

Distribución. Amazonas (*Marín 754* -COAH), desde la cuenca del río Caquetá hasta la cuenca del río Putumayo y desde el nivel del mar hasta los 300 m de altitud, en zona de vida de bosque húmedo tropical. Florece durante agosto y septiembre.

Comentarios. Esta especie puede confundirse con *M. guyanensis*, pero *M. brochidodroma* tiene un ápice caudado que puede alcanzar hasta tres cuartas partes de la longitud de la hoja; además, sus inflorescencias no se desarrollan sobre braquiblastos. Morfología de flor y fruto basada en Pennington (1990).

3. *Micropholis casiquiarensis* Aubrév.

Árboles de porte alto, con exudado blanco en las hojas y de color café-rojizo en el tronco; yemas con indumento adpreso muy pequeño que no es visible a simple vista. **Hojas** dísticas, con haz glabro y envés glabro o con indumento adpreso esparcido en la vena primaria; venas numerosas que dan a la hoja una apariencia estriada, terciarias paralelas que se distinguen de las secundarias con lentes de aumento; peciolo glabro o con pelos adpresos. **Fascículos** axilares de 1-10 flores; pedicelos pubéculos. **Flores** bisexuales; 5 sépalos pubéculos; corola glabra, con 5 lóbulos; 5 estambres inclusos; ovario con 5 lóculos, estilo inclusivo, estigma simple. **Fruto** glabro y liso.

Distribución. Amazonas (*Sánchez 1502* -COAH) y Caquetá (*Roa 347* -UDBC), a lo largo de la cuenca del río Caquetá y desde el nivel del mar hasta 600 m de altitud; en zona de vida de bosque húmedo tropical. Fructifica en marzo y septiembre.

Comentarios. Esta especie suele confundirse con *Micropholis venulosa*; sin embargo, *M. casiquiarensis* tiene pedicelos más largos, pubérulos, y flores bisexuales, en tanto que *M. venulosa* tiene pedicelos cortos pubescentes y flores unisexuales. La venación de *M. casiquiarensis* es menos notoria que la de *M. venulosa*. La descripción de la morfología de fruto se basó en **Pennington** (1990).

4. *Micropholis crotonoides* (Pierre) Pierre

Árboles o arbolitos, con exudado blanco; yemas con indumento adpreso pubérulo muy fino. **Hojas** dísticas; haz glabro y envés seríceo dorado, ferrugíneo o amarillo; venas secundarias: 15-25 pares, terciarias y cuaternarias poligonal-reticuladas; peciolo glabro o adpreso-pubérulo. **Fascículos** axilares sobre un pequeño braquiblasto persistente, con 3-20 flores; pedicelos pubérulos. **Flores** unisexuales; 5 sépalos pubérulos; corola glabra, 5 lóbulos; 5 estambres incluidos; ovario pubescente en la base con 5 lóculos, estilo incluido, estigma simple. **Fruto** globoso u ovoide, liso, pubérulo o glabro; semilla solitaria, lisa y brillante.

Distribución. Antioquia (*Tuberquia 1256* -JAUM), Caquetá (*Marín 2454* -UDBC), Chocó (*Gentry 30140* -JAUM), Guainía (*Córdoba 45* -COL), Guajira (*Mahecha 4986* -UDBC), Magdalena (*Romero 7804* -COL), Santander (*Ávila 314* -UDBC) y Valle (*Gentry 35281* -JAUM) desde 50 m hasta 2500 m de altitud, en zonas de vida de bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo tropical, bosque pluvial tropical, bosque húmedo premontano y bosque muy húmedo premontano. Florece de diciembre a abril y en octubre; fructifica de diciembre a junio.

Comentarios. Esta especie suele confundirse con *M. guyanensis* debido a que las dos tienen venación terciaria poligonal reticulada y sus inflorescencias se desarrollan sobre braquiblastos escamosos, pero *M. crotonoides* tiene menor número de venas secundarias (15-25 pares), *M. guyanensis* tiene 15-30 pares de venas secundarias y las intersecundarias no llegan hasta el margen de la hoja (en *M. guyanensis* sí); además, *M. crotonoides* tiene el estilo exserto (incluso en *M. guyanensis*).

5. *Micropholis egensis* (A. DC.) Pierre (Figura 1H)

Árboles, arbolitos o arbustos, con exudado blanco, crema, o rara vez transparente, yemas con fino indumento adpreso pubérulo. **Hojas** dísticas, haz y envés glabros o con indumentos adpresos sobre la vena media; venas numerosas, que dan a la hoja una apariencia estriada, intersecundarias y terciarias paralelas, indistinguibles de las secundarias; peciolo glabro. **Fascículos** axilares de 3-15 flores, pedicelos generalmente reflexos y adpreso pubérulos; **flores** unisexuales, la femenina más pequeña; 5-6 sépalos adpreso-pubérulos por fuera y por dentro, o algunas veces glabros por dentro; corola glabra o adpreso-pubérula, 5-6 lóbulos; 5-6 estambres incluidos; ovario pubescente en la base, con 5 lóculos, estilo incluido, estigma con 5 lóbulos. **Fruto** ovoide o globoso, glabro; semilla solitaria, mate y rugosa.

Distribución. Amazonas (*Betancur 8937* -UDBC), Antioquia (*Callejas 3641* -HUA), Caquetá (*Álvarez 449* -JAUM), Chocó (*Botero 486* -JAUM), Nariño (*Madrigal 728* -HUA), Putumayo (*Fernández 10809* -COL) y Valle (*Borrero 2* -MEDEL) en bosques de terraza baja y llanura aluvial inundable, desde el nivel del mar hasta 1420 m de altitud, en zonas de vida de bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo tropical, bosque pluvial tropical y bosque húmedo premontano. Florece durante abril y mayo y desde septiembre a noviembre, fructifica de marzo a abril y de agosto a diciembre.

Comentarios. Esta especie suele confundirse con *M. melinoniana* debido a su similitud en la forma de las hojas y el patrón de venación, pero *M. melinoniana* tiene venación secundaria que forma ángulos mucho más agudos que *M. egensis* con respecto a la vena primaria; además *M. melinoniana* tiene el estilo de la flor exserto y semilla(s) de testa lisa y brillante, mientras *M. egensis* tiene el estilo incluido y la semilla (única) de testa rugosa y mate.

6. *Micropholis gardneriana* (A. DC.) Pierre

Árbol, arbolito o arbusto, con exudado blanco; yemas con indumento corto pubescente, ferrugíneo. **Hojas** helicoidales o rara vez dísticas; haz glabro y envés glabro o con fino indumento pubescente sobre la vena primaria; venas numerosas que dan a la hoja una apariencia estriada, intersecundarias y terciarias paralelas, indistinguibles de las secundarias; peciolo glabro o pubescente en hojas jóvenes. **Fascículos** axilares de 2-6 flores, pedicelos pubescentes. **Flores** unisexuales; 4-5 sépalos, pubescentes o adpreso pubérulos por fuera y glabros o con pelos adpresos por dentro, ferrugíneos; corola glabra, 4-5 lóbulos; 4-5 estambres inclusos; ovario pubescente, 4-5 lóculos; estilo incluso, estigma simple o lobulado. **Fruto** elipsoide, liso y glabro; semilla solitaria, lisa y brillante.

Distribución. Vichada (*Cuatrecasas 3984* -COL) en bosques de terraza o bosques aluviales inundables, desde 50 hasta 200 m de altitud, en zonas de vida de bosque húmedo tropical. Florece durante enero y fructifica en octubre.

Comentarios. Puede diferenciarse fácilmente de las otras especies del género por su indumento pubescente no adpreso en yemas y sus hojas glabras con pelos esparcidos sobre la vena primaria.

7. *Micropholis grandiflora* Aubrév.

Árbol de porte alto, con exudado blanco; yemas adpreso pubérulas. **Hojas** dísticas; haz y envés glabros; venas secundarias: 45-63 pares, terciarias paralelas; peciolo glabro o un poco seríceo en hojas jóvenes. **Fascículos** axilares o ramifloros de 10-15 flores; pedicelos adpresopubérulos. **Flores** bisexuales; 5 sépalos glabros o adpreso-pubérulos por fuera y glabros por dentro; corola glabra, 5 lóbulos; 5 estambres exsertos; ovario pubérulo en la base, con 5 lóculos, estilo incluso, estigma con 5 lóbulos.

Distribución. En Colombia se conoce por una sola colección del departamento de Amazonas (*Sánchez 3825* -COAH) en bosques inundables en zona de vida de bosque húmedo tropical.

Comentarios. Debido al gran tamaño y la textura glabra de su hoja, esta especie es fácil de diferenciar de las otras especies de *Micropholis* presentes en Colombia. Morfología de flor basada en **Pennington** (1990).

8. *Micropholis guyanensis* (A. DC.) Pierre (Figura 1C)

Árboles de porte alto, con exudado blanco y abundante; yemas con indumento seríceo o pubérulo, ferrugíneas o doradas. **Hojas** generalmente dísticas, rara vez helicoidales; haz glabro, envés glabro o con indumento seríceo de color plateado, dorado o ferrugíneo; venas secundarias: 17-30 pares, terciarias y cuaternarias poligonal-reticuladas; peciolo glabro, seríceo o adpreso-pubérulo que forma dos líneas levantadas en la rama. **Fascículos** axilares sobre un braquiblasto pequeño y persistente, con 2-20 flores; pedicelos adpresopubérulos. **Flores** unisexuales; 5 sépalos adpreso-pubérulos; corola glabra con 5 lóbulos; 5 estambres inclusos; ovario pubescente en la base, 5 lóculos, estilo exserto, estigma simple o lobulado. **Fruto** globoso o elipsoide, liso, pubérulo o glabro; semilla solitaria, lisa y brillante.

Distribución. Amazonas (*López 11557* -COAH), Antioquia (*Jiménez s.n.* -UDBC), Caquetá (*Gentry 65218* -COAH), Córdoba (*Avella 1448*-COL), Cundinamarca (*Mahecha 3110* -UDBC), Guainía (*Córdoba 563* -COL), Guaviare (*Cárdenas 14435* -COAH), Meta (*Ramírez 7764* -HUA), Nariño (*Romero 5411* -COL), Putumayo (*Cárdenas 11768* -COAH), Santander (*Mahecha s.n.* -UDBC), Valle (*Devia 3772* -COL) y Vaupés (*Castro 1604* -COAH), desde el nivel del mar hasta 2000 m de altitud, en zonas de vida de bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo tropical, bosque pluvial tropical, bosque húmedo premontano y bosque húmedo montano bajo. Florece de marzo a diciembre, con picos en marzo, agosto y septiembre, y fructifica de septiembre a marzo.

Comentarios. *Micropholis guyanensis* puede confundirse con *M. crotonoides* (ver diferencias en la sección de comentarios de *M. crotonoides*).

9. *Micropholis macrophylla* (Krause) T.D. Penn.

Árboles de porte medio, con exudado blanco o salmón; yemas adpreso-pubéculas. **Hojas** dísticas; haz y envés glabros o con pelos adpresos esparcidos hacia la base; venas secundarias: 30-35 pares, terciarias paralelas; peciolo glabro. **Fascículos** axilares de 5-10 flores; pedicelos adpreso-pubéculos. **Flores** bisexuales; 5 sépalos glabros o adpreso-pubéculos por fuera y glabros por dentro; corola glabra, 5 lóculos; 5 estambres exsertos; ovario pubescente, 5 lóculos, estilo incluso, estigma simple. **Fruto** globoso, glabro; semilla brillante y rugosa.

Distribución. Amazonas (*Castro 1323* -COAH) y Vaupés (*Palacios 97* -COAH) desde 0 a 200 m de altitud, en zonas de vida de bosque húmedo tropical. Fructifica durante enero.

Comentarios. Esta especie puede confundirse con *M. grandiflora*; sin embargo, *M. macrophylla* tiene hojas más pequeñas con menor número de venas secundarias.

10. *Micropholis madeirensis* (Baehni) Aubrév. (Figuras 1D, 1E, 1F)

Árboles de porte alto, con exudado blanco; yemas adpreso-pubescentes, ferrugíneas. **Hojas** dísticas, haz glabro y envés tomentoso, con una combinación de pelos adpresos y pelos erectos simples y ramificados; venas secundarias: 35-40 pares, terciarias paralelas; venación de cuarto y quinto grado poligonal, reticulada; peciolo tomentoso. **Fascículos** axilares. **Flores** sésiles, unisexuales; 5 sépalos tomentosos por fuera y pubéculos por dentro; corola glabra, 5 lóculos; 5 estambres inclusos; ovario tomentoso, 5 lóculos, estilo exserto, estigma lobulado. **Fruto** globoso, tomentoso y ferrugíneo; semilla solitaria, lisa y brillante.

Distribución. Amazonas (*Sánchez 3660* -COAH) y Caquetá (*Cortés 2869* -UDBC), desde el nivel del mar hasta 300 m de altitud, en zona de vida de bosque húmedo tropical. Fructifica durante marzo.

Comentarios. Los individuos de esta especie son fáciles de reconocer debido al indumento tomentoso de pelos adpresos y erectos combinados en el envés de la hoja. Descripción de la flor basada en **Pennington** (1990).

11. *Micropholis maguirei* Aubrév. (Figura 1G)

Árboles o arbustos, con exudado blanco; yemas tomentosas y ferrugíneas. **Hojas** dísticas; haz glabro, envés glabro o con pelos esparcidos por la vena principal; venas numerosas que dan a la hoja una apariencia estriada, intersecundarias y terciarias paralelas; peciolo glabro o tomentoso. **Fascículos** ramifloros de 5-10 flores, con pedicelos tomentosos. **Flores** bisexuales; 5 sépalos tomentosos por fuera y por dentro; corola glabra, 5 lóbulos; 5 estambres exsertos. **Fruto** ovoide, brillante, pubescente.

Distribución. Amazonas (*Urrego 576* -COAH), Guainía (*Córdoba 762* -COAH, COL) y Vaupés (*Martínez 3480* -MEDEL), en bosques de terraza baja inundables; hasta 500 m de altitud, en zona de vida de bosque húmedo tropical; florece en noviembre.

Comentarios. Esta especie se puede reconocer fácilmente debido a que las venas secundarias se entrecruzan entre sí cuando se acercan al margen de la hoja; por otro lado, sus inflorescencias ramifloras con indumento tomentoso son únicas entre las especies del género presentes en Colombia. Descripción de la morfología del fruto basada en **Pennington** (1990).

12. *Micropholis melinoniana* Aubrév.

Árbol de porte alto, con exudado blanco o rara vez transparente; yemas adpreso-pubéculas, generalmente ferrugíneas. **Hojas** dísticas; haz y envés glabros; venas numerosas, que dan a la hoja una apariencia estriada y forman un ángulo agudo en la base que disminuye notoriamente hacia el ápice en ángulos de hasta 45° con respecto a la vena principal; intersecundarias y terciarias indistinguibles de las secundarias; peciolo glabro o pubéculo. **Fascículos** axilares de 3-15 flores; pedicelos adpreso-pubéculos. **Flores** unisexuales; 5 sépalos, pubéculos por fuera y glabros o con indumento esparcido por dentro; corola glabra, con 4-5 lóbulos; 4-5 estambres inclusos; ovario con pubescencia ferrugínea, 5 lóculos, estilo exserto, estigma simple o lobulado. **Fruto** globoso u elipsoide, glabro; semilla una (o varias): lisa y brillante.

Distribución. Amazonas (*Castellanos 10* -COAH), Caquetá (*Castaño 1495* -COAH, COL, HUA), Santander (*Herrera 213* -COL, UDBC) y Vaupés (*Cárdenas 22405* -COAH), en bosques de tierra firme o bosques de llanura aluvial frecuentemente inundables, desde el nivel del mar hasta 2000 m de altitud, en zonas de vida de bosque húmedo tropical y bosque húmedo premontano. Florece durante abril y octubre, fructifica durante marzo y diciembre.

Comentarios. Esta especie es similar a *M. egensis* (ver diferencias bajo esa especie).

13. *Micropholis obscura* T.D. Penn.

Árbol de porte alto, con exudado blanco a café naranja; yemas adpreso-pubéculas. **Hojas** dísticas; haz glabro y envés glabro o con pocos pelos adpresos esparcidos por la vena principal hacia la base; venas numerosas que dan a la hoja una apariencia estriada, intersecundarias y terciarias, indistinguibles de las secundarias; peciolo glabro o adpreso-pubéculo. **Fascículos** axilares; pedicelo glabro. **Flores** bisexuales; 5 sépalos pubéculos o subglabros por fuera y pubéculos por dentro; corola glabra, 5 lóbulos; 5 estambres exsertos; ovario globoso, ligeramente pubescente, 5 lóculos, estilo incluso, estigma simple o con 5 lóbulos. **Fruto** elipsoide, liso, glabro; semilla solitaria, lisa y brillante.

Distribución. Amazonas (*Cárdenas 11525* -COAH) y Caquetá (*Van Tindel 152* -COAH), en bosque maduro sobre superficie alomada de 80 hasta 250 m de altitud, en zona de vida de bosque húmedo tropical. Florece en agosto.

Comentarios. Esta especie es similar a *M. acutangula* (ver características bajo esa especie). La morfología del fruto se basó en **Pennington** (1990).

14. *Micropholis porphyrocarpa* (Baehni) Monach.

Árbol de porte medio, con exudado blanco; yemas tomentosas ferrugíneas o doradas. **Hojas** helicoidales; haz glabro y envés seríceo o pubescente; venas numerosas, que dan a la hoja una apariencia estriada, intersecundarias y terciarias indistinguibles de las secundarias; peciolo tomentoso. **Fascículos** axilares de 1-10 flores, sobre un braquiblasto pequeño, persistente. **Flores** sésiles, unisexuales; 5 sépalos pubescentes por fuera y adpreso-pubéculos por dentro; corola glabra, 5 lóbulos; 5 estambres inclusos; ovario pubescente, 5 lóculos, estilo incluso, estigma lobulado. **Fruto** globoso, liso, glabro; semilla solitaria, lisa, brillante.

Distribución. Amazonas (*López 4569* -COAH), Caquetá (*Cárdenas 46344* -COAH), en bosques de tierra firme y superficies onduladas hasta 200 m de altitud en zona de vida de bosque húmedo tropical. Fructifica en febrero.

Comentarios. Similar a *M. trunciflora*, pero las flores sésiles en fascículos sobre braquiblastos en *M. porphyrocarpa* permiten diferenciarlas.

15. *Micropholis sanctae-rosae* (Baehni) T.D. Penn.

Árboles con exudado blanco; yemas con pubescencia corta. **Hojas** dísticas, haz glabro y envés con indumento adpreso-pubescente y pelos erectos esparcidos; venas secundarias: 40-50 pares, intersecundarias paralelas, que no llegan hasta el margen, terciarias reticuladas; peciolo con pubescencia corta. **Fascículos** axilares de flores numerosas, algunas se desarrollan sobre braquiblastos; pedicelos pubescentes. **Flores** unisexuales; 4-5 sépalos adpreso-pubescentes por fuera y subglabros por dentro; corola glabra, con 5 lóbulos; 5 estambres inclusos; ovario pubescente, con 5 lóculos, estilo incluso, estigma simple o con lóbulos diminutos. **Fruto** globoso, viloso.

Distribución. Amazonas (*Posada 3109*-COAH), en bosques de terraza baja en bosque húmedo tropical.

Comentarios. Esta especie se conoce en Colombia por un único ejemplar recolectado en Puerto Nariño. Puede confundirse con *M. madeirensis* por la venación y el indumento en el envés; sin embargo *M. sanctae-rosae* tiene mayor número de venas secundarias y el indumento es menos largo y denso; además, las flores son pediceladas y el estilo es incluso (flores sésiles y estilo exserto en *M. madeirensis*).

16. *Micropholis splendens* Gilly ex Aubrév. (Figuras 1L y 1M)

Árbol de porte medio, con exudado blanco; yemas adpreso-pubérrulas, ferrugíneas.

Hojas dísticas o helicoidales; haz glabro y envés adpreso-pubérrulo, ferrugíneo a dorado; venas numerosas, que dan a la hoja una apariencia estriada, un poco arqueadas, intersecundarias y terciarias, indistinguibles de las secundarias; peciolo pubérrulo, seríceo o glabro. **Fascículos** ramifloros de 5-10 flores; pedicelo con indumento adpreso-pubérrulo. **Flores** bisexuales; 6 sépalos adpreso-pubérrulos por fuera y por dentro; corola glabra, 5 lóbulos; 5 estambres exsertos; ovario pubescente, 5 lóculos, estilo incluso, estigma lobulado. **Fruto** elipsoide, subglabro; semilla solitaria, lisa, brillante.

Distribución. Caquetá (Ávila 2693 -UDBC), Guainía (*Aymard 14346* - COAH), Vaupés (*Cárdenas 43112* -COAH), en bosque de tierra firme o en planicies de inundación del río Caquetá, cerca de los 200 m de altitud en zona de vida de bosque húmedo tropical.

Comentarios. Esta especie es fácil de reconocer debido a su indumento adpreso-pubérrulo de color ferrugíneo (o dorado) en el envés de la hoja, y el haz glabro. Morfología de flor y fruto basada en **Pennington** (1990).

17. *Micropholis trunciflora* Ducke

Árbol de porte bajo, con exudado blanco; yemas tomentosas, doradas o ferrugíneas.

Hojas dísticas; haz glabro y envés con indumento residual sobre la vena media; venas numerosas, que le dan a la hoja una apariencia estriada, intersecundarias y terciarias, indistinguibles de las secundarias; peciolo tomentoso o con pelos residuales, luego glabro. **Fascículos** axilares o ramifloros, que se desarrollan sobre protuberancias, 2-8 flores; pedicelos tomentosos. **Flores** unisexuales; 4-5 sépalos tomentosos por fuera y glabros por dentro; corola glabra, con 4-5 lóbulos; 4-5 estambres inclusos; ovario pubescente, cinco lóculos, estilo incluso o ligeramente exserto, estigma simple o lobulado. **Fruto** elipsoide a globoso, con 5 sulcos longitudinales, liso, subglabro; semilla solitaria, lisa, brillante.

Distribución. Amazonas (*Arias 2077* -COAH) y Caquetá (*Eusse 1312*- COAH), en bosque de terrazas bajas del río Caquetá, desde 80 hasta 300 m de altitud, en zona de vida de bosque húmedo tropical.

Comentarios. Esta especie puede confundirse con *M. porphyrocarpa*, debido a su indumento tomentoso en las yemas; sin embargo, las inflorescencias en *M. porphyrocarpa* se desarrollan sobre un braquiblasto escamoso y sus flores son sésiles. Las inflorescencias ramifloras de *M. trunciflora* permiten determinarla en campo fácilmente. Morfología del fruto basada en **Pennington** (1990).

18. *Micropholis venulosa* (Mart. & Eichler) Pierre (Figuras 1H, 1J, 1K)

Árboles o arbolitos con exudado blanco que generalmente brota por puntos; yemas con fino indumento pubérrulo o pubescente, adpreso o no. **Hojas** dísticas, haz y envés glabros o con indumento pubérrulo en hojas jóvenes; venas numerosas que dan a la hoja una apariencia estriada, con espaciamiento variable, intersecundarias y terciarias paralelas, distinguibles de las secundarias; peciolo glabro o pubescente. **Fascículos** axilares de 3-15 flores; pedicelos pubescentes. **Flores** unisexuales; 4-5 sépalos pubescentes por fuera y glabros o adpreso pubérrulos por dentro; corola glabra, con 4-5 lóbulos; 4-5 estambres inclusos; ovario pubescente en la base, con 5 lóculos, estilo incluso, estigma simple o con 5 lóbulos. **Fruto** globoso o elipsoide, glabro; semilla solitaria, lisa, brillante.

Distribución. Amazonas (*Navarro 1391* -COAH), Antioquia (*Roldán 3011* -HUA), Boyacá (*Espinal 1640* -MEDEL), Caquetá (*Eusse 1387* -COAH), Chocó (*Forero 4839* -COL), Cundinamarca (*Fernández 16562* -COL), Guainía (*Cárdenas 15229* -COAH), Guaviare (*Córdoba 1865* -COAH), Meta (*Piñeros P. 74* -UDBC), Putumayo (*Betancur 5028* -COL), Santander (*Cogollo 12696* -JAUM), Vaupés (*Defler 560* -COAH), Valle (*Monsalve 3179* -JAUM) y Vichada (*Marín 6171*-COAH), en bosques de tierra firme y de llanura aluvial de inundaciones esporádicas. Es una especie de bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo tropical, bosque pluvial tropical y bosque húmedo premontano desde el nivel del mar hasta los 1400 m de altitud. Florece de marzo a septiembre; fructifica durante todo el año.

Comentarios. *Micropholis venulosa* es una de las especies de mayor distribución del género; tiene una amplia variación vegetativa en cuanto a tamaño de la hoja y apariencia de las venas secundarias; en muchos casos, los individuos de hojas grandes pueden confundirse con *M. egensis*, ya que estos individuos suelen tener la venación secundaria y terciaria paralela muy difícil de distinguir entre sí; sin embargo, *M. egensis* tiene pedicelos más cortos, reflexos hacia la base del pedicelo, cáliz de mayor tamaño y semilla rugosa y mate, mientras que *M. venulosa* tiene pedicelo de mayor tamaño, cáliz más pequeño y semilla lisa y brillante.

19. *Micropholis* sp. 1

Árboles de porte bajo, con exudado blanco que oxida a color crema-naranja; yemas adpreso pubérulas. **Hojas** dísticas; haz y envés glabros; venas numerosas que dan a la hoja una apariencia estriada, intersecundarias y terciarias, indistinguibles de las secundarias; peciolo adpreso-pubérulo o glabro, frecuentemente de color más oscuro que la rama. **Fascículos** axilares de 3-7 flores; pedicelos adpreso-pubescentes. **Flores** con corola glabra. **Fruto** globoso, liso y glabro; semilla solitaria, lisa y brillante.

Distribución. Amazonas (*Restrepo 192*- COAH) y Caquetá (*Eusse 1025* -COAH), en bosques de tierra firme, desde 100 hasta 300 m de altitud, en zona de vida de bosque húmedo tropical. Florece durante agosto, fructifica en febrero.

Comentarios. La incertidumbre en la determinación de los ejemplares que fueron puestos bajo este nombre se debe a que, a pesar de que muchos caracteres coinciden con los de la especie *Micropholis venamoensis* (Steyerm.) T.D. Penn., la cantidad de flores en cada fascículo, junto con sus hojas glabras y textura coriácea, indican que estos individuos no pertenecen a esta especie. En COAH los ejemplares de esta especie se encuentran determinados bajo los nombres *M. cylindrocarpa* y *M. retusa*, pero estos individuos tienen las hojas totalmente glabras y los fascículos con mayor cantidad de flores, por lo que no pertenecen a *M. cylindrocarpa* (con fascículos de 1-2 flores). Además, *M. retusa* tiene la venación secundaria espaciada, con venas terciarias reticuladas, de apariencia no estriada, muy diferente de los ejemplares observados. Los ejemplares pertenecientes a esta especie pueden diferenciarse por sus hojas glabras y textura coriácea con vena primaria hundida en el haz y vena marginal bastante notoria en el haz.

Discusión

El patrón de venación es uno de los caracteres más importantes, no solo para diferenciar el género de los demás de la familia Sapotaceae, sino también para delimitar algunos grupos de especies dentro del género. Las especies de *Micropholis* registradas en Colombia se pueden agrupar en dos categorías: aquellas que tienen hojas de apariencia estriada y órdenes de venación terciaria y superior paralelas a las secundarias, e indiferenciables a simple vista, y aquellas con hojas no estriadas y orden de venación terciaria y superior paralela, diferenciable a simple vista o de tipo poligonal reticulada. Sin embargo, la ausencia de flores en la mayoría de los ejemplares de herbario, debida a su naturaleza efímera en muchas de las especies de Chrysophylloideae (Ferreira *et al.*, 2019), dificulta su determinación.

Aunque el Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia (Bernal *et al.*, 2015) reporta especies como *M. mensalis* y *M. retusa* distribuidas en los departamentos de Caquetá y Vaupés, fue imposible lograr una determinación inequívoca del ejemplar citado como representativo en *M. mensalis* porque no cuenta con flores ni frutos y sus caracteres vegetativos se superponen con los de *M. egensis*. Además, el ejemplar citado como representativo de la especie *M. retusa* corresponde a lo que en este estudio se determinó como *M. sp1*.

En el herbario COAH reposa un ejemplar determinado como *M. cf. cylindrocarpa*, sin embargo, dicho ejemplar corresponde a la especie *M. porphyrocarpa*, en tanto que varios ejemplares determinados bajo el nombre de *M. humboldtiana* corresponden a *M. trunciflora*.

En este estudio se incluyen 19 especies de las 38 reportadas para el Neotrópico, lo que aumenta sustancialmente el número de especies del género registradas en Colombia según el último tratamiento taxonómico del género (Pennington, 1990). Ello puede deberse al gran incremento de las colecciones de los herbarios gracias a una mayor exploración durante los últimos 30 años, especialmente en la región amazónica, en donde se encuentran 15 de las 19 especies registradas en el país. Se destaca la colección del Herbario COAH del Instituto Amazónico Colombiano (SINCHI), en la cual se encuentran depositados especímenes de las 15 especies de distribución amazónica y es la única que alberga actualmente ejemplares de seis de las especies de *Micropholis*. Recientemente, Swenson *et al.* (2023) realizaron la revisión de *Chrysophylloideae* y restablecieron 11 géneros de Sapotaceae a partir de estudios morfológicos y moleculares, lo cual puede variar el número de especies de *Micropholis* para el país, primero, por la posible presencia de alguna de las tres especies ahora incluidas en *Micropholis*, ya que existen registros de herbario en COAH y COL de *Pouteria laevigata* (ahora *Micropholis laevigata*), ejemplares que deberán ser revisados y actualizados en su nomenclatura en el caso de corresponder a dicha especie, y, segundo, por el restablecimiento del género *Lucuma*, lo cual podría afectar particularmente la posición de la especie *M. macrophylla*, cuyo basiónimo es *Lucuma macrophylla* Krause, pero cuyo estatus deberá definirse mediante estudios moleculares y taxonómicos.

Conclusiones

El aumento del conocimiento en torno a la diversidad de especies de *Micropholis* en Colombia en las últimas décadas, gracias a una mayor exploración de los bosques, constituye un claro ejemplo de cómo la exploración botánica no sólo debe continuar, sino que debe incrementarse, especialmente a la luz de la amenaza creciente de la deforestación. Además, es probable que el número de especies de *Micropholis* que crecen en Colombia se incremente cuando se encuentre evidencia adicional que permita definir especies con poca representatividad en los herbarios, o que han pasado desapercibidas debido al uso exclusivo de datos morfológicos en la delimitación de especies.

Agradecimientos

A los directores de los herbarios COAH, COL, FMB, HUA, JAUM, MEDEL y UDBC por permitirnos estudiar las colecciones, al Jardín Botánico de Edimburgo (RBGE) por la financiación de las salidas de campo y, especialmente, al profesor William Ariza y al personal del Herbario UDBC por el procesamiento de las colecciones y por facilitarnos sus instalaciones y equipos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores

LPPU diseñó el proyecto de investigación, ejecutó el estudio, el análisis de los datos y la escritura final del artículo. RCB diseñó el proyecto de investigación, colaboró con el trabajo de campo y de laboratorio y en la revisión del artículo. JER diseñó el proyecto de investigación y colaboró en la revisión del artículo.

Referencias

- Acero, L.E. (1982). *Propiedades, usos y nominación de especies vegetales de la Amazonía Colombiana*. Bogotá: Corporación Araracuara.
- Anderberg, A.A., Swenson, U. (2003). Evolutionary lineages in Sapotaceae (Ericales): a cladistic analysis based on ndhF sequence data. *International Journal of Plant Sciences*, 164(5), 763-773.

- Bernal, R., Celis, M., Gradstein, R.** (2016). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Cárdenas, D., López, R.** (2000). *Plantas útiles de la Amazonia Colombiana-Departamento del Amazonas: perspectivas de los productos forestales no maderables*. Bogotá: SINCHI.
- Duivenvoorden, J. F., Balslev, H., Cavelier, J., Grandez, C., Tuomisto, H., Valencia, R.** (2001). *Evaluación de recursos vegetales no maderables en la Amazonía noroccidental*. Amsterdam: Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics (IBED)-Paleo-ActuoEcology.
- De Faria, A., Pirani, J. R., Da Silva, J. E., Nylinder, S., Terra-Araujo, M. H., Vieira, P. P., Swenson, U.** (2017). Towards a natural classification of Sapotaceae subfamily Chrysophylloideae in the Neotropics. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 185, 27–55.
- Ferreira, A.C., Araújo, J.S., Almeida, E.B.D., Zickel, C.S.** (2019). A new synonym for *Micropholis gardneriana* (Sapotaceae) with complete description, anatomy and distribution notes. *Biota Neotropica*, 20(1). <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2019-0815>
- Holdridge, L.R.** (1967). *Life zone ecology*. Revised Edition, Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
- Minorta-Cely, V., Rangel-CH., O.** (2014). *La Riqueza y la Diversidad de las Plantas con Flores de la Orinoquía Colombiana*. En Rangel-Ch., J.O. (ed). Colombia Diversidad Biótica XIV. La Región de la Orinoquía de Colombia (pp. 237-418). Bogotá. Universidad Nacional de Colombia- Instituto de Ciencias Naturales
- Morales, J.F.** (2015). *Sapotaceae*. En B.E. Hammel, M.H. Grayum, C. Herrera, N. Zamora (eds.). Manual de Plantas de Costa Rica. Vol. VIII (pp 96-140). St. Louis: Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden, 131.
- Pennington, T.D.** (1990). Sapotaceae. Flora Neotropica monograph 52. New York: New York.
- Pennington, T.D., Edwards, K.S.** (2005). *Sapotaceae*. En P.E. Berry, K. Yatskievych, B.K. Holst (Eds.). Flora of the Venezuelan Guayana Vol. 9 (pp. 89-137). St. Louis: Missouri Botanical Garden.
- Sánchez, M.** (1997). *Catálogo preliminar comentado de la flora del Medio Caquetá*. Estudios en la Amazonia colombiana. Bogotá: Editorial Tropenbos Colombia.
- Sánchez-C., D., Richardson, J. E., Hart, M., Serrano, J., Cárdenas, D., González, M., Cortés-B., R.** (2022). A plea to DNA barcode type specimens: An example from *Micropholis* (Sapotaceae). *Taxon*, 71(1), 154-167.
- Swenson, U. & Anderberg, A.A.** (2005). Phylogeny, character evolution, and classification of Sapotaceae (Ericales). *Cladistics*, 21(2), 101-130.
- Swenson, U., Richardson, J. E., Bartish, I. V.** (2008). Multi-gene phylogeny of the pantropical subfamily Chrysophylloideae (Sapotaceae): evidence of generic polyphyly and extensive morphological homoplasy. *Cladistics*, 24 (6), 1006-1031.
- Terra-Araujo, M.H., de Faria, A.D., da Silva Ribeiro, J.E.L., Swenson, U.** (2012). Flower biology and subspecies concepts in *Micropholis guyanensis* (Sapotaceae): Evidence of ephemeral flowers in the family. *Australian Systematic Botany*, 25 (5), 295-303.
- Swenson, U., Lepschi, B., Lowry, P. P., Terra-Araujo, M. H., Santos, K., Nylinder, S. Alves-Araújo, A.** (2023). Reassessment of generic boundaries in Neotropical Chrysophylloideae (Sapotaceae): Eleven reinstated genera and narrowed circumscriptions of *Chrysophyllum* and *Pouteria*. *Taxon*, 72, 307-359.

Natural Sciences

Original article

Contributions to the biodiversity of Echinoderms (Echinodermata) in the Department of Atlántico, Caribbean Sea, Colombia

Contribuciones a la biodiversidad de los equinodermos en el departamento del Atlántico, mar Caribe de Colombia

Yully F. Contreras-Rueda¹, Adriana Gracia-Clavijo^{2,*}, Jairo E. Romero-Paz³

¹ Programa de Posgrado en Ciencias, Biología, Sede Caribe-CECIMAR, Universidad Nacional de Colombia, Santa Marta, Colombia

² Programa de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico, Puerto Colombia, Colombia

³ Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia

Abstract

Echinoderms are a marine invertebrate group with important ecological functions in the ocean; they are the source of bioactive compounds, and some species are important for fisheries and aquaculture. Their study in the Colombian Caribbean has focused on taxonomic and ecological aspects and they are a well-documented group of invertebrates. However, small-scale studies of the group are required given the geomorphological and oceanographic diversity along the entire Colombian coastline. The Magdalena River runoff strongly influences the coastal ecosystems of the Department of Atlántico, which has the shortest continental shoreline with only 72 km. The benthic fauna in its surroundings is the biotic component receiving the influence of this river directly, but it has not been the object of deep taxonomic and ecological studies. Field echinoderm surveys were conducted at several sites from 2004 to 2019. Observations and direct collections were carried out from 0 to 5 m depth. We identified four classes, seven orders, eight families, ten genera, and 16 species. Thirteen of these species were first records for Atlántico: *Luidia senegalensis*, *Astropecten articulatus*, *Amphiodia riisei*, *Amphiodia trychna*, *Echinometra lucunter lucunter*, *Encope michelini*, *Leodia sexiesperforata*, *Mellita quinquesperforata*, *Isostichopus badiionotus*, *Isostichopus* sp., *Holothuria grisea*, *Holothuria glaberrima*, and *Holothuria princeps*. The most frequently observed species were *M. quinquesperforata* and *H. glaberrima*. We provide the local geographic distribution, illustrations, and remarks on each species. This study attempts to close gaps regarding the knowledge of the distribution of marine invertebrates in the Colombian Caribbean Sea.

Keywords: Echinoderms; Marine biodiversity; Baseline; Coastal zone.

Resumen

Los equinodermos son un grupo de invertebrados marinos con funciones ecológicas únicas en el océano; son fuente de compuestos bioactivos y algunas especies son importantes recursos económicos para la pesca y la acuicultura. Los estudios en el Caribe colombiano se han enfocado en aspectos taxonómicos y ecológicos, y en el primer componente, son uno de los grupos de invertebrados mejor documentados. Sin embargo, se requieren estudios del grupo a pequeña escala dada la diversidad geomorfológica y oceanográfica que se presenta a la largo de la línea de costa colombiana. Las descargas del río Magdalena influyen fuertemente en los ecosistemas costeros del departamento del Atlántico, el más pequeño de toda el área continental, con una extensión de sólo 72 km de línea costera. Uno de los componentes bióticos que recibe directamente la influencia de este río es la fauna bentónica que habita en sus alrededores, la cual no ha sido objeto de estudios taxonómicos y ecológicos profundos. Entre el 2004 y el 2019 se hicieron censos de equinodermos en varias localidades realizando observaciones y recolecciones directas entre los 0 y los 5 m de profundidad. Se identificaron cuatro clases, siete órdenes, ocho familias, diez géneros y 16 especies. Trece de ellas son primeros registros para el departamento del Atlántico: *Luidia senegalensis*, *Astropecten*

Citation: Contreras-Rueda YF, Gracia-Clavijo A, Romero-Paz JE. Contributions to the biodiversity of echinoderms (Echinodermata) in the Department of Atlántico, Caribbean Sea, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):315-328, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1740>

Editor: Hernando Campos

***Corresponding autor:**

Adriana Gracia Clavijo;
mariaadrianagracia@mail.uniatlantico.edu.co

Received: August 12, 2022

Accepted: May 5, 2023

Published on line: May 16, 2023



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

articulatus, *Amphiodia riisei*, *Amphiodia trychna*, *Echinometra lucunter lucunter*, *Encope michelini*, *Leodia sexiesperforata*, *Mellita quinquiesperforata*, *Isostichopus badionotus*, *Isostichopus* sp., *Holothuria grisea*, *Holothuria glaberrima* y *Holothuria princeps*. Las especies más frecuentemente observadas fueron *M. quinquiesperforata* y *H. glaberrima*. Se proporciona aquí su distribución geográfica local, con ilustraciones y comentarios sobre cada especie. Este estudio intenta llenar vacíos en el conocimiento de la distribución de los invertebrados marinos en el mar Caribe colombiano.

Palabras clave: Equinodermos; Biodiversidad marina; Línea de base; Zona costera.

Introduction

Echinoderms are of great interest due to their extensive fossil record, their ecological importance as essential components of food webs, the number of key species within marine ecosystems, and because they are fundamental for the bioturbation of sediments contributing to the dynamics of benthic communities, among others (Pawson, 2007; Belaústegui *et al.*, 2017). Some groups like sea urchins and sea cucumbers are important for fisheries trade worldwide. The green sea urchin *Hemicecentrotus pulcherrimus* (= *Strongylocentrotus pulcherrius*), distributed in Japan, Korea, and China, the red sea urchin *Mesocentrotus franciscanus* (= *Strongylocentrotus franciscanus*) found in the North East Pacific (Alaska to California), and the purple sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* in Japan, Russia, and Korea have the highest demand globally (Stefánsson *et al.*, 2017). Sea cucumber species are also appreciated in the Asian market for medicinal and aphrodisiac uses (Vergara *et al.*, 2016). México, Belize, Panamá, Colombia, and Cuba have the highest species diversity in the Caribbean Sea possibly due to two factors: the rich coastal habitats, which are the most diverse in the region, and the increased research activity (Alvarado, 2011). In this context, it is important to study the species and their populations as some species from the Colombian Caribbean are extracted without any control and fished illegally for international commercialization (Alvarado, 2011).

Thanks to their diversity, mobility, and lifestyles, several species can live as epifauna or infauna (in burrows, perforated rocks, tide pools, etc.) in all marine benthic ecosystems and colonize different habitats including some pelagic species which spend most of their lives swimming in the water column, for example, *Eynypniastes eximia* (Class Holothuroidea, Order Elasipodida) (McClintock, 1994; Solís-Marín *et al.*, 2014). Echinoderms exhibit a variety of feeding strategies ranging from body absorption, herbivory, and detritivory to feeding on deposited material and suspended particles, although there are cases of strict specialists (McClintock, 1994; Solís-Marín, 1997; Lessios *et al.*, 2001; Belaústegui *et al.*, 2017), which increases the chances of finding them in different habitats and under different environmental conditions.

The phylum Echinodermata has approximately 7,510 species (WoRMS, 2022) divided into five classes: Crinoidea (lilies or sea feathers, 673 species); Asteroidea (starfish, 1,923 species); Ophiuroidea (brittle stars, 2,126 species); Echinoidea (sea urchins, 1,015 species), and Holothuroidea (sea cucumbers, 1,773 species) (Pawson, 2007; Pawson *et al.*, 2009; WoRMS, 2022), all of which have been recorded for the Colombian Caribbean whose current inventory includes 298 species (Benavides-Serrato *et al.*, 2011; Borrero-Pérez *et al.*, 2012; López-Sánchez *et al.*, 2013; Borrero-Pérez *et al.*, 2019; Borrero *et al.*, 2020). However, these studies do not include localities in the shallow coastal zone of the Department of Atlántico.

In a recent study, the CRA (2016) recorded the presence of the echinoids *Euclidaris tribuloides* (in Puerto Caimán), *Lytechinus variegatus*, and *Diadema antillarum* in the Department. No reference material or collection with specific localities was included in this study, except for the first species. Atlántico is one of the Colombian Caribbean coast departments where ecosystems studies and fauna registers are ongoing.

In this framework, and in the idea of suggesting measures for the protection and conservation of marine biodiversity, our study aimed to continue strengthening the knowledge of Atlántico's coastal zone by identifying the echinoderm species in this area and some

of the environmental conditions in which they are found. We conducted a taxonomic study with reference material of the species identified so far in several localities of the Department. This baseline information will be helpful for conservation issues, studying adaptations to extreme environments, management plans, and for decision-makers in the region.

Materials and methods

Study area

Atlántico is in the last stretch of the Magdalena River on its left flank, from the Canal del Dique (south) to its mouth in the Caribbean Sea. The coastal area of the department has a strong influence from the Magdalena River due to the contribution of sediments and organic and inorganic materials (Rangel-Buitrago *et al.*, 2015; Rangel-Buitrago *et al.*, 2017). Its 72-km coastline has diverse coastal ecosystems including beaches, coastal dunes, incipient coral communities, rocky shores, mangroves, and soft bottoms, and seagrasses have been recently recorded in some sectors (CRA, 2016).

The annual average surface water temperature in the department ranges from 25.5 °C to 29.5 °C and salinity is between 34.5 and 37 ppm (Posada & Henao, 2008). Seasonal variation includes two rainy periods (April-May and October-November) and two dry periods (December-March and July-September) (Rangel *et al.*, 2017). The average wind speed is less than 23 knots; higher velocities are associated with winds blowing from the NE during the dry periods. Lower values are observed from September to November related to winds blowing from the east (Rangel *et al.*, 2017).

Surveys were conducted from 2004 to 2019 along the coastline north to south from the mouth of the Magdalena River including the localities of Bocas de Ceniza and Puerto Mocho (Barranquilla municipality), and the beaches of Salgar, Solinilla, Castillo de Salgar (Puerto Colombia municipality), Puerto Velero, Caño Dulce, Turipana, Playa Mendoza, Santa Verónica (Juan de Acosta municipality), and Punta Astilleros (Piojo municipality) (Figure 1).

Sampling

Sampling and/or observations were done in different littoral areas along the Department's coastline. Unstructured sampling was done in rock formations, between groins and cliffs, in zig-zag trajectories along the sandy coast. For some ophiuroid collections, we used a 0.5 mm sieve.



Figure 1. Locations where echinoderm collections or observations were done on the Atlántico Department coastline

Observations in the field included the habitat of collected or observed organisms. The organisms collected were anesthetized in $MgCO_3$ diluted in seawater and subsequently fixed in 70% alcohol (Hendler *et al.*, 1995). In the laboratory, specimens were placed in distilled water, dried on absorbent paper, and photographed. Taxonomic keys available for each class were used for species identification. We followed the taxonomic order of Clark & Downey (1992) for the Asterozoa, Smith *et al.* (1995) for Ophiurozoa, Serafy (1979) for Echinozoa, and Miller & Pawson (1984) for Holothurozoa. We used the spicules extracted from tentacles and dorsal and ventral epidermis tissue for holothurian identification. Specimens were deposited in the Echinodermata collection of the Museo de Historia Natural Marina de Colombia (MHNMC, MAKURIWA) in Santa Marta. The habitat item describes the environment where the species were observed in the department, plus general information on the species.

Results

We identified four classes, seven orders, eight families, ten genera, and 16 species. The most frequently observed species were *Mellita quinquesperforata* and *Holothuria (Selenkothuria) glaberrima*. This is the first record of *Amphiodia trychna* in continental areas of the Colombian Caribbean since Borrero *et al.* (2019) recorded this species in insular areas. Thirteen species were recorded for the first time in Atlántico, of which only three had been previously recorded. The species are presented in taxonomic order below.

Class **Asterozoa** De Blainville, 1830

Order **Paxillosida** Perrier, 1884

Family **Luidiidae** Sladen, 1889

Luidia senegalensis (Lamarck, 1816) (Figures 2A-B)

Collected material: One specimen INV EQU5155, September 16, 2018, Punta Astilleros. It was found dead on the beach during local fishing activities.

Locations in Atlántico Department: Puerto Mocho, Puerto Velero, Caño Dulce, Santa Verónica, and Punta Astilleros.

Previous records in Colombia: La Guajira, Magdalena, Bolívar, Córdoba, and Sucre Departments (references in Benavides-Serrato *et al.*, 2011).

Distribution: From South Florida, North America, along the coast of Central America to southern Brazil (references in Benavides-Serrato *et al.*, 2011).

Depth: Individuals were observed between 1 and 5 m depth. Although it inhabits between 1 and 64 m depth, it is rarely found at more than 40 m (Clark & Downey, 1992).

Habitat: The species was observed solitary on sandy or muddy sediments, generally in waters with low wave action.

Remarks: *Luidia senegalensis* may be threatened in tourist areas as bathers find them easily and extract them from their environment. This is a common species in the area; it is caught incidentally in trammel nets and other fishing nets and later thrown on the beach, which could be affecting resident populations and their role in the ecosystem.

Family **Astropectinidae** Gray, 1840

Astropecten articulatus (Say, 1825) (Figures 2C-D)

Collected material: Two specimens INV EQU5156, October 10, 2004, Bocas de Ceniza, collected >5m depth by a fishing trammel net. Two specimens INV EQU5157, July 2, 2006, Puerto Mocho, collected >5m depth by a fishing trammel net.

Locations in Atlántico Department: Bocas de Ceniza and Puerto Mocho.

Previous records in Colombia: La Guajira, Gulf of Urabá, and San Andres Island (Benavides-Serrato *et al.*, 2011).

Distribution: From southern Florida, North America, along the coast of Central America to southern Brazil (References in Benavides-Serrato *et al.*, 2011).

Depth: Material was collected at > 5m.

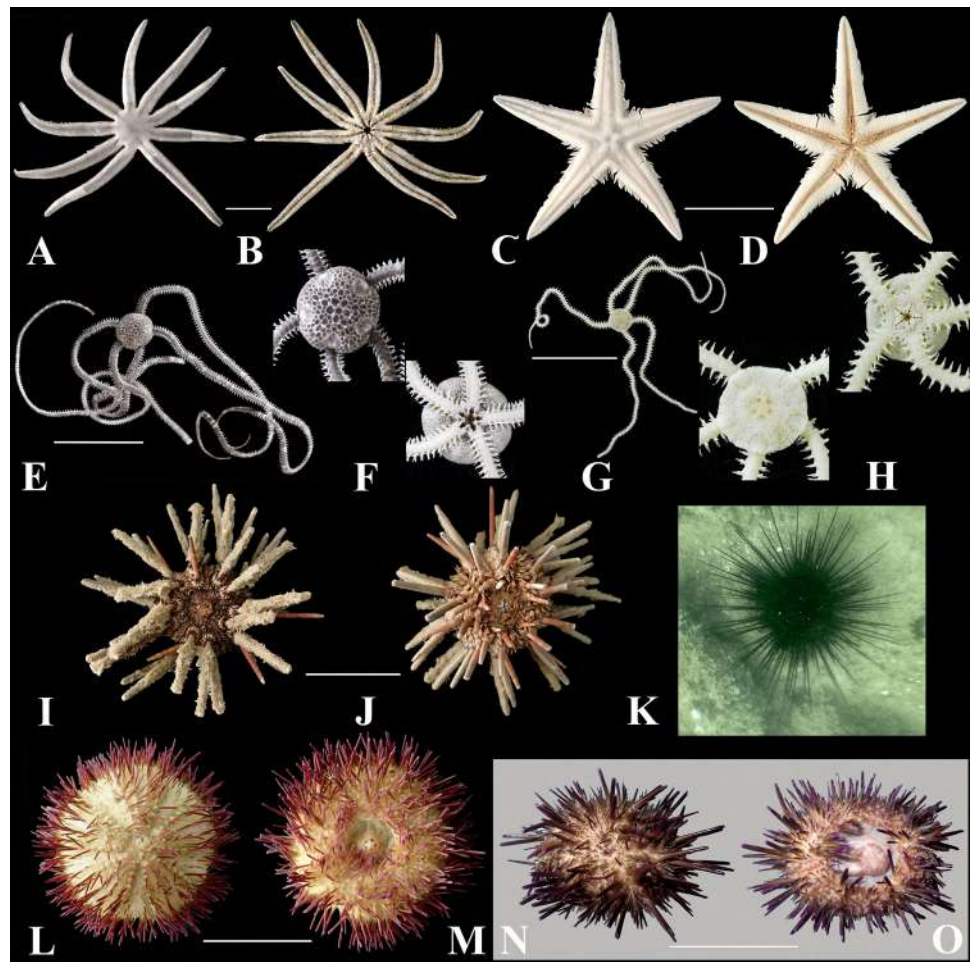


Figure 2. Species of echinoderms present on the coastline of the Atlántico Department. **A-B.** *Luidia senegalensis* INV EQU5155; **C-D.** *Astropecten articulatus* INV EQU5157; **E.** *Amphiodia riisei* INV EQU5159, **F.** Detail aboral and oral views; **G.** *Amphiodia trychna* INV EQU5141, **H.** Detail aboral and oral views; **I-J.** *Eucidaris tribuloides tribuloides* INV EQU5160; **K.** *Diadema antillarum*; **L-M.** *Lytechinus variegatus variegatus* INV EQU5161; **N-O.** *Echinometra lucunter lucunter* INV EQU5164. Scales: **A-D, I-J, L-O:** 5 cm, **E, G:** 1 cm

Habitat: The species was found on sandy mud sediments, generally solitary, in waters with moderate action. This is a common species in soft-bottom habitats along continental shelves of North and South America (Abreu-Pérez *et al.*, 2005).

Remarks: Like *L. senegalensis*, this species was caught in fishing nets incidentally by fishermen and is subject to the same problems.

Class Ophiuroidea Gray, 1840

Order **Ophiurida** Müller and Troschel, 1840

Family **Amphiuridae** Ljungman, 1867

Amphiodia riisei (Lütken, 1859) (Figures 2E-F)

Collected material: One specimen INV EQU5159, March 21, 2017, Puerto Velero, collected at 50 cm depth.

Locations in Atlántico Department: Puerto Velero.

Previous records in Colombia: Sucre and Bolívar departments (references in Benavides-Serrato *et al.*, 2011 as *Ophiophragmus riisei* (Lütken in: Lyman, 1860)).

Distribution: From southern Florida, North America, along the coast of Central America to southern Brazil (references in **Benavides-Serrato et al.**, 2011).

Depth: Material observed at 50 cm.

Habitat: The species was collected in moderate wave action, on the thinnest surface layer of sediment with a muddy texture. According to **Manso et al.** (2008) and **Pawson et al.** (2009), the species is found in sandy sediments formed by very fine sand, fine sand, medium sand, coarse sand, and clay.

Amphiodia trychna H.L. Clark, 1918 (**Figures. 2G-H**)

Collected material: One specimen INV EQU5141, October 12, 2010, Puerto Velero, collected at 30 cm depth by sieving sediments.

Locations in Atlántico Department: Puerto Velero.

Previous records in Colombia: San Andres Island (**Borrero et al.**, 2019).

Distribution: From southern Florida, North America, along the coast of Central America to southern Brazil (references in **Hendler et al.**, 1995).

Depth: Material observed at 30 cm.

Habitat: The species was collected in the thin surface layer of sediment on muddy substrates with low wave action. Arms of other ophiuroid species were also found but they were not included due to the lack of disks. According to **Hendler et al.** (1995), the species can be found in sandy or muddy bottoms without vegetation, in *Thalassia* beds, mangrove channels, and sandy plains associated with reefs.

Remarks: First record for continental areas in the Colombian Caribbean Sea.

Class Echinoidea (Leske, 1778)

Order **Cidaroidea** Claus, 1880

Family **Cidaridae** Gray, 1825

Eucidaris tribuloides tribuloides (Lamarck, 1816) (**Figures 2I-J**)

Collected material: One specimen INV EQU5160, July 29, 2017, Puerto Caiman bank, collected on hard substrates at 1.5 m depth.

Locations in Atlántico Department: Salgar, Castillo de Salgar, Puerto Caiman bank.

Previous records in Colombia: Recorded throughout the Colombian Caribbean including the common area between Colombia and Jamaica (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Distribution: From Cape Hatteras in North America to southern Brazil (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Depth: The species was observed between 0.3 and 2 m.

Habitat: Observed in outstanding cavities under the Castillo de Salgar rock formations associated with *Echinometra lucunter lucunter*, gastropods (*Nerita versicolor*, *Nerita tessellata*, *Plicopurpura patula*), some chitons, and a large community of algae. Castillo de Salgar is an area with highly turbid water, high wave action, and coastal drains from nearby houses. The individuals in Puerto Caiman bank were observed in exposed areas, in coral formations mainly composed of *Millepora* spp., and on rocky bottoms sharing the habitat with sponges, corals, and annelids. This species is usually found on coral reefs, especially within crevices; it has also been seen associated with seagrasses or under rocks and calcareous fragments in shallow waters (**Hendler et al.**, 1995).

Remarks: 1 ind/m² was observed in the rock formation below Castillo de Salgar; in contrast, a high density of 20 ind/m² was found in Puerto Caiman bank.

Order **Diadematoidea** Duncan, 1889

Family **Diadematidae** Gray, 1855

Diadema antillarum Philippi, 1845 (**Figure 2K**)

Collected material: No material was collected, only visual records of the species.

Locations in Atlántico Department: Marina de Puerto Velero, Puerto Caiman bank.

Previous records in Colombia: Distributed along the Colombian Caribbean Sea (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Distribution: Eastern Atlantic, and western Atlantic from the Gulf of México to Brazil (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Depth: The species was observed between 1 and 2 m, although it can be found from 0 to 400 m, usually at less than 50 m (**Pawson et al.**, 2009).

Habitat: In Puerto Caiman bank it was found in hard bottoms dominated by *Millepora* spp. together with *Eucidaris tribuloides tribuloides*, *Echinometra lucunter lucunter*, and *Lytechinus variegatus*. It was observed on the dock piles in the marina of Puerto Velero.

Remarks: Several individuals were observed in Puerto Caiman bank in May 2016 (dry season), although only once. It seems that the species migrates at certain times of the year. It should be noted that the species photographed in **CRA** (2016) clearly does not correspond to *Diadema antillarum*, but rather to *Echinometra lucunter lucunter*.

Order **Temnopleuroida** Mortensen 1942

Family **Toxopneustidae** Troschel, 1872

Lytechinus variegatus variegatus (Lamarck, 1816) (**Figures 2L-M**)

Collected material: One specimen INV EQU5161, July 29, 2017, Puerto Caiman bank, collected on hard bottoms at 1.5 m depth. One specimen INV EQU5162, December 18, 2017, Puerto Velero, was collected on soft bottoms at 1.5 m depth.

Locations in Atlántico Department: Puerto Velero and Puerto Caiman bank.

Previous records in Colombia: The subspecies *L. variegatus variegatus* has been recorded along the coasts of the Colombian Caribbean (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Distribution: The subspecies inhabits from southern Florida to Sao Paulo, Brazil (**Serafy**, 1979).

Depth: Material observed at 30 cm. It has been recorded between 0 and 250 m (**Pawson et al.**, 2009).

Habitat: This species is frequent in the hard bottoms of Puerto Caiman bank; high-wave action is common in the area, although the species is known to inhabit waters with low wave dynamics, mainly associated with seagrasses (**Gómez-Gaspar**, 2000). It can cover part of its upper test with seagrass leaves, fragments of shells, and gravel (**Hendler et al.**, 1995), as seen in our area of study; it can also live on soft bottoms (**Pawson et al.**, 2009).

Remarks: The species was observed in the same habitat with *Echinometra lucunter lucunter* and *Eucidaris tribuloides tribuloides*.

Order **Echinoida** Claus, 1876

Family **Echinometridae** Gray, 1825

Echinometra lucunter lucunter (Linné, 1758) (**Figures 2N-O**)

Collected material: One specimen INV EQU5163, May 24, 2009, Castillo de Salgar, was collected on hard bottoms <1m depth. Two specimens INV EQU5164, May 31, 2009, Castillo de Salgar, were collected on hard bottoms <1 m depth.

Locations in Atlántico Department: Castillo de Salgar, Salgar, Puerto Caiman bank.

Previous records in Colombia: Throughout the Colombian Caribbean, including San Andrés y Providencia (**Borrero-Pérez et al.**, 2002).

Distribution: The species is widely distributed in the Caribbean reaching the coasts of Brazil. It has also been recorded in West Africa (**Hendler et al.**, 1995).

Depth: Material observed at <1 m depth. It has been recorded between 0 and 45 m (**Hendler et al.**, 1995).

Habitat: The species was found in soft bottoms living between the spaces of the groin (on sand) and in crevices of the rocky coast with high and strong wave dynamics.

Remarks: Five individuals were observed on sediments in a gregarious disposition half-hidden among rocky cavities in a 3 m² area of an ancient groin in Salgar beach; there

the animals had a light brown color in the spines of their aboral region and purple tubercles in the anterior region; the peristomic membrane was pale pink with white spots and purple inter-ambulatory grooves covered by spines with blunt-tipped terminals, small teeth not very visible, the diameter of the test ranged from 58.5-44.10 mm and the height was 32.6-22.4 mm. These sea urchins were found in a different way than what is commonly observed in the Colombian Caribbean, as they perched on sandy substrates with the oral side directly attached to the sediment, possibly due to the absence of a consolidated rocky substrate in the study area. The species adapt to environmental limitations, which could explain the small size of the teeth. Several individuals were also observed on hard bottoms of Puerto Caiman bank. The species was found sharing the habitat with *Holothuria (Selenkothuria) glaberrima*, *Eucidaris tribuloides tribuloides*, and *Lytechinus variegatus variegatus*.

Order **Clipeasteroidea** A. Agassiz, 1872

Family **Mellitidae** Stefanini, 1911

Encope michelini (L. Agassiz, 1841) (**Figures 3A-B**)

Collected material: Six specimens INV EQU5165, April 10, 2008, Santa Verónica, were collected on sandy bottoms at 1 m depth. One specimen INV EQU5166, July 23, 2017, Puerto Velero, was collected on the beach. One specimen INV EQU5167, August 3, 2017, Santa Verónica, was collected on the beach.

Locations in Atlántico Department: Puerto Velero and Santa Verónica.

Previous records in Colombia: Magdalena (**Borrero-Pérez et al.**, 2012) and Córdoba departments (**Quirós-Rodríguez**, 2015).

Distribution: From Cape Hatteras (North America) to Colombia (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Depth: Material observed at 1 m. It has been recorded between 3 and 90 m (**Hendler et al.**, 1995).

Habitat: In Atlántico it was found on sand in the most superficial part of the sediments. This species is associated with sandy substrates with calcareous fragments and soft bottoms (**Pawson et al.**, 2009).

Remarks: The species was found in Santa Verónica sharing its habitat with *Mellita quinquiesperforata*. *Encope michelini* was found less frequently, around 2 ind/m². The species had an olive-green color on the dorsal surface, lighter in the oral part, unlike those recorded by **Hendler** (1995) in Florida, whose dorsal surface presents a range of brown to purple coloration.

Leodia sexiesperforata (Leske, 1778) (**Figures 3C-D**)

Collected material: One specimen INV EQU5168, October 4, 2008, Santa Verónica, was collected on the sandy bottom at 80 cm depth. One specimen INV EQU5169, August 3, 2017, Santa Verónica, was collected on the beach.

Locations in Atlántico Department: Salgar, Castillo de Salgar, Puerto Caiman Bank, Balneario de Turipana, and Santa Verónica.

Previous records in Colombia: La Guajira, Magdalena, Bolívar, and San Andrés y Providencia departments (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Distribution: From southern Florida, along the coast of Central America to southern Uruguay (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Depth: Material observed at 80 cm. It has been recorded between 0 and 60 m but is common at less than 25 m (**Hendler et al.**, 1995).

Habitat: Apparently, the species is distributed along the Atlántico Department coastline, although it is not frequent throughout the year.

Mellita quinquiesperforata (Leske, 1778) (**Figures 3E-F**)

Collected material: 30 specimens INV EQU5170, October 4, 2008, Santa Verónica, were collected on sandy bottoms at 80 cm depth. Eleven specimens INV EQU5171, May 16, 2009, Puerto Colombia, were collected on sandy bottoms at 80 cm depth. Four

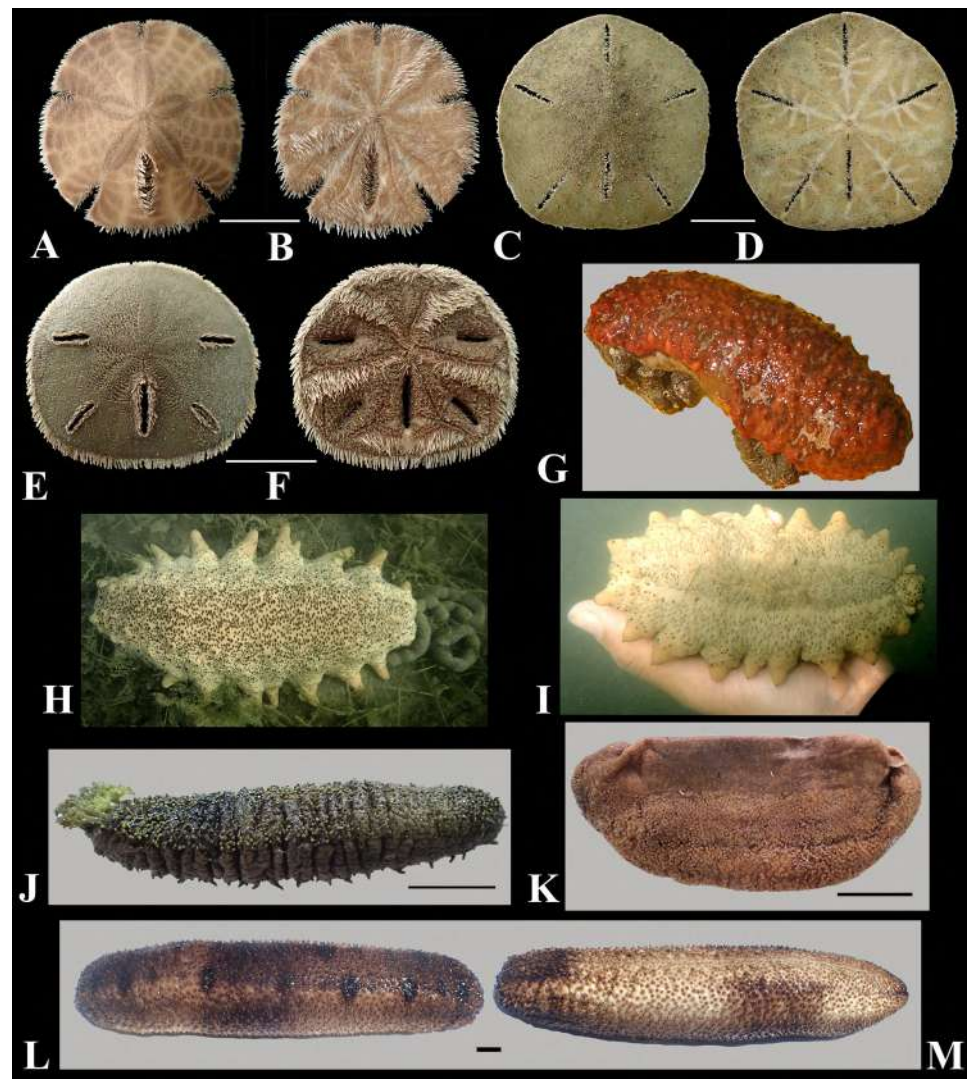


Figure 3. Species of echinoderms present on the coastline of the Atlántico Department. **A-B.** *Encope michelini* INV EQU5165; **C-D.** *Leodia sexiesperforata* INV EQU5169; **E-F.** *Mellita quinquiesperforata* INV EQU5172; **G.** *Isostichopus* sp.; **H-I.** *Isostichopus badionotus*; **J.** *Holothuria (Halodeima) grisea* INV EQU5174; **K.** *Holothuria (Selenkothuria) glaberrima* INV EQU5175; **L.** *Holothuria (Theelothuria) princeps* recorded on April 10, 2016. Scales: **A-F:** 2 cm, **H-I:** hand scale, **J-K:** 2 cm, **L-M:** 1.2 cm

specimens INV EQU5172, September 16, 2018, Punta Astilleros, were collected on the beach. Five specimens INV EQU5173, August 3, 2017, Playa Mendoza, were collected on the beach.

Locations in Atlántico Department: Salgar, Puerto Colombia, Turipana, Playa Mendoza, Santa Verónica, and Punta Astilleros.

Previous records in Colombia: Magdalena, Bolívar, and Córdoba Departments (References in Borrero-Pérez *et al.*, 2012; Quirós-Rodríguez, 2015).

Distribution: On the coasts of North America, Florida, and the Bahamas Islands (Hendler *et al.*, 1995).

Depth: Material observed at 80 cm. It has been recorded between 1 and 180 m (Pawson *et al.*, 2009).

Habitat: It was common to observe individuals half-buried or covered by a light layer of sand, unlike *Encope michelini* which was recorded in the most superficial part of the sediment.

Remarks: This was the most frequent and abundant species in the study area with a density greater than 50 ind/m² according to the count done with a 1-m² grid. This sand dollar was commonly found in large agglomerations of sandy infralittoral mud at 1 m depth, generally in high wave areas. In some records, malformations in the test were found in over 20 ind/m², similar to that reported by **Gray & Weihe** (1968 in **Hendler** 1995), who attributed them to predation by the blue crab *Callinectes sapidus* and wave action during storms. In Puerto Colombia, an unidentified crab species is a potential predator of this sand dollar.

Class **Holothuroidea** (Brainville, 1834)

Order **Aspidochirotida** Grube, 1840

Family **Stichopodidae** Haeckel, 1896

***Isostichopus* Deichmann, 1958**

***Isostichopus* sp. (Figure 3G)**

Collected material: No material was collected; only the photographic record was obtained. May 22, 2016.

Locations in Atlántico Department: Puerto Caiman bank.

Depth: The individual was observed at 1 m.

Habitat: This species was observed on sandy sediments among corals and rocks.

Remarks: The individual observed could correspond to a new species. A study is currently underway to determine the differences within the genus *Isostichopus* in the Colombian Caribbean (pers. com. G. Borrero-Invemar).

***Isostichopus badionotus* (Selenka, 1867) (Figures 3H-I)**

Collected material: No material was collected; only the photographic record was obtained. April 23, 2017.

Locations in Atlántico Department: Puerto Velero.

Previous records in Colombia: Distributed throughout the Colombian Caribbean including San Andrés y Providencia (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Distribution: Western Atlantic, from South Carolina to Brazil. Also recorded in the eastern Atlantic (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Depth: The individual was observed at 1 m depth. It has been recorded between 0 and 70 m (**Hendler et al.**, 1995).

Habitat: The species was observed on sandy bottoms among underdeveloped seagrasses.

Remarks: Only one individual was observed during sampling. However, the species can reach high densities in other Caribbean areas; for example, 24 individuals were observed in 400 m² in a study in Yucatán (**López-Rocha**, 2012). The species was confirmed by G. Borrero-Invemar.

Family **Holothuriidae** Ludwig, 1894

***Holothuria (Halodeima) grisea* Selenka, 1867 (Figure 3J)**

Collected material: Two *specimens* INV EQU5174, July 23, 2017, Puerto Velero, were collected on the beach.

Locations in Atlántico Department: Puerto Velero.

Previous records in Colombia: La Guajira, Magdalena, Bolívar, San Andrés Island (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Distribution: Western Atlantic, from Florida to southern Brazil. Also recorded in the eastern Atlantic (references in **Borrero-Pérez et al.**, 2012).

Depth: The material was observed at 40 cm.

Habitat: The species was observed exposed on intertidal sandy bottoms or wrapped-among seaweed, probably by wave action or due to bathers' intervention.

Remarks: According to **Hendler *et al.*** (1995), red or reddish-yellow coloration predominates in the species contrasting with brown spots while the papillae show yellow tips on the dorsal surface of the body. However, the individuals found in this study have white papillae with generally brown spots.

Holothuria (Selenkothuria) glaberrima Selenka de 1867 (**Figure 3K**)

Collected material: Two specimens INV EQU5175, November 4, 2006, Salgar, were collected close to a groin.

Locations in Atlántico Department: Salgar, Castillo de Salgar, and Caño Dulce.

Previous records in Colombia: Isla Tierra Bomba and Santa Marta (**Caycedo, 1978; Ortiz-Gómez, 2006**).

Distribution: From the Gulf of México to Venezuela (references in **Borrero-Pérez *et al.*, 2012**).

Depth: The material was observed at 30 cm.

Habitat: The individuals were collected on rocky substrates covered with abundant algae and exposed to strong wave action. This species is found from intertidal zones down to 42 m (**Pawson *et al.*, 2009**).

Remarks: This species was recorded in areas with high wave action, half-buried in the sand, in the intermediate spaces of the rocks that make up the groin, but rarely on the surface of that structure. In contrast to the observations by **Caycedo (1978)**, the species was recorded on sandy substrates with three-quarters of the U-shaped body buried and the tentacles extended.

On the Castillo de Salgar rock formation, 1-2 individuals were recorded for each rock associated with *Echinometra lucunter lucunter*, the gastropods *Nerita versicolor*, *Nerita tessellat*, and *Plicopurpura patula*, as well as some chitons and hermit crabs. Some individuals were observed in sediments with trapped litter (sticks, bottles, plastic). They were observed feeding on pieces of *Eichhornia crassipes*, a widespread plant that floats from the Magdalena River.

Holothuria (Theelothuria) princeps Selenka, 1867 (**Figures 3L-M**)

Collected material: One specimen INV EQU5023, June 18, 2019, Puerto Velero. Photographic records in the field: three individuals, April 10, 2016; one individual, May 11, 2019, Puerto Velero.

Locations in Atlántico Department: Puerto Velero.

Previous records in Colombia: Santa Marta (**Borrero-Pérez *et al.*, 2012**).

Distribution: From the Gulf of México to Venezuela (references in **Borrero-Pérez *et al.*, 2012**).

Depth: The material was observed at 50 cm.

Habitat: The species was observed on sandy bottoms among underdeveloped seagrasses.

Remarks: The species was confirmed by G. Borrero-Invemar.

Discussion

Sixteen species were found in this study. However, this number is expected to increase significantly in the future since there are still various locations, depths, and ecosystems to explore, especially in ophiuroids inhabiting the coastal zone as the sampling intensity in this class was low. It is important to emphasize that more quantitative and population studies are needed to establish the temporality of the species.

With the information obtained so far, we may conclude that coastline Atlántico echinoderm taxonomic composition is not so rich as that found in studies in other Colombian Caribbean areas (*e.g.*, **Caycedo, 1978; Gallo, 1988a, 1988b; Borrero-Pérez *et al.*, 2019**). This may be explained by the fact that the study area is especially affected by high sedimentation and low salinity in some periods of the year due to the Magdalena River (**Molina *et al.*, 1998**). Based on our observations, the influence of sedimentation

caused by the river plume and the increase in water turbidity may not be a very favorable factor for the larval establishment of the most common Colombian Caribbean echinoderm species. Atlántico's coastline may be an exceptional laboratory regarding the adaptation to extreme turbidity and suspended sediment environments that have not been explored on the Colombian Caribbean coast.

We observed that some species do not correspond to the ecological conditions that have been documented in other areas. For example, *Eucidaris tribuloides tribuloides* was observed with higher frequency on hard bottoms but also in sandy sediments, in contrast to the description by **Hendler et al.** (1995) affirming that the species is found in coral reef cracks. It is perhaps the most abundant echinoid species in the Department according to the photographic records and the field data where coral communities and seagrasses are incipient. Many species normally found in those ecosystems were not reported until now, or their population densities are very low, as is the case of *Echinometra lucunter lucunter*. In the Tayrona National Park there has been a maximum of 176 sea urchins/m² (**Romero-Paz**, 2009) while in the Magdalena Department, *Diadema antillarum* recorded density has been 12 ind/m² (**González & García**, 2011).

Class Holothuroidea stands out; no previous records of this class were known for the area. As in other localities of the Colombian Caribbean, this class was massively and illegally exploited in Atlántico's coastal area in the early 2000s (Pers. Com. fishers of the region, 2022). The impact caused on the species identified, or others that may have been affected, is unknown. Therefore, it is essential to continue studying and monitoring this group.

Conclusions

We identified four classes, seven orders, eight families, ten genera, and 16 species, 13 of which were the first records for Atlántico. The most frequently observed species were *M. quinquiesperforata* and *H. (S.) glaberrima*. It should be noted that *E. tribuloides tribuloides* was found exposed on rocks or sediments, and *E. michelini* was always found sharing the habitat with *M. quinquiesperforata*. Also, some *E. lucunter* individuals are different from those found in the department of Magdalena in terms of size, the shape of the test, spines, and teeth.

Some species of the community of echinoderms in the shallow waters of Atlántico occur regularly but not permanently throughout the year. This fauna is composed of species adapted to high stress or highly disturbed environmental conditions in an area of high sedimentation and turbidity. Future studies will obtain information on other species as more localities and habitats are explored. Further studies on taxonomy, including molecular aspects, are required, as well as population and development studies, among others. Finally, the effect of sedimentation on these species should be investigated.

Acknowledgments

We thank Dr. Giomar Borrero Pérez and Erika Ortiz for their valuable collaboration in confirming four species (GB: *Isostichopus* sp., *Isostichopus badionotus*, *Holothuria (Theelothuria) princeps*; EO: *Amphiodia trychna*); Erika Montoya for her help in the Echinodermata collection (MHNMC), and Dr. Nelson Rangel for his support in some of the field trips and map production. This work is a contribution to the research group on "Geology, Geophysics, and Marine-Coastal Processes" at Universidad del Atlántico (Colombia).

Authors' contributions

YFCR: Collecting data, Writing – original draft, Writing – review & editing. AGC: Conceptualization, Collecting data, Writing – original draft, Writing – review & editing. JERP: Collecting data, Writing – review & editing.

Conflicts of interest

Authors declare that they have no conflicts of interest.

References

- Abreu-Pérez, M., Solís-Marín, F.A., Laguarda-Figueras, A.** (2005). Catálogo de los equinodermos (Echinodermata: Asterozoa y Ophiurozoa) nerítico-bentónicos del Archipiélago Cubano. *Revista de Biología Tropical*, 53 (Supl 3), 29-52.
- Alvarado, J.J.** (2011). Echinoderm diversity in the Caribbean Sea. *Marine Biodiversity*, 41, 261-285. <https://doi.org/10.1007/s12526-010-0053-0>
- Arana, P.M.** (2005). Demografía y pesquería del erizo *Loxechinus albus* (Echinodermata: Echinidae) en la región sur-austral de Chile. *Revista de Biología Tropical*, 53(3), 367-382.
- Barrios, J., Reyes, J.** (2009). Hábitos alimenticios de *Tripneustes ventricosus* (Lamarck 1816) (Echinodermata, Echinozoa) en isla la Tortuga, Venezuela. *Recursos Marinos Acuiferos*, 2, 583-589.
- Bayer F., Voss, G., Robins, R.** (1970). *Bioenvironmental and radiological safety feasibility studies Atlantic Pacific inter oceanic Canal*. Report on the marine fauna and benthic shelf slope communities of the Isthmian Region, University of Miami, Florida.
- Belaústegui, Z., Muñiz, F., Nebelsick, J.H., Domènech, R., Martinell, J.** (2017). Echinoderm ichnology: bioturbation, bioerosion and related processes. *Journal of Paleontology*, 91(4), 643-661. <https://doi.org/10.1017/jpa.2016.146>
- Benavides-Serrato, M., Borrero-Pérez, G.H., Díaz-Sánchez, C.M.** (2011). *Equinodermos del Caribe colombiano I: Crinozoa, Asterozoa y Ophiurozoa*. Serie de Publicaciones Especiales de Inveemar 22.
- Borrero-Pérez, G.H., Solano, O.D., Benavides-Serrato, M.** (2002). Lista revisada de los erizos (Echinodermata: Echinozoa) del mar Caribe colombiano. *Biota Colombiana* 3(1), 141-148.
- Borrero-Pérez G.H., Benavides-Serrato, M., Díaz-Sánchez, C.M.** (2012). *Equinodermos del Caribe colombiano II: Echinozoa y Holothurozoa*. Serie de Publicaciones Especiales de Inveemar No. 30.
- Borrero-Pérez, G.H., Benavides-Serrato, M., Campos, N.H., Galeano-Galeano, E., Gavio, B., Medina, J., Abril-Howard, A.** (2019) Echinoderms of the Seaflower Biosphere Reserve: State of Knowledge and New Findings. *Frontiers in Marine Science*, 6,188. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00188>
- Borrero-Pérez, G.H., Dueñas, L.F., León, J., Puentes, V.** (2020). Deep-sea holothurians (Echinodermata, Holothurozoa) from the Colombian Southern Caribbean Sea. *Check List*, 16(3), 535-551. <https://doi.org/10.15560/16.3.535>
- Caycedo, I.E.** (1978). Holothurozoa (Echinodermata) de aguas someras en la costa norte de Colombia. *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betón*, 10, 149-198.
- Clark, A.M., Downey, M.** (1992). *Starfishes of the Atlantic*. Natural History Museum Publications. London, New York. Chapman and Hall.
- CRA.** (2016). *Atlas de Flora y Fauna Marino Costera del departamento del Atlántico*. Corporación Autónoma Regional del Atlántico, Gente Nueva.
- Gallo, J.** (1988a) Contribución al conocimiento de los equinodermos del Parque Nacional Natural Tayrona: I Echinozoa. *Trianea*, 1, 99-118.
- Gallo, J.** (1988b) Contribución al conocimiento de los equinodermos del Parque Nacional Natural Tayrona: II Ophiurozoa. *Trianea*, 2, 383-402.
- Gómez-Gaspar, A.** (2000). Abundancia de *Lytechinus variegatus* (Echinozoa: Toxopneustidae) en la isla de Cubagua, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 48(1), 125-131.
- González, F.T., García, R.** (2011). Estado actual de las poblaciones del erizo negro *Diadema antillarum* Philippi (Echinozoa: Diadematidae) en el Parque Nacional Natural Tayrona y playa Blanca, Santa Marta, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 40, 401-17.
- Hendler G, Miller, J., Pawson, D., Porter, M.** (1995). *Echinoderms of Florida and the Caribbean. Sea Stars, Sea Urchins and allies*, Smithsonian Institution.
- Lessios, H.A., Kessing, B.D., Pearse, J.S.** (2001). Population structure and speciation in tropical seas: global phylogeography of the sea urchin *Diadema*. *Evolution*, 55(5), 955-975. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2001.tb00613.x>
- López-Rocha, J. A.** (2012). Distribución y abundancia del pepino de mar *Isostichopus badionotus* frente a la Costa de Sisal, Yucatán. *Proceedings of the 64th Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 153-160.
- López-Sánchez, M., Perdomo, S., Pineda, M.C., Díaz-Aragón, G.R., Ahrens, M.J.** (2013). Primer registro del holoturoideo *Pseudothyone belli* (Ludwig) (Dendrochirotida, Sclerodactylidae) para el Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 42(2), 395-400.

- Manso, C.L.D.C., Alves, O.F.D.S., Martins, L.R.** (2008). Echinoderms from Todos os Santos Bay and Aratu Bay (Bahia, Brazil). *Biota Neotropica*, 8(3), 179-196. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032008000300017>
- McClintock, J.B.** (1994). Trophic biology of Antarctic shallow-water echinoderms. *Marine Ecology Progress Series*, 111(1), 191-202.
- Miller J. E., Pawson, D. L.** (1984). Holothurians (Echinodermata: Holothuroidea). *Memoirs of the Hourglass Cruises*, 7(1), 1-79.
- Molina, A., Molina, C., Molina, E., Giraldo, L.** (1998). Variaciones morfológicas y estructurales de las playas entre Barranquilla y Flechas de Galerazamba (1995-1996). *Boletín Científico CIOH*, 18, 23-38.
- Ortiz-Gómez, E.P.** 2006 Cambio espicular en algunos pepinos de mar del género *Holothuria* Linnaeus, 1758 (Echinodermata: Holothuroidea) presentes en el Caribe y Pacífico colombianos. (Undergraduate thesis) Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá Colombia.
- Pawson, D.L.** (2007). Phylum Echinodermata. *Zootaxa*, 1668 (1), 749-764. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.1668.1.31>
- Pawson, D.L., Vance, D.J., Messing, C.G., Solís-Marín, F.A., Mah, C.L.** (2009). *Echinodermata of the Gulf of Mexico*. In: D. L. Felder, D. Camp (Eds). Gulf of Mexico Origin, Waters, and Biota, Volume 1, Biodiversity (pp 1177-1204). Texas A&M University Press, Corpus Christi, U.S.A.
- Posada, B., Henao, W.** (2008). *Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. Santa Marta, Colombia*. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 13: 34-35
- Quirós-Rodríguez, J.A.** (2015). Equinodermos en fondos someros del sector La Ahumadera, bahía de Cispatá, Córdoba, Caribe colombiano. *Acta Biológica Colombiana*, 20(1), 101-108. <https://doi.org/10.15446/abc.v20n1.42529>.
- Rangel-Buitrago, N.G., Anfuso, G., Williams, A.T.** (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, 114, 129-144. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024>
- Rangel-Buitrago, N., Williams, A., Anfuso, G., Arias, M., Gracia, A.** (2017). Magnitudes, sources, and management of beach litter along the Atlántico Department coastline, Caribbean coast of Colombia. *Ocean & Coastal Management*, 138, 142-157. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.01.021>
- Reyes-Luján, J., Arrieche, D., Zapata-Vívenes, E., Barrios, J., Salgado, W., Lodeiros, C.** (2015). Ciclo gametogénico del erizo marino *Echinometra lucunter* (Echinometra: Echinoidea) en el Nororiente de Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 63, 273-283. <https://doi.org/10.15517/rbt.v63i2.23162>
- Romero-Paz, J.E.** (2009). Estudio poblacional de *Echinometra lucunter* (Echinodermata: Echinoidea) en la zona litoral rocoso en la ensenada de Bahía Concha, Parque Nacional Tayrona (PNNT), Caribe colombiano, desde noviembre del 2007 a mayo del 2008. (Undergraduate thesis) Universidad del Atlántico, Puerto Colombia, Colombia.
- Serafy, D.K.** (1979). *Memoirs of the Hourglass Cruises. V (III): Echinoids (Echinodermata: Echinoidea)*. St. Petesburg, Florida. Florida Dep. Nat. Res., Florida.
- Smith, A.B., Paterson, G.L.J., Lafay, B.** (1995). Ophiuroid phylogeny and higher taxonomy: morphological, molecular and palaeontological perspectives. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 114, 213-243. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1995.tb00117c.x>
- Solís-Marín, F.A.** (1997). Catálogo de los equinodermos recientes de México. Informe Técnico del Proyecto CONABIO, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, México D.F., Universidad Autónoma de México.
- Stefánsson, G., Kristinsson, H., Ziemer, N., Hannon, C., James, P.** 2017. *Markets for Sea Urchins: A review of global supply and markets*. Icelandic Food and Biotech R&D. Matis.
- Vergara, W., Villazón, M., Pabón, L., Agudelo, V., Rodríguez, A.** (2016). *Manual para el cultivo y procesamiento de pepino de mar*. Editorial Unimagdalena.
- WoRMS. 2022.** World Register of Marine Species. Available in <http://www.marinespecies.org/>. Last accessed on June 29, 2022.

Ciencias Naturales

Artículo original

Una nueva especie de *Chaetolepis* (Melastomeae, Melastomataceae) en Bogotá, Colombia

A new species of *Chaetolepis* (Melastomeae, Melastomataceae) in Bogotá, Colombia

 Humberto Mendoza-Cifuentes^{1,*},  Cristian Castro^{2,3}

¹ Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá, D.C., Colombia

² Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá), Bogotá, D.C., Colombia

³ Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas – SINCHI, Bogotá, D.C., Colombia

Resumen

Chaetolepis es un pequeño género de 11 especies de arbustos y hierbas de zonas montañosas, en su mayoría neotropicales. Como producto de la revisión de la familia Melastomataceae para el proyecto Flora de Bogotá, se hizo la descripción, ilustración y mapeo de una nueva especie del género y se establecieron las diferencias con especies morfológicamente cercanas.

Palabras clave: Sumapaz; Páramos; Flora de Colombia; Taxonomía.

Abstract

Chaetolepis is a small genus composed of 11 species of shrubs and herbs mostly from Neotropical mountainous areas. As a product of the revision of the Melastomataceae family for the project on Bogotá's flora, we described a new species of the genus including illustrations and mapping, and we established its differences with morphologically close species.

Keywords: Sumapaz; Bogotá; Páramos; Flora of Bogotá; Taxonomy.

Introducción

Chaetolepis (DC.) Miq. es un pequeño género de 11 especies de arbustos y hierbas de zonas montañosas, en su mayoría neotropicales. Se distribuye desde Costa Rica, Colombia y Venezuela hasta las tierras altas de Guayana y el oeste de Cuba, y una especie crece en zonas montañosas de África Occidental (Grimm & Almeda, 2013).

Se distingue de otros géneros por las flores 4-meras, el ovario 4-locular, apicalmente setuloso, el conectivo de la antera simple, no prolongado por debajo de las tecas, y semillas cocleadas con testa lisa o finamente muricada (Almeda, 2001).

En Colombia el género cuenta con siete especies que crecen en zonas andinas y en la Sierra Nevada de Santa Marta entre los 1.800 y 3.700 m de elevación (Grimm & Almeda, 2013; Almeda *et al.*, 2016).

En el curso de una reciente revisión de colecciones en el marco de la realización de la monografía de Melastomataceae para el proyecto Flora de Bogotá, se halló un conjunto de caracteres únicos en algunos especímenes, entre ellos el hábito de crecimiento y el indumento, que no concordaban con las especies registradas de *Chaetolepis*, por lo que se concluyó que se trataba de una especie no descrita aún. En este artículo se describe e ilustra este nuevo taxón y se documentan sus diferencias con las especies de mayor semejanza dentro del género.

Citación: Mendoza-Cifuentes H, Castro C. Una nueva especie de *Chaetolepis* (Melastomeae, Melastomataceae) en Bogotá, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):329-334, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1859>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Humberto Mendoza-Cifuentes;
hummendoza@gmail.com;
hmendoza@jbb.gov.co

Recibido: 25 de enero de 2023

Aceptado: 5 de mayo de 2023

Publicado en línea: 16 de mayo de 2023



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

Materiales y métodos

En el marco del proyecto Flora de Bogotá, se revisaron colecciones de *Chaetolepis* de los herbarios del Jardín Botánico de Bogotá (JBB), de la Universidad Distrital (UDBC) y de la Universidad Nacional de Colombia (COL). Entre las colecciones revisadas se hallaron especímenes herborizados durante las expediciones para el inventario del proyecto en la zona de la Reserva Campesina de Sumapaz. Se procedió a describirlos e ilustrar la novedad encontrada. Para ello se tomaron las medidas de las partes vegetativas y de las inflorescencias en material seco de herbario utilizando un calibrador digital Mitutoyo (Serie 500) de 0,01 mm de precisión. Las medidas de las partes florales se basaron en material seco rehidratado. Los tipos de tricomas se identificaron a partir del atlas de tricomas de Melastomataceae de **Wurdack** (1986).

Resultados

Chaetolepis sumapacensis Humberto Mend. & C. Castro, sp. nov. (**Figuras 1, 2**).

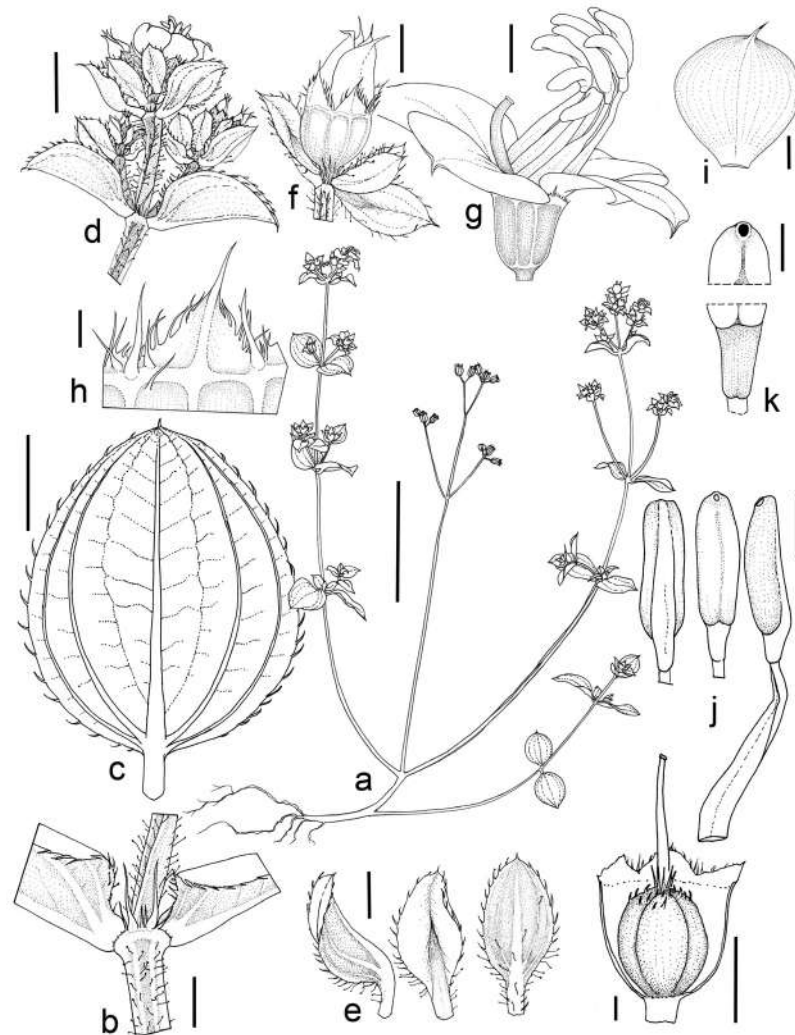


Figura 1. *Chaetolepis sumapacensis*. **a.** Rama florífera, **b.** Nudo, **c.** Hoja vista por el envés, **d.** Inflorescencia, **e.** Bracteolas, **f.** Botón floral, **g.** Flora abierta, **h.** Vista externa del lóbulo calicino, **i.** Pétalos, **j.** Antera y estambre en vista dorsal (izq.), ventral (cent.) y lateral (der.), **k.** Detalle del conectivo en la base de la antera (inf.) y del ápice de la antera (sup.), **l.** Detalle del fruto inmaduro. Escala: 5 cm **a**; 5 mm **c**, **d**; 2 mm **b**, **f**, **g**, **e**, **l**; 1 mm **i**; 0.5 mm **k**; 0.2 mm **h**.

TIPO: COLOMBIA. **Bogotá DC:** corregimiento Nazareth, localidad Sumapaz, camino vereda Ánimas Bajas hacia vereda Las Palmas, 2.884 m, 4°9'18,2''N, 74°9'50,4''O, 26 sep 2019 (fl), S. Urbano *et al.* 2666 (holótipo: JBB!).

Diagnosis. *Chaetolepis sumapacensis* is characterized by upright herbs, glabrous internodes and leaves, abaxial blade leaf with glandular dots, and inflorescence axes with long-stalked gland trichomes. It closely resembles *Chaetolepis thymifolia*, but it differs, in addition to the previous characters, in the absence of elongated slightly roughened trichomes, and the stamen and ovary are bigger. It also closely resembles *Chaetolepis anisandra*, but differs in the smaller petals and stamens, 3-18 flowered inflorescences (vs. 1 flowered in *C. anisandra*), and suborbicular with rounded apex petals (vs. obovate and obtuse apex).

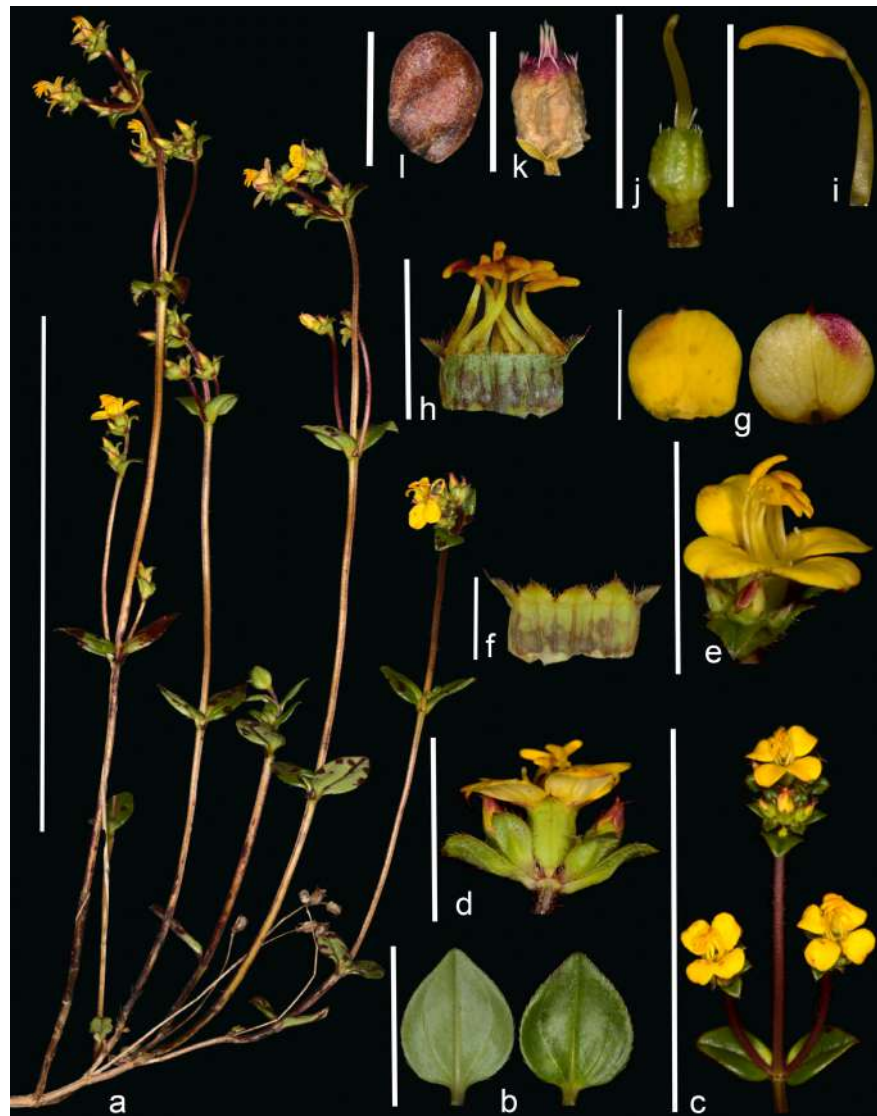


Figura 2. Imágenes de campo de CC 1944 *Chaetolepis sumapacensis*. **a.** Rama florífera, **b.** Hojas vista por el envés (izq.) y la haz (der.), **c.** Inflorescencia, **d.** Ápice de la inflorescencia, **e.** Flor abierta, **f.** Vista externa del cáliz del hipanto-abierto, **g.** Pétalos en vista ventral (izq.) y dorsal (der.), **h.** Vista interna del hipanto y estambres, **i.** Estambre, **j.** Ovario y estilo, **k.** Fruto inmaduro, **l.** Semilla. Escala: 10 cm **a**; 1,5 cm **b**; 5 cm **c**; 2,5 cm **d**, **e**; 4 mm **f**; 4,7 mm **g**; 9 mm **h**; 4,5 mm **i**, 5 mm **j**; 3 mm **k**, 0,5 mm **l**.

Hierbas erectas de 0,2–0,8 m de altura, regularmente ramificadas desde la base. **Entrenudos** de 1,6–5,2 cm de largo, cuadrangulares, levemente aristados, glabros; línea interpeciolar con dos tipos de tricomas setosos y subulados (tipo 11 de **Wurdack**, 1986), unos de 2–4,3 mm de largo y otros cortos de 0,9–1 mm de largo. **Hojas** opuestas, decusadas, similares en tamaño y forma en el mismo nudo. **Pecíolo** de 1,8–4,7 mm de largo y 0,6–1,1 mm de diámetro, aplanado y acanalado adaxialmente, glabro. **Lámina foliar** de 8–19 × 5–15 mm, ovada, menos frecuentemente elíptica; margen entera, espaciadamente ciliada, tricomas subulados de 0,7–1,2 mm de largo; base obtusa; ápice obtuso a redondeado; haz completamente glabra; envés glabro, con puntos glandulares. **Nervadura** con 2 pares de venas secundarias acompañando la vena media, el par más externo no alcanza el ápice, basales, inmersas por la haz, levemente sobresalientes por el envés; venas terciarias a manera de líneas por el envés, inconspicuas por la haz. **Inflorescencia** terminal, dicásial, erecta, de 4–18 cm de largo, con 1–3 nudos de ramificación, 3–18 flores; ejes cuadrangulares y levemente aristados, con pubescencia glandular laxa a semidensa, tricomas glandulares estipitados (tipo 1 de **Wurdack**, 1986) de 0,5–1 mm de largo, rojizos; nudos con setas, de 3–4 mm de largo; pedúnculo de 6–8,2 cm de largo; primer internodo de 4,5–7,5 cm de largo; paracladio basal de 3–5,5 cm de largo; ápices de las ramillas con 3 a 6 flores; brácteas de los nudos basales similares a las hojas, de 1,3–2,2 × 1–1,8 cm, con setas en la margen similares a las de las hojas; brácteas de los nudos distales cóncavas, de 0,5–0,9 × 0,4–0,8 cm, similares a hojas pequeñas, subsésiles; bractéolas obovadas, sésiles, de 3,3–4,6 × 1,8–2,4 mm, margen con tricomas glandulares, de 0,5–0,73 mm de largo. **Flor** 4-mera, diplostemona, sécil o corto-pedicelada; pedicelo cuando presente de ca. 0,5 mm de largo. **Hipanto** cupuliforme, de 2,5 × 1,4 mm, en el exterior levemente costillado (ribetes asociados a los haces vasculares), glabro. **Cáliz** lobulado; tubo de 0,17–0,4 mm; lóbulos de 0,8–1,3 × 1,7–2,2 mm, anchamente triangulares, con setas curvas en la margen, de 0,5–0,75 mm de largo, seta apical, de 0,7–1,3 mm de largo; setas en medio de los lóbulos, de 1,1–1,5 mm de largo, rojizas, rectas. **Corola** patente; pétalos de 4,7–4,9 × 4,5–4,9 mm, suborbiculares, amarillos, superficies y margen glabras, con una seta apical, de 1–1,3 mm de largo. **Estambres** isomorfos, glabros, amarillos, dispuestos a un lado de la flor en oposición al estilo; filamentos de 3,9–4,2 × 0,55–0,64 mm; anteras de 2,7–2,9 × 0,81–0,82 mm, oblongas, ventralmente lisa, con un poro ventral de ca. 0,15 mm de diámetro; conectivo basal libre de la antera (pedoconectivo) de 0,6–0,8 mm de largo. **Ovario** 4-locular, de 2,4–3,2 × 1,7–2,3 mm, oblongo, súpero; ápice redondeado, setas levemente curvas de 0,14–0,22 mm de largo y setas rectas largas rodeando la base del estilo de 0,8–1 mm de largo; estilo de 3,8–4,6 mm de largo y 0,34–0,45 mm de diámetro en el centro, cilíndrico, sigmoideo en flores abiertas, glabro, amarillo; estigma punctiforme o levemente expandido, de 0,22–0,36 mm de diámetro. **Cápsulas** de 1,5–1,7 × 1,3–1,4 mm (sin incluir el pedicelo y lóbulos del cáliz), con el hipanto relictual cupuliforme, costillado. **Semillas** de 0,5 mm de largo; testa lisa, marrón oscuro.

Etimología. El epíteto es en alusión a su endemividad en la región de Sumapaz, en el suroriente de Bogotá, DC.

Distribución y hábitat. Sólo conocida en las localidades tipo en el corregimiento de Nazareth y vereda San Juan de Sumapaz en la localidad de Sumapaz, Bogotá, DC, entre los 2.884–3.410 m de elevación. Crece en zonas de subpáramo, ruderales, sobre suelos franco-arcillosos.

Fenología. La especie fue recolectada con flores en los meses de septiembre a noviembre.

Especímenes examinados (paratipos): COLOMBIA. Bogotá DC, localidad Sumapaz, corregimiento de Nazareth, vereda Ánimas Bajas, 2.908 m, 4°9'13,1"N, 74°10'27,1"O, 24 sep 2019, (fl,fr), *C. Castro et al.* 1944 (COL, CUVC, FMB, HUA, JAUM, JBB, UDBC). Localidad de Sumapaz, vereda San Juan de Sumapaz, vía San Juan-La Unión, cerca del centro poblado, 3.410 m, 4°01'44,9"N, 74°19'01,1"O, 24 oct 2019, (fl), *C. Castro et al.* 2041 (COL, FMB, HUA, JBB). Localidad Sumapaz, corregimiento Nazareth, vereda Auras, 3051 m, 4°10'9,30"N, 74°10'41,34"O, 14 nov 2019 (fl), *G. Morales et al.* 3376 (JBB).

Discusión

Chaetolepis sumapacensis se reconoce por los tallos y hojas glabros, y la presencia de tricomas glandulares estipitados en los ejes de la inflorescencia. La especie con mayor semejanza morfológica es *C. thymifolia*, sin embargo, esta última tiene hojas más pequeñas y sin puntos glandulares por el envés. Asimismo, las estructuras florales son más pequeñas (Tabla 1), y presenta tricomas subulados de paredes levemente rizadas en ramas y hojas. La otra especie con semejanza es *C. anisandra*, no obstante, esta es una hierba decumbente, tiene pubescencia semidensa a densa en ramas y hojas, y sólo presenta una flor en el ápice de las ramas (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de caracteres de las especies de *Chaetolepis sumapacensis* y especies afines. Medidas con base en Wurdack (1973), Grimm & Almeda (2013) y medidas directas en ejemplares tipo.

Caracter	Especie		
	<i>C. sumapacensis</i>	<i>C. thymifolia</i>	<i>C. anisandra</i>
Hábito	Hierbas erectas	Hierbas erectas	Hierbas decumbentes
Indumentos entrenudos	Glabro	Pubescencia laxa, tricomas tipo 16	Pubescencia densa, tricomas tipo 11
Indumento haz	Glabro	Pubescencia laxa hacia el ápice, tricomas tipo 11	Pubescencia laxa, tricomas tipo 11
Indumento envés	Glabro	Pubescencia semidensa, tricomas tipo 16	Pubescencia densa sobre las venas, tricomas tipo 11; laxa en la superficie, tricomas tipo 4
Puntos glandulares envés	Presentes	Ausentes	Ausentes
Indumento inflorescencias	Pubescencia laxa, tricomas tipo 1	Pubescencia laxa, tricomas tipo 1 y 16	Pubescencia densa, tricomas tipo 11
Tamaño lámina foliar	8–19 × 5–15 mm	4,8–9,8 × 3,3–6 mm	6–15 × 5–10 mm
Número de flores por inflorescencia	3–18	5–20	1
Tamaño hipanto	2,5 × 1,4 mm	2–2,2 × 1,8–2 mm	2,6–3,5 × 2,7–3 mm
Tamaño pétalo	4,7–4,9 × 4,5–4,9 mm	3,5–4 × 3,2–3,9 mm	ca. 8 × 5 mm
Forma ápice pétalos	Redondeado	Redondeado	Obtuso
Longitud filamento	3,9–4,4 mm	2,6–3,4 mm	ca. 7 mm
Longitud antera	2,7–2,9 mm	1,7–1,9 mm	4–5 mm
Forma antera	Recta	Recta	Curva hacia el dorso
Longitud pedoconectivo	0,6–0,8 mm	0,3–0,5 mm	?
Longitud estilo	3,8–4,6 mm	4,8–5 mm	9–11 mm
Tamaño ovario	2,4–3,3 × 1,7–2,3 mm	1,7–1,8 × 1–1,2 mm	ca. 3 × 2,5 mm
Longitud semillas	0,5 mm	0,5–0,6 mm	?
Testa semillas	Lisa	Minutamente tuberculada	Lisa reticulada

Agradecimientos

Expresamos sinceros agradecimientos al grupo de flora de Bogotá del herbario JBB en el período de 2019 a 2020: Sandra Urbano, Francisco Fajardo, Diana Medellín, Ángela Rodríguez, Adolfo Jara, Daniel Franco, Nubia Ortiz y Carlos Fonseca. A Boris Villanueva por el apoyo al proyecto Melastomataceae de Flora de Bogotá, y a Gustavo Morales por sus aportes al artículo. Al Herbario Nacional Colombiano, en especial a los miembros de la oficina 227 del Instituto de Ciencias Naturales. Igualmente agradecemos a la comunidad de la Zona de Reserva Campesina del Sumapaz, a don Luis Enrique Díaz, quien fungió como presidente de la junta de acción comunal durante los períodos de exploración botánica en la vereda Ánimas, y a aquellos que entre el 2019 y el 2020 hicieron parte activa de las exploraciones botánicas en su territorio y nos compartieron su conocimiento sin restricciones.

Contribución de los autores

HMC: compilación de la información, escritura general del artículo; CC: recolecciones en campo, fotografías y escritura artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Almeda, F.** (2001). *Chaetolepis*. En: J.A. Steyermark, P.E. Berry, K. Yatskevych, B.K. Holst (Eds.). Flora of the Venezuelan Guayana. Missouri Botanical Garden.
- Almeda, F., Alvear, M., Mendoza-Cifuentes, H., Penneys, D.S., Michelangeli, F.** (2016). Melastomataceae. En: R. Bernal, S.R. Gardstein, M. Celis (Eds.), Catálogo de plantas y líquenes de Colombia (1585-1664). Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/es/resultados/familia/Melastomataceae/>
- Grimm, D., Almeda, F.** (2013). Systematic, phylogeny, and biogeography of *Chaetolepis* (Melastomataceae). *Journal Botanical Research Institute Texas*, 7(1), 217-263.
- Wurdack, J.J.** (1973). Melastomataceae. En T. Lasser (Ed.), Flora de Venezuela, no. 8. (1-819). Caracas, Venezuela: Instituto Botánico, Ministerios de Agricultura y Cría.
- Wurdack, J.J.** (1986). Atlas of hairs for Neotropical Melastomataceae. *Smithsonian Contributive Botany*, 63, 1-80.

Ciencias Naturales

Artículo original

Riqueza y abundancia de Tinamiformes, Galliformes, Columbiformes y Gruiformes en la comunidad waodani de Toñampade, Amazonía ecuatoriana: una aproximación inicial por fototrampeo

Richness and abundance of Tinamiformes, Galliformes, Columbiformes and Gruiformes in the waodani community of Toñampade, Ecuadorian Amazon: an initial approach by camera trapping

✉ Sara Castellanos^{1,*}, ✉ Iván Jácome-Negrete^{1,2}, ✉ Fidel Rodríguez^{1,2,4}, ✉ Francisco Gaba³,
✉ Iteca Enqueri³, ✉ Onguine Nemquimo³, ✉ Froilán Tanguila⁴

¹ Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador

² Instituto de Estudios Amazónicos e Insulares IEAI de la Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador

³ Comunidad waodani de Toñampade, Pastaza, Ecuador

⁴ Estación Científica Amazónica Juri Juri Kawsay de la Universidad Central del Ecuador, Pastaza, Ecuador

Resumen

El conocimiento sobre la diversidad y poblaciones de ciertos órdenes de aves de hábitos terrestres tales como los Tinamiformes, Galliformes, Columbiformes y Gruiformes de los bosques de tierra firme de la Amazonía ecuatoriana es aún incipiente. Por ello, este estudio buscó evaluar la riqueza y abundancia de estos taxones en la comunidad waodani Toñampade, mediante la técnica del fototrampeo. Desde el 6 de julio hasta el 9 de octubre del año 2021, se obtuvieron 317 registros independientes correspondientes a 541 aves de 4 órdenes, 4 familias, 8 géneros y 9 especies con un esfuerzo de muestreo de 1784 cámaras trampa noche. La especie más abundante fue *Psophia crepitans* (naguañi) con un IAR de 0.44. A pesar de la caza actual, la presencia de *Tinamus major*, *Nothocrax urumutum*, *Mitu salvini*, *Penelope jacquacu* y *P. crepitans* como especies bioindicadoras de paisajes tropicales más intactos, confirma aún el buen estado de conservación del área de estudio. No se encontraron diferencias en la composición de las especies en función de la menor o mayor distancia al centro poblado. Finalmente se confirma la factibilidad de aplicación del método de fototrampeo para el estudio de aves terrestres muy elusivas, difícilmente detectables por otros métodos.

Palabras clave: Aves caminadoras; Bosque tropical; Diversidad.

Abstract

Knowledge about the diversity and populations of certain orders of birds of terrestrial habits such as Tinamiformes, Galliformes, Columbiformes and Gruiformes of the terra firme forests of the Ecuadorian Amazon is still incipient. Therefore, this study sought to evaluate the richness and abundance of these taxa in the waodani Toñampade community, using the photo-trapping technique. From July 6 to October 9, 2021, 317 independent records were obtained corresponding to 541 birds of 4 orders, 4 families, 8 genera and 9 species with a sampling effort of 1784 camera traps at night. The most abundant species was *Psophia crepitans* (naguañi) with an IAR of 0.44. Despite current hunting, the presence of *Tinamus major*, *Nothocrax urumutum*, *Mitu salvini*, *Penelope jacquacu* and *P. crepitans* as bioindicator species of more intact tropical landscapes still confirms the good conservation status of the study area. No differences were found in the composition of the species as a function of the shorter or longer distance to the population center. Finally, the feasibility of applying the photo-trapping method for the study of very elusive landbirds, difficult to detect by other methods, is confirmed.

Keywords: Walking birds; Rainforest; Diversity.

Citación: Castellanos S, Jácome-Negrete I, Rodríguez F, *et al.* Riqueza y abundancia de Tinamiformes, Galliformes, Columbiformes y Gruiformes en la comunidad waodani de Toñampade, Amazonía ecuatoriana: una aproximación inicial por fototrampeo. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):335-346, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1852>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Sara Castellanos;
slcastellanos@uce.edu.ec

Recibido: 3 de enero de 2023

Aceptado: 16 de mayo de 2023

Publicado en línea: 29 de mayo de 2023



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

Introducción

La cuenca amazónica es una de las bioregiones con mayor biodiversidad de flora y fauna silvestre, siendo de gran importancia porque además cuenta con una gran riqueza étnica y cultural (**Angulo-Pérez et al.**, 2020). Particularmente, la porción occidental de la Amazonía del Ecuador, que incluye el Parque Nacional Yasuní se considera como una de las áreas más ricas en especies del mundo, sin embargo, los bosques húmedos presentan una mayor cantidad de especies amenazadas por sus tasas altas de fragmentación, alteración y pérdida de cobertura vegetal (**Bass et al.**, 2010; **Maldonado-Casanova**, 2021). El Territorio étnico waodani, se traslapa con la reserva Yasuní y en el contexto de esta relación, tiene un valor ecológico significativo al poseer una de las mayores concentraciones de biodiversidad amazónica de todo el mundo (**Ecociencia**, 2020). Si bien la caza es una actividad de subsistencia muy importante en distintas regiones de bosques tropicales, cuando alcanza niveles comerciales provoca la extracción masiva de las especies pudiendo causar incluso extinciones locales (**Shoobridge**, 2019). Así mismo, la apertura de vías carrozables en la Amazonía intensifica notablemente la cosecha de la fauna local (**Bonaudo et al.**, 2005). Cuando se construyen nuevas vías de acceso, los territorios indígenas amazónicos son particularmente sensibles a los efectos de la deforestación y la caza local (**de Araujo Constantino**, 2016). La fragmentación del hábitat provoca también efectos negativos en las comunidades de aves locales (**Oviedo-Pérez**, 2020). Dentro del territorio waodani, la caza tradicional es cotidiana, registrándose un alto consumo de aves selváticas de hábitos terrestres entre las que destacan las pavas *Pipile*, *Penelope* y *Ortalis*, pavones del género *Mitu* y *Psophia crepitans* (**Bayancela**, 2019).

La falta de investigación ecológica sobre la fauna silvestre dificulta el desarrollo de planes destinados a su conservación (**Santos-Moreno et al.**, 2019). Entonces, la información de la presencia y distribución de las especies es clave para el manejo de una región (**Lahkar et al.**, 2018). Para la detección de especies de la fauna silvestre medianas y grandes, el uso actual de nuevas tecnologías como las cámaras trampa se ha convertido en una de las principales herramientas de estudio, al ser una técnica poco invasiva (**Chávez-León**, 2019). El fototrampeo es ideal para la detección de especies crípticas, raras y nocturnas de los bosques (**Tobler et al.**, 2008; **Gutiérrez-Pineda et al.**, 2021).

En la Amazonía ecuatoriana, la aplicación de estudios de fototrampeo con aves son relativamente recientes. Se han usado cámaras trampa para documentar el uso de saladeros por las pavas y palomas (**Blake**, 2011), para comparar la composición de aves terrestres (Galliformes, Tinamiformes y Gruiformes) con relación a la presencia de senderos (**Blake & Mosquera**, 2014) y para documentar la historia natural y la ampliación del registro altitudinal de *Nothocrax urumutum (gontiwa)* (**Medrano & Rueda**, 2018). En todos los casos, se evidencia una alta efectividad del método para el registro de Galliformes y Tinamiformes silvestres, que con otros métodos no son detectados fácilmente. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue documentar la riqueza y abundancia de Tinamiformes, Galliformes, Columbiformes y Gruiformes de hábitos terrestres del bosque húmedo siempreverde en buen estado de conservación de la comunidad waodani de Toñampade, ubicada en la provincia de Pastaza, como un aporte a la escasa información sobre estos grupos en la cuenca media del río Curaray.

Metodología

Área de estudio

Esta investigación fue realizada en la comunidad waodani de Toñampade ubicada en las coordenadas 1°13'07''S 77°22'52''O, en el cantón Arajuno de la provincia de Pastaza. Los principales afluentes que atraviesan este territorio son el río Tzapino, el río Curaray y el río Tigueno (**Figura 1**). Las estaciones de fototrampeo se establecieron en la formación vegetal Bosque siempreverde de tierras bajas del Tigre Pastaza (**MAE**, 2013). El cual presenta una altitud referencial de 311 m.s.n.m (**Sanmartín**, 2015).

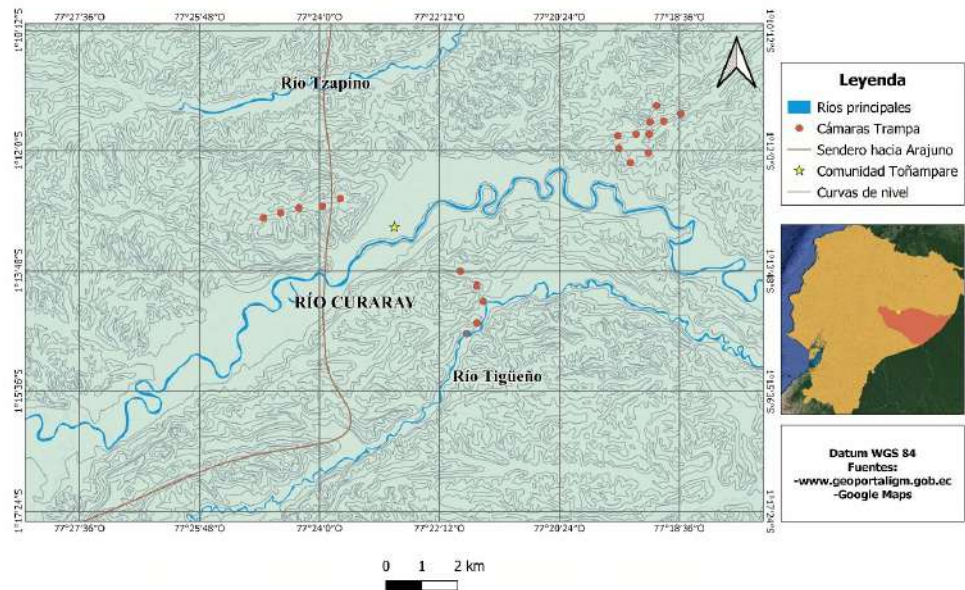


Figura 1. Localización de las estaciones de fototrampeo cercanas y lejanas a la comunidad Toñampare.

Métodos de muestreo

Dentro del área de estudio se instalaron 20 estaciones simples de fototrampeo distribuidas en tres sectores: un sector ubicado al noroccidente de la comunidad con 5 cámaras en las cercanías al camino peatonal principal, otro sector localizado al sur de la comunidad con 5 cámaras y un tercer sector ubicado al noroccidente con 10 cámaras. Las cámaras se ubicaron a una distancia aproximada de 500 metros entre sí en cada uno de los 3 sectores. Diez cámaras estuvieron localizadas a una distancia aproximada de 2 km del centro poblado y otras 10 cámaras fueron ubicadas a 8 km de distancia de la comunidad (**Figura 1**), según la metodología de **Mosquera-Muñoz et al.** (2015) se usaron cámaras Bushnell E3 desde el 6 de julio del 2021 al 10 de octubre del 2021 (época de transición entre el verano e invierno); sin embargo, dos cámaras no estuvieron activas durante todo el periodo de estudio establecido (Anexo 1). Estos dispositivos se colocaron a una altura de 50 cm del suelo (**Dinata et al.** 2008; **Mosquera-Muñoz et al.** 2015) y a una distancia mínima de 5 metros de los senderos de acceso, eligiendo lugares planos y árboles robustos. La ubicación de cada cámara fue georreferenciada con un GPS Garmin eTrex. Además, se tomaron datos de la altitud, tipo de vegetación y actividad antrópica de cada sitio.

Análisis estadístico de la riqueza y abundancia relativa de aves

Las fotografías obtenidas fueron procesadas en el Software: CPW Photo Warehouse (**Newkirk**, 2016) para generar una base de datos de todos los registros en formato de Excel. Para estimar la riqueza de especies, se procedió a realizar la identificación taxonómica de las especies de las fotos y videos, de acuerdo al Comité de Clasificación de Sudamérica (SACC) y la plataforma de aves Bioweb Ecuador (**Freile**, 2021; **Remsem et al.**, 2022) a nivel de orden, familia y especie.

El número máximo de aves detectadas en la totalidad de fotos consecutivas obtenidas en un período máximo de 30 minutos se usó para cuantificar el número de individuos de cada especie. Mediante el programa EstimateS 9.1.0 (**Colwell**, 2022), usando los datos de riqueza de cada cámara se generaron curvas de acumulación de especies para todo el muestreo y desagregadas en función de la distancia al centro poblado. A partir de los datos generados por EstimateS, se proyectaron las curvas de acumulación con el programa

Excel. Se calculó la completitud del muestreo como el porcentaje resultante de la relación entre la riqueza observada (Rob) y la riqueza estimada (Res) (**Moreno, 2001; Escalante, 2003; Jiménez & Hortal, 2003; Villarreal *et al.*, 2004; Londoño, 2012**).

Además, se calcularon tres estimadores de riqueza potencial: Chao1, Ace y Coleman, así como el índice de dominancia de Simpson (**Villarreal *et al.*, 2004**). La estructura de la comunidad se expresó mediante curvas de rango-abundancia graficadas en Excel, para toda la comunidad de aves y desagregadas en función de la menor o mayor distancia al centro poblado (**Moreno, 2001**) donde las distintas especies se presentan en el eje de la “x”, y el eje de la “y” contiene las abundancias relativas de las mismas, calculando el logaritmo en base 10. A la izquierda de la curva aparecen las especies más abundantes, en la parte central las especies comunes y a la derecha las especies raras.

Para determinar los registros independientes se consideraron los criterios propuestos por **Dinata *et al.* (2008); Mosquera-Muñoz *et al.* (2015) y Gutiérrez-Pineda *et al.* (2021)** en estudios previos realizados con aves de hábitos terrestres en bosques tropicales, considerando como un registro independiente al conjunto de fotos o videos consecutivos de uno o más individuos de la misma especie tomados en un lapso máximo de 30 minutos. Para calcular el índice de abundancia relativa (IAR) de cada especie, expresado como el número de fotografías/videos por esfuerzo de muestreo, se siguió el procedimiento propuesto por **Mosquera-Muñoz *et al.* (2015)** con la siguiente fórmula de cálculo:

$$\text{IAR} = \text{Xi}/\text{Yi} \times 100 \text{ trampas-noche}$$

Donde:

Xi = Número de fotos independientes de una especie.

Yi = Número total de fotos del muestreo.

100 trampas-noche (Factor de corrección).

Resultados

Riqueza y abundancia relativa de las especies

En la comunidad Toñampade, con el uso de la técnica de fototrampeo desde el 6 de julio del 2021 hasta el 9 de octubre del 2021, se obtuvo un total de 541 individuos de aves silvestres y 317 registros independientes (RI). Con un total de 4 órdenes, 4 familias, 8 géneros y 9 especies (**Figura 2**) y un esfuerzo de muestreo de 1784 trampas noche. La especie con el índice de abundancia relativa más alto fue *P. crepitans* (IAR=0.44), seguido de *N. urumutum* (IAR=0.12), *G. montana* (IAR=0.10) y *T. major* (IAR=0.08), mientras que las especies con los índices de abundancia relativa más bajas correspondieron a *C. variegatus* y *C. undulatus* (IAR=0.025 para cada especie), además de *P. cayennensis* (IAR=0.006) (**Tabla 1**).

Las estaciones de fototrampeo cercanas a la comunidad de Toñampade presentaron un total de 347 individuos de aves silvestres correspondientes a 4 órdenes, 4 familias y 9 especies. La especie con el índice de abundancia relativa más alto fue *P. crepitans* (IAR=0.32), seguido de *N. urumutum* (IAR=0.08) y *G. montana* (IAR=0.04), mientras que las especies con los índices de abundancia relativa más bajas correspondieron a *C. variegatus* (IAR=0.005), *M. salvini* y *P. cayennensis* (IAR=0.002 para cada especie). En cuanto a las estaciones de fototrampeo lejanas a la comunidad se obtuvo un total de 194 individuos correspondientes a 4 órdenes, 4 familias y 9 especies. La especie con el índice de abundancia relativa más alto fue *P. crepitans* (IAR=0.11), seguido de *T. major* (IAR=0.07), *G. montana* (IAR=0.06) y *N. urumutum* (IAR=0.03), mientras que las especies con los índices de abundancia relativa más bajas correspondieron a *C. undulatus* (IAR=0.016) y *P. cayennensis* (IAR=0.002) (**Tabla 2**).

De acuerdo al número de individuos de cada especie registrada cerca y lejos de la comunidad Toñampade, se obtuvo que *P. crepitans* (*naguañi*) fue más abundante cerca de la comunidad, al igual que *N. urumutum* (*gontiwa*). Por el contrario, *G. montana*, *T. major* (*abamo*), *M. salvini* (*bare*), *P. jacquacu* (*kowatai*), *C. variegatus* (*tomo*) y *C. undulatus* (*tomo*) fueron más abundantes lejos del centro poblado de la comunidad Toñampade (**Figura 3**).

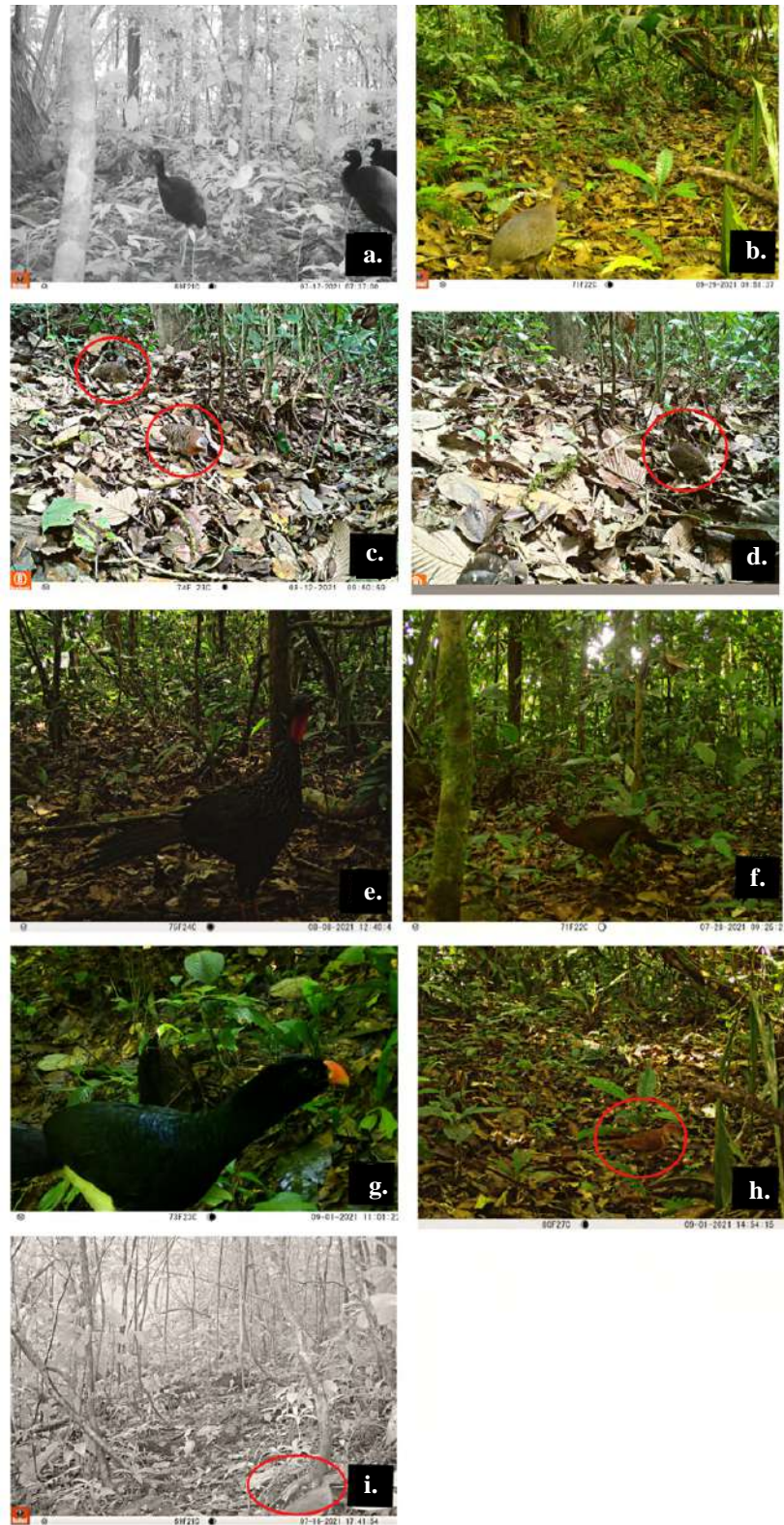


Figura 2. Especies de aves amazónicas de la comunidad Toñampade registradas con fototrampeo. a) *Psophia crepitans*, b) *Tinamus major*, c) *Crypturellus variegatus*, d) *Crypturellus undulatus*, e) *Nothocrax urumutum*, f) *Penelope jacquacu*, g) *Mitu salvini*, h) *Geotrygon montana*, i) *Patagioenas cayennensis*.

Tabla 1. Número de individuos, registros independientes (RI) e índice de abundancia relativa (IAR) de Tinamiformes, Galliformes, Gruiformes y Columbiformes registradas en la comunidad Toñampade.

Orden	Especie	Nombre waodani	No. Ind	RI	IAR
Tinamiformes Tinamidae	<i>Tinamus major</i> (Gmelin, 1789)	Abamo	39	32	0.090
	<i>Crypturellus variegatus</i> (Gmelin, 1789)	Tomo	12	9	0.025
	<i>Crypturellus undulatus</i> (Temminck, 1815)	Tomo	11	9	0.025
Galliformes Cracidae	<i>Nothocrax urumutum</i> (Spix, 1825)	Gontiwa	64	43	0.120
	<i>Mitu salvini</i> (Reinhardt, 1879)	Bare	19	10	0.028
Gruiformes Psophiidae	<i>Penelope jacquacu</i> (Spix, 1825)	Kowatai	17	15	0.042
	<i>Psophia crepitans</i> (Linnaeus, 1758)	Naguañi	337	158	0.442
Columbiformes Columbidae	<i>Geotrygon montana</i> (Linnaeus, 1758)		40	39	0.101
	<i>Patagioenas cayennensis</i> (Bonnaterre, 1792)		2	2	0.006
Total: 4	9		541	317	

Tabla 2. Número de individuos, registros independientes (RI) e índice de abundancia relativa (IAR) de aves silvestres registradas cerca y lejos de la comunidad Toñampade.

Especie	Nombre waodani	Cerca			Lejos		
		No. Ind	RI	IAR	No. Ind	RI	IAR
<i>Tinamus major</i> (Gmelin, 1789)	Abamo	4	4	0.011	35	28	0.078
<i>Crypturellus variegatus</i> (Gmelin, 1789)	Tomo	4	2	0.005	8	7	0.019
<i>Crypturellus undulatus</i> (Temminck, 1815)	Tomo	3	3	0.008	8	6	0.016
<i>Nothocrax urumutum</i> (Spix, 1825)	Gontiwa	46	31	0.086	18	12	0.033
<i>Mitu salvini</i> (Reinhardt, 1879)	Bare	3	1	0.002	16	9	0.025
<i>Penelope jacquacu</i> (Spix, 1825)	Kowatai	8	7	0.019	9	8	0.022
<i>Psophia crepitans</i> (Linnaeus, 1758)	Naguañi	263	117	0.327	74	40	0.112
<i>Geotrygon montana</i> (Linnaeus, 1758)		15	15	0.042	25	24	0.067
<i>Patagioenas cayennensis</i> (Bonnaterre, 1792)		1	1	0.002	1	1	0.002
Total: 9		347	182		194	136	

Esfuerzo de muestreo alcanzado

La curva de acumulación de especies de aves de la comunidad Toñampade fue asintónica (**Figura 4a**), los tres estimadores de riqueza estimaron 9 especies, logrando un porcentaje de completitud del 100%. Sin embargo, al analizar las curvas de acumulación de especies cercanas y lejanas no llegan a ser completamente asintónicas (**Figura 4b y 4c**), aunque en ambos casos, al menos un estimador (Coleman) se trasladó con la riqueza de aves

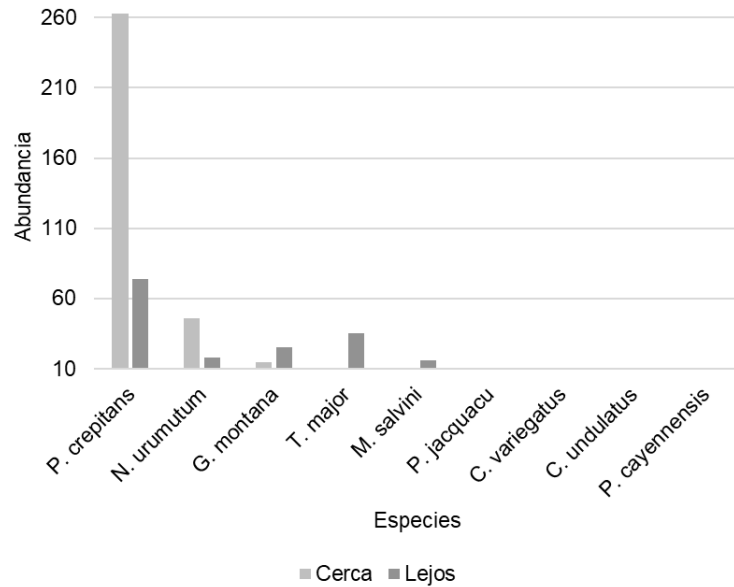


Figura 3. Estructura de la comunidad de aves cercanas y lejanas al centro poblado.

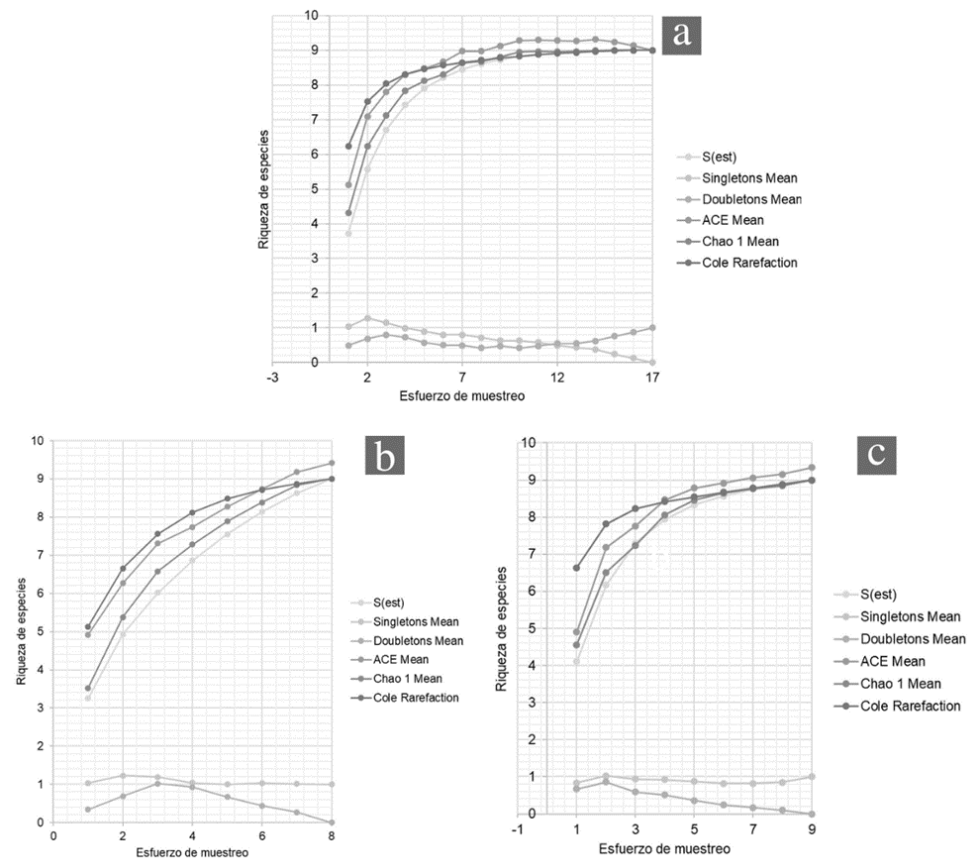


Figura 4. Curvas de acumulación de especies de aves de la comunidad Toñampade. a. especies de aves encontradas en el área de estudio, b. especies de aves cercanas al centro poblado, c. especies de aves lejanas del centro poblado.

encontrada en campo; de igual forma, las curvas de los singletons son asintóticas, lo cual refleja un buen esfuerzo de muestreo. El estimador de riqueza ACE llegó a un porcentaje de completitud del 95.54% (cerca de la comunidad) y 96.35% (lejos de la comunidad) (Tabla 3).

Estructura de la comunidad

Según las tres curvas de rango abundancia, la estructura de la comunidad no cambia (Figura 5) ya que en todas las figuras, *P.crepitans* (*naguañi*) es la especie más abundante dentro del área de estudio, aunque se evidenció una mayor frecuencia de esta especie en el área cercana a la comunidad (Figura 5b), seguido de *N. urumutum* (*gontiwa*), *G. montana* y *T.major* (*abamo*). Por otro lado, las especies menos abundantes correspondieron a *C. variegatus*, *C. undulatus* y *P. cayennensis*.

Tabla 3. Estimadores de riqueza e índice de dominancia de Simpson de aves silvestres cercanas a la comunidad.

	Especies observadas	Especies estimadas	Tipo de estimador	Porcentaje completitud	Simpson
General	9	9	Chao 1	100%	2.4
		9	ACE	100%	
		9	Coleman	100%	
Cerca	9	9	Chao 1	100%	1.68
		9.42	ACE	95.54%	
		9	Coleman	100%	
Lejos	9	9	Chao 1	100%	4.64
		9.34	ACE	96.35%	
		9	Coleman	100%	

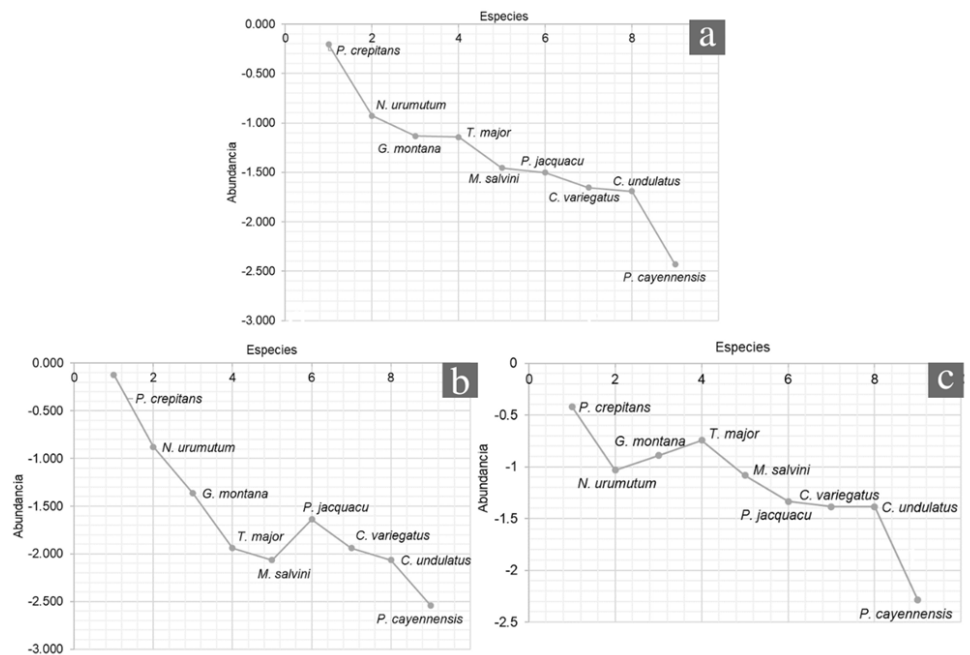


Figura 5. Curvas de rango abundancia de aves registradas en la comunidad Toñampade. a. especies de aves encontradas en el área de estudio, b. especies de aves cercanas al centro poblado, c. especies de aves lejanas del centro poblado.

Discusión

A partir de los estudios de avifauna es factible estimar la riqueza y abundancia de las aves locales, así como identificar a las especies indicadoras del estado de conservación de un ecosistema, y entender mejor los patrones de distribución de las mismas (**Angulo-Pérez et al., 2020**). El empleo de cámaras trampa en estos estudios brinda datos relevantes de biodiversidad y comportamiento de organismos en estado silvestre, siendo una metodología frecuentemente empleada con fines de conservación, ya que genera datos relevantes de diversidad, comportamiento e interacciones de aves de hábitos terrestres; así mismo, las fotografías obtenidas ayudan a inferir las relaciones ecológicas entre la fauna silvestre y las posibles amenazas antrópicas (**Mosquera-Muñoz et al., 2015; Gilbert et al., 2020**).

Con esta técnica de fototrampeo fue posible el registro de 9 especies de aves locales de la comunidad Toñampade luego de un esfuerzo de muestreo de 1784 trampas noche. Nuestros resultados difirieron en el número de especies al ser comparados con otro estudio realizado en la estación de Biodiversidad Tiputini ubicada a 123 kilómetros de nuestra área de estudio donde fueron registradas 55 especies, siendo *P. crepitans* la especie más abundante, esta mayor riqueza encontrada se debe a un mayor esfuerzo de muestreo invertido con 15120 días cámara en 28 meses; además de que se estudiaron varios ecosistemas a la vez incluyendo bosque de tierra firme, varzea, pantanos y orillas de lagos tipo herradura (**Banda-Cruz, 2012**).

En el presente estudio, *P. crepitans (naguañi)* del orden Gruiformes, presentó el mayor número de registros independientes (IAR=0.442), siendo la especie más abundante de todas las aves detectadas. La mayor abundancia de esta especie es concordante con el hallazgo de **Blake y Mosquera (2014)**, quienes al interior de la Estación de Biodiversidad Tiputini, en el Parque Nacional Yasuní reportaron a esta especie como aquella con un mayor número de registros. Nuestras observaciones sobre esta especie comprendieron grupos compuestos por varios ejemplares, dato similar a lo reportado en la Amazonía peruana (**Sherman, 2000**).

En relación con el orden Tinamiformes, en este trabajo fueron registradas tres especies de los géneros *Tinamus* y *Crypturellus*, siendo *T. major (abamo)* el más abundante con 32 registros independientes (IAR=0.090), seguido de *C. variegatus* y *C. undulatus (tomo)* con 9 registros respectivamente (IAR= 0.025). Estas abundancias concuerdan con patrones similares hallados en otros bosques amazónicos bajo un buen estado de conservación (**Blake et al., 2017**). *T. major* es la especie de mayor tamaño, y usualmente requiere de áreas de sotobosque denso y con plantas grandes que le sirven para ocultarse (**Oviedo-Pérez, 2008**). Tomando en cuenta estas características, *T. major* podría ser identificado como una especie indicadora de buena calidad del área de estudio.

El orden de los Galliformes estuvo representado por tres especies, *N. urumutum (gontiwa)*, *P. jacquacu (kowatai)* y *M. salvini (bare)*, siendo *N. urumutum* la especie más abundante. Estas tres especies de Galliformes son consideradas como indicadoras de bosques bien conservados, además de ser altamente susceptibles a la cacería local (**Jácome-Negrete, 2018**). Su presencia en los bosques de Toñampade sugieren un buen estado de conservación del área. Posiblemente la mayor abundancia de *N. urumutum*, se debe a que esta especie es activa en la noche, por lo que resulta menos vulnerable a las prácticas locales de caza, lo cual incide en su mayor abundancia registrada, como se ha reportado para otros sitios de la Amazonía (**Parker, 2002; Medrano & Rueda, 2018**).

En cuanto al orden de los Columbiformes, en este trabajo se registraron dos especies: *G. montana* con 39 registros independientes (IAR= 0.101) y *P. cayennensis* con apenas 2 registros (IAR= 0.006). Esta diferencia en el número de registros por fototrampeo podría deberse a que las palomas del género *Patagioenas* son de dosel forestal, mientras que *G. montana* es una especie que prefiere el suelo del bosque para desplazarse y sotobosque denso como refugio (**Gibbs et al., 2001; Ocampo et al., 2019**).

Todas las especies reportadas en este estudio registran uno o varios usos para la Nacionalidad waodani, ya sea alimenticio, artesanal, medicinal, recreativo e inclusive ritual, por lo que son muy importantes dentro de la cosmovisión y cultura local; esta

importancia hace que sean habitualmente cazadas y junto con otros factores comprometen su conservación hacia el futuro al interior del territorio comunitario, tal es el caso de *P. crepitans* y *M. salvini* quienes están categorizadas como vulnerables dentro de la Lista Roja Nacional (Tirira & Rios, 2018). En este contexto se hace urgente documentar a mayor profundidad el conocimiento asociado a su diversidad, abundancia, ecología y emprender estrategias participativas de conservación con la comunidad.

A partir del empleo de cámaras trampa consideramos que es factible el estudio de las aves amazónicas de hábitos terrestres en la Amazonía ecuatoriana, en concordancia con los hallazgos reportados por Sodhi & Smith (2007), quienes usaron esta técnica inclusive para detectar cambios en ambientes tropicales degradados. Si bien el uso de las cámaras trampa incluye costos iniciales elevados derivados de la adquisición del equipo y la posibilidad de que los equipos en campo puedan perderse o tener mal funcionamiento (Mosquera-Muñoz *et al.*, 2015), también cabe mencionar que facilita la detección de especies de aves que son muy elusivas para ser encontradas con otros métodos y con ello se hace factible aportar en la comprensión de su estado poblacional, su comportamiento y su estado de conservación.

Conclusiones

En conclusión, el presente estudio aporta información inédita sobre nueve especies de aves de hábitos terrestres existentes en la comunidad amazónica de Toñampade, localizada en la cuenca media del río Curaray y sus patrones de riqueza y abundancia. Se resalta la presencia de aves de los órdenes Galliformes, Tinamiformes y Gruiformes de talla grande que pueden considerarse como especies bioindicadoras de paisajes tropicales relativamente intactos, sin diferencia en la estructura de la comunidad de aves bajo estudio originada por la menor o mayor distancia al centro poblado. *P. crepitans* y *N. urumutum* registró mayor abundancia cerca del poblado. Se abre la posibilidad del empleo más continuo del fototrampeo para el seguimiento del estado de conservación de las aves caminadoras, al ser un método poco invasivo y bastante efectivo para su detección.

Material suplementario

Ver el material suplementario en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1852/3364>

Agradecimientos

A la Dirección de Investigación de la Universidad Central del Ecuador por dotar el financiamiento del proyecto DI-CONV-2019-001 Evaluación y promoción de la diversidad de fauna de importancia estratégica para la subsistencia y la cultura de los Territorios de la Comunidad Kichwa Pablo López de Oglán Alto (CEPLOA) y la Comunidad Huaorani de Toñampari, en la provincia de Pastaza, como estrategia para su conservación a largo plazo. Al Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador por la autorización MAAE-ARSFC-2021-1215 para ejecución del estudio. A Gilberto Nenquimo, presidente de la NAWA, Dayuma Nango y Eric Care Andy presidentes saliente y entrante de Toñampade por la gestión comunitaria para desarrollo del estudio.

Contribución de los autores

SC: investigación, curaduría de datos, redacción del manuscrito; IJN: administración del proyecto, revisión y edición del documento; FR: investigación, edición del documento; FG, IE, ON y FT: investigación.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Angulo-Pérez, N., Armas-Silva, J., Pérez-Peña, P.** (2020). Diversidad de aves en el interfluvio Napo-Putumayo-Amazonas, al norte de la Amazonía peruana. *Folio Amazónica*, 29(1):109-141.
- Banda-Cruz, G.** (2012). Macrofauna en el bosque húmedo tropical Análisis preliminar de diversidad basado en los registros del sistema de trampas cámara en la Estación de Biodiversidad Tiputini. Tesis para licenciado en Ecología Aplicada. 38 p.
- Bass, M., Finer, M., Jenkins, C., Kreft, H., Cisneros-Heredia, D., McCracken, S., Pitman, N., English, P., Swing, K., Villa, G., Di Fiore, A., Voigt, C., Kinz, T.** (2010). Global Conservation Significance of Ecuador's Yasuní National Park. *Plos ONE*, 5(1), e8767.
- Blake, J. G., Mosquera, D.** (2014). Camera trapping on and off trails in lowland forest of eastern Ecuador: does location matter. *Mastozoología neotropical*, 21(1), 17-26.
- Blake, J. G., Mosquera, D., Guerra, J., Loiseau, B. A., Romo, D., Swing, K.** (2011). Mineral licks as diversity hotspots in lowland forest of eastern Ecuador. *Diversity*, 3(2), 217-234.
- Blake, J. G., Mosquera, D., Loiseau, B. A., Swing, K., Romo, D.** (2017). Longterm variation in abundance of terrestrial mammals and birds in eastern Ecuador as measured by photographic rates and occupancy estimates. *Journal of Mammalogy*, 98(4), 1168-1178.
- Bayancela, S.** (2019). Patrones de cacería y consumo de proteína animal en cuatro comunidades Waodani, Reserva de Biósfera Yasuní. *Revista Ciencia Digital* 3(3.2.1), 43-60.
- Benchimol, M., Peres, C.** (2020). Determinants of population persistence and abundance of terrestrial and arboreal vertebrates stranded in tropical forest land-bridge islands. *Conservation Biology*, 35(3), 870-883.
- Bonaudo, T., Le Pendu, Y., Faure, J., Quanz, D.** (2005). The effects of deforestation on wildlife along the transamazon highway. *Euro J Wildl Res*, 51, 199-206.
- Chávez, C., De la Torre, A., Bárcenas, H., Medellín, R., Zarza, H., Ceballos, G.** (2013). Manual de fototrampeo para estudio de fauna silvestre: el jaguar en México como estudio de caso. Alianza WWF-Telcel, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Chávez-León G.** (2019). Diversidad de mamíferos y aves en bosques de coníferas bajo manejo en el Eje Neovolcánico Transversal, *10(56)*, 85-112.
- Colwell, R.** (2022). *EstimatesS_9.1_Windows.osf.io/su57f*.
- de Araujo Lima Constantino, P.** (2016). Deforestation and hunting effects on wildlife across amazonian indigenous lands. *Ecology and Society*, 21(2).
- Díaz, A., Payán, E.** (2012). Manual de fototrampeo. Una herramienta de investigación para la conservación de la biodiversidad en Colombia. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Panthera Colombia. 32 p.
- Dinata, Y., Nugroho, A., Haidir, A., Linkie, M.** (2008). Camera trapping rare and threatened avifauna in west-central Sumatra. *Bird Conservation International*, 18, 30-37.
- EcoCiencia.** (2020). Diagnóstico situacional línea base socioambiental de diez comunidades del Territorio Étnico Waodani. Quito. *Ecociencia/NAWE/AMWAE*. 74 p.
- Escalante, T.** (2003). ¿Cuántas especies hay? Los estimadores no paramétricos de Chao. *UNAM*. 53-56 p.
- Freile, J.** (2021). Aves del Ecuador Versión 2021. Obtenido de Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. (Disponible en: <https://bioweb.bio/faunaweb/avesweb>. Consultado el 24/01/2021).
- Gast Matiz, F.** (2014). Abundancias relativas y distribución de mamíferos medianos y grandes, y aves no voladoras en el PNN Cueva de los Guácharos (Huila, Colombia).
- Gibbs, D., Barnes, E., Cox, J.** (2001). Pigeons and Doves. A Guide to the Pigeons and Doves of the World. New Haven, Connecticut, USA: Yale University Press.
- Gilbert, N., Clare, J., Stenglein, J., Zuckerberg B.** (2020). Abundance estimation of unmarked animals based on camera-trap data. *Conservation Biology*, 35(1): 88-100.
- Griffiths, B., Bowler, M., Gilmore, M., Luther, D.** (2020). Temporal patterns of visitation of birds and mammals at mineral licks in the Peruvian Amazon. *Ecology and Evolution*, 10(24), 14152-14164.
- Gutiérrez-Pineda, K., Berguido, G., Méndez-Carvajal, P.** (2021). Diversidad ecológica de aves caminadoras en la Reserva Natural Privada Cerro Chucantí, Darién, Panamá, *25(1)*, 1-14.
- Jácome-Negrete, I.** (2018). Etnozoología kichwa de los crácidos en la Amazonía Central Ecuatoriana. *Ethnoscientia*, 3, 2-13.
- Jiménez, A., Hortal, J.** (2003). Las curvas de acumulación de especies y la necesidad de evaluar la calidad de los inventarios biológicos. *Revista Ibérica de arcnología*, 8, 151-161 p.

- Lahkar, D., Ahmed, M. F., Begum, R. H., Das, S. K., Lahkar, B. P., Sarma, H. K., Harihar, A.** (2018). Camera-trapping survey to assess diversity, distribution and photographic capture rate of terrestrial mammals in the aftermath of the ethnopolitical conflict in manas national park, assam, india. *Journal of Threatened Taxa*, *10*(8), 12008-12017
- Londoño, M.** (2012). Curvas de acumulación e índices de completitud. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (Disponible en: <http://www.recibio.net/wpcontent/uploads/2012/02/CurvasAcumulacionIndicesCompleitud-MCL.pdf> Consultado el: 12 de mayo del 2020).
- MAE.** (2013). Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito. 133p.
- Maldonado-Casanova, G.** (2021). Monitoreo de una colonia reproductiva de la Garza Agamí *Agamia agamí* (Ardeidae) en Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Ornitología*, *7*, 1-13.
- Medrano, P., Rueda, A.** (2018). Nuevo registro altitudinal del Pavón Nocturno *Nothocrax urumutum* (Cracidae) y notas sobre su historia natural. *Revista Ecuatoriana de Ornitología*, *3*, 15-19.
- Moreno, C.** (2001). Métodos para medir la biodiversidad. Manuales y Tesis SEA. Zaragoza, España. 84 p.
- Mosquera-Muñoz, D., Corredor, G., Pedro, C., Armbrrecht, I.** (2015). Fototrampeo de aves caminadoras y mamíferos asociados en el piedemonte de Farallones de Cali. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, *18*(2), 144-156.
- Newkirk, E.S.** (2016). CPW Photo Warehouse. Colorado Parks and Wildlife, Fort Collins, Colorado, USA. <http://cpw.state.co.us/learn/Pages/ResearchMammalsSoftware.aspx>.
- Ocampo, D., Alvarado, A., Álvarez, M., Ríos-Acuña, J., Barrantes, G., Sandoval, L.** (2019). Asociación entre la morfología alar y el uso del hábitat en seis especies de palomas (Columbidae) neotropicales. *Revista de Biología Tropical*, *67*(2), 1-15.
- Oviedo-Pérez, P.** (2008). Distribución espacial de Tinámidos (Tinamiformes) en la estación biológica la selva, Costa Rica. *Uniciencia*, *22*(1-2), 93-97.
- Oviedo-Pérez, P.** (2020). Composición florística, estructura horizontal y potencial de conservación de árboles y arbustos de la Reserva Biológica Isla del Caño, Costa Rica.
- Parker III, T. A.** (2002). Behavior, habitat, and status of the Nocturnal Curassow (*Nothocrax urumutum*) in northern Peru. *Ornitología Neotropical*, *13*:153-158.
- Remsen, J. V., Jr., Areta, J., Bonaccorso, E., Claramunt, S., Jaramillo, A., Pacheco, J. F., Ribas, C., Robbins, M. B., Stiles, F. G., Stotz, D. F., Zimmer K. J.** (2022). A classification of the bird species of South America. American Ornithological Society. <http://www.museum.lsu.edu/~Remsen/SACCBaseline.htm>.
- Sanmartín, M.** (2015). Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia Curaray. Gobierno autónomo descentralizado Parroquia rural de Curaray. 180 p.
- Santos-Moreno, A., Pérez-Irineo, G., Ventura-Cristóbal, E.** (2019). Diversidad de aves de sotobosque en un bosque tropical perenne en los Chimalapas, México, *131*(3), 606-614.
- Sherman, P.** (2000). Reproductive biology and ecology of white-winged trumpeters (*Psophia leucoptera*) and recommendations for the breeding of captive trumpeters. *Zoo Biologu*, *19*(1), 65-84.
- Shoobridge, D.** (2019). El mercado de la cacería – la cacería del mercado: carne de origen silvestre en bosques tropicales. *Scientia Agropecuaria*, *10*(3), 433-448.
- Sodhi, S., Smith, K.** (2007). Conservation of tropical birds: mission possible?. *Journal of Ornithology*, *148*, 305-309.
- Tirira, D. G., Rios, M.** (2018). Monitoreo Biológico Yasuní. Volumen 8: Uso de flora y fauna por el pueblo Waorani, Amazonía del Ecuador. Ecuambiente Consulting Group. Quito.
- Tobler, M., Carrillo-Percestequi, S., Pitman, R., Mares, R., Powell, G.** (2008). An evaluation of camera traps for inventorying large-and medium-sized terrestrial rainforest mammals. *Animal Conservation*, *11*(3), 169-178.
- Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., Umaña, A.** (2004). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia. 236 p.
- Whittaker, R.H.** (1960). Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*.

Ciencias Naturales

Comunicación breve

La presencia de *Sloanea multinervis* (Elaeocarpaceae) en Colombia

Presence of *Sloanea multinervis* (Elaeocarpaceae) in Colombia

✉ **Leonardo Palacios-Duque**

Programa de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Tecnológica del Chocó, Diego Luís Córdoba, Ciudadela universitaria, barrio Nicolás Medrano, Quibdó, Chocó, Colombia

Resumen

Se documenta en Colombia el primer registro de *Sloanea multinervis* J.E. Guevara, D. Fernández y W. Palacios, especie que sólo se conocía por su protólogo, y cuya presencia se restringía a la Amazonía ecuatoriana.

Palabras clave: Amazonia; Flora de Colombia; Novedades corológicas; Putumayo.

Abstract

The first record of *Sloanea multinervis* J.E. Guevara, D. Fernández y W. Palacios is documented for Colombia. This species was only known for its protologue and its presence was restricted to the Ecuadorian Amazon.

Keywords: Amazonia; Flora of Colombia; Chorological novelties; Putumayo.

Introducción

Sloanea L. es uno de los cuatro géneros neotropicales de la familia Elaeocarpaceae Juss., y es el más numeroso e interesante por su morfología, sistemática y biogeografía. Actualmente se considera que *Sloanea* cuenta con cerca de 127 especies, distribuidas desde México hasta el norte de Argentina (Pennington, 2016). En Colombia se registran formalmente 47 especies de *Sloanea*, contando las presentes y las de posible existencia (Palacios-Duque, 2015), aunque Pennington & Wise (2017) sólo reportan 25. Esta diferencia en el reconocimiento de las especies se explica por el criterio demasiado integrador de estos autores y porque no consultaron los herbarios de Colombia para estudiar las muestras conservadas en ellos.

Al revisar los trabajos adelantados sobre *Sloanea*, se encontró el reporte de un nuevo registro de una interesante especie diagnosticada, descrita y publicada recientemente como nueva por Guevara *et al.* (2016) a partir de recolecciones realizadas en Ecuador. Cabe resaltar que se trata de un taxón poco frecuente y que sólo se observó un individuo en el muestreo de 106 parcelas permanentes de una hectárea en la Amazonia de Ecuador y Perú.

Materiales y métodos

Se revisaron ejemplares del género *Sloanea* pertenecientes a los herbarios colombianos CHOCO, COL, HUA, JAUM y UDBC abreviados de acuerdo con el *New York Botanical Garden* (NYBG, 2023). La identificación del material aquí estudiado se realizó siguiendo la descripción y diagnosis presentadas en Guevara *et al.* (2016). Asimismo, en los herbarios QCA y QCNE de Ecuador se estudió directamente parte del material tipo de *Sloanea multinervis* (Figura 1). Algunos duplicados no fueron localizados o no estaban

Citación: Palacios-Duque L. La presencia de *Sloanea multinervis* (Elaeocarpaceae) en Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):347-351, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefnyn.1874>

Editor: Elizabeth Castañeda

Correspondencia:

Leonardo Palacios-Duque;
d-lpalaciosd@utch.edu.co;
lepduque@hotmail.com

Recibido: 23 de febrero de 2023

Aceptado: 26 de mayo de 2023

Publicado en línea: 6 de junio de 2023



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

disponibles en herbarios: un isotipo (QCA, sin localizar, MO, no visto), un paratipo, el *Naranja y Freire 795* (QCNE, sin localizar, MO, no visto), así como los paratipos *Palacios et al. 17846* y *Palacios et al. 17924* (QCNE, ambos sin localizar).

Resultados

Como parte del trabajo que se ha venido realizando con las muestras de *Sloanea* de algunos herbarios de Colombia, se da a conocer el primer registro de *S. multinervis* en Colombia. Dado el acertado detalle presentado por **Guevara et al.** (2016) en la diagnosis, descripción

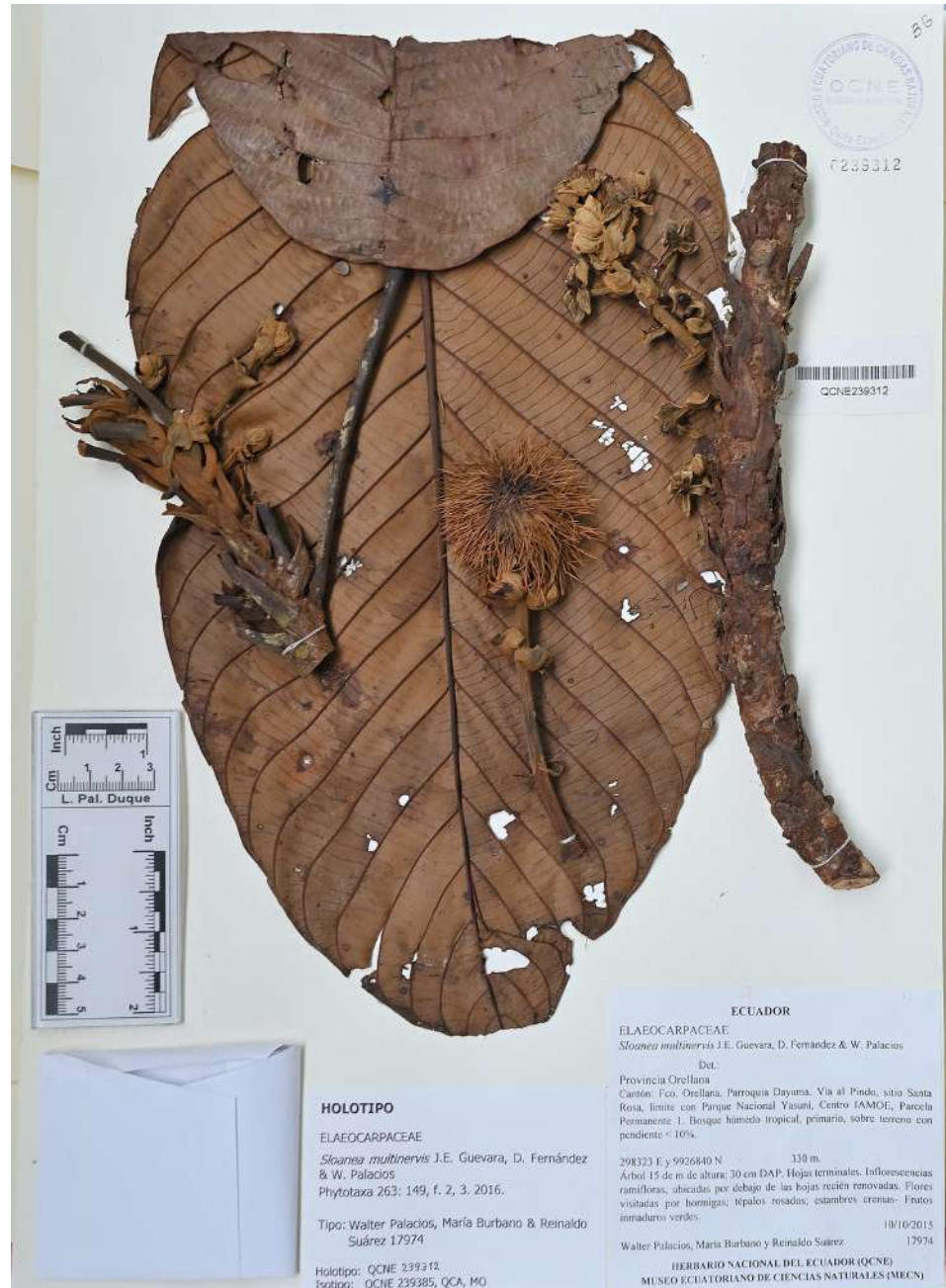


Figura 1. Holotipo de *Sloanea multinervis* J. E. Guevara, D. Fernández y W. Palacios. Recolección, a partir de W. Palacios, M. Burbano y R. Suárez 17974 (QCNE 239312!)

y discusión taxonómica de esa nueva especie, aquí se obvia una nueva descripción y la discusión de afinidades taxonómicas, pues es indiscutible que se trata de una entidad morfológicamente bien distinguible de cualquier otra de las especies conocidas del género hasta ahora. No obstante, se resalta que el material colombiano exhibe los caracteres diagnósticos propios de esta entidad, como son las estipulas abundantes, notablemente conspicuas, sin nervaduras y persistentes con el desarrollo de la hoja; una lámina foliar con numerosos nervios secundarios (más de 26), y bractéolas naviculares, conspicuas y persistentes con el desarrollo del fruto (**Figura 2**). Sin entrar en precisiones taxonómicas profundas, es importante mencionar que, en ausencia de caracteres florales y dado el tamaño de sus estipulas y hojas, esta especie podría ser confundida con alguna especie del antiguo



Figura 2. Detalle de una ramita fructífera de *Sloanea multinervis* J. E. Guevara, D. Fernández y W. Palacios, a partir de R. López *et al.* 16702 (UDBC 042354)

subgénero *Sloanea* C. E. Smith Jr., sect. *Sloanea* C. E. Smith Jr., aunque la morfología de las estípulas en este subgénero es notablemente distinta de las que exhibe la especie aquí estudiada. Si bien, *S. multinervis* es una especie muy distintiva dentro del género, se presenta una clave de identificación que permite separarla de las especies registradas en el área de recolección y en zonas adyacentes.

1. Cuatro sépalos, iguales en forma y tamaño, cubriendo estos los órganos florales internos antes de la antesis.....2
 - 1". Cinco a doce sépalos, desiguales en forma y tamaño, sin cubrir estos los órganos florales internos antes de la antesis3
2. Inflorescencias en racimos simples y cápsulas de hasta 5,5 cm de diámetro, espinas rectas de 1–3 cm de longitud*S. multinervis*
 - 2". Inflorescencias en racimos compuestos; cápsulas de hasta 2,5 cm de diámetro, espinas rectas y cortas de 2-3 mm de longitud.....*S. porphyrocarpa*
3. Cápsulas elípticas de 2-3 cm de diámetro incluyendo las espinas, espinas rectas, semiflexibles *S. tuerckheimii*
 - 3". Cápsulas globosas de 5 - 7 cm de diámetro incluyendo las espinas, espinas notablemente recurvadas, rígidas *S. fragrans*

Sloanea multinervis J. E. Guevara, D. Fernández y W. Palacios., Phytotaxa 263 (2): 147-153. 2016. Tipo: ECUADOR. Provincia Orellana, Cantón Francisco Orellana, parroquia Dayuma, vía al Pindo, sitio Santa Rosa, límite con Parque Nacional Yasuní, Centro IAMOE, parcela permanente 1, bosque húmedo tropical, primario, sobre terreno con pendiente < 10 %, 298323 E y 9926840 N, 330 m, 10 oct 2015 (fl, fr), W. Palacios, M. Burbano y R. Suárez 17974 (holotipo: QCNE 239312!; isotipo: QCNE 239385!, MO n. v, QCA n. v).

Material examinado. COLOMBIA. Putumayo. Puerto Asís, vereda Agua negra, finca el Madrigal, 00° 30'02" N, 76° 28'56" W, 255 m, 14 mar 2019 (fl pas. antesis, fr), R. López *et al.* 16702 (UDBC 042354). ECUADOR. Napo, Cantón Orellana, sector Huashito, 20 km al norte de Coca, propiedad de Palmoriente, bosque húmedo tropical, bosque primario, terreno plano, suelo negro, fértil, hydrandpt. 00° 20' S, 77° 05' W, 250 m, 3 – 21 nov 1989 (fl), E. Gudiño 144 (QCA 204743).

Observaciones geográficas. En la publicación original se menciona que el material tipo proviene del Cantón Coca. Sin embargo, los datos registrados en las etiquetas del holotipo y el isotipo estudiados hacen referencia al Cantón Francisco de Orellana. Para mayor precisión, se presenta una imagen del holotipo (**Figura 1**), ya que en la publicación original la especie se presentó principalmente en ilustraciones, en tanto que las fotografías corresponden a imágenes de la especie en vivo.

Estado de conservación. *S. multinervis* se conocía sólo por las colecciones asociadas a su diagnóstico y descripción original, las cuales corresponden a los años 1989 y 2015 (paratipos y holotipo, respectivamente). Según **Guevara et al.** (2016), la población del paratipo *E. Gudiño 144* (QCA 204743) se ha visto drásticamente afectada por procesos de modificación en el uso del suelo, a lo que suma la poca frecuencia de esta especie en la Amazonia ecuatoriana y en la peruana. Por ello concluyeron que la especie podía categorizarse como casi amenazada (NT) de acuerdo con las categorías de la International Union for Conservation of Nature (**IUCN**, 2012). No obstante, con el hallazgo de esta población colombiana (*R. López et al.* 16702; UDBC 042354) en el departamento del Putumayo ahora son tres las poblaciones asociadas a esta especie, e incluso existiría una cuarta localidad si se tuviera en cuenta el paratipo *Naranjo y Freire 795*. Sin embargo, no fue posible validar el registro de la localidad porque el espécimen no se localizó ni se examinó, aunque se sabe que la ubicación corresponde al Cantón Orellana.

Los datos actuales permiten reevaluar la especie según el criterio B: Área pequeña, fragmentada, en disminución o fluctuante, y confrontarlo con el subcriterio 1: Extensión de presencia estimada, que para la especie fue de 1.890 km², por lo que se le asignó a

categoría de especie amenazada (EN). Además, se cumplen los umbrales a y b, por estar en menos de cinco localidades y por la disminución de su hábitat como resultado del cambio en el uso de la tierra tanto en Ecuador como en Colombia. Se resalta que esta entidad no se había recolectado ni registrado antes en ningún herbario colombiano, por lo que este constituye el primer y único espécimen estudiado de la especie en Colombia. Su hallazgo como un árbol residual, en una zona de potrero, es una situación similar a la descrita por **Guevara et al.** (2016) para el paratipo E. *Gudiño 144* (QCA 204743), siendo evidente el grado de amenaza de sus zonas de distribución natural. Por su condición de especie rara o poco frecuente, se invita a las instituciones de investigación de institutos y universidades con influencia en la Amazonia colombiana a estudiar las poblacionales naturales de la especie.

Agradecimientos

A Carola Patricia Cañón Valenzuela, por el ánimo brindado para retomar los estudios en *Sloanea* y su importante ayuda en la adquisición, búsqueda y envío de valiosa literatura de apoyo para estos estudios sistemáticos y taxonómicos en *Sloanea* y otros grupos vegetales. A los curadores y directores y al secretariado de los herbarios colombianos (COL y UDBC) y ecuatorianos (QCA y QCNE), especialmente a las investigadoras Diana Fernández Fernández y Marcia Peñafiel Cevallos, del herbario QCNE. Asimismo, a los directivos del programa de Biología de la Universidad Tecnológica del Chocó, por las facilidades brindadas para la puesta en marcha de los estudios de *Sloanea* en Colombia y en países cercanos.

Conflicto de intereses

No se presenta ningún conflicto de intereses y la información presentada es original y producto del constante estudio y trabajo en el género *Sloanea* L. (Elaeocarpaceae).

Referencias

- Guevara Andino, J. E., Fernández-Fernández, D., Palacios, W. A.** (2016). A new species of *Sloanea* (Elaeocarpaceae) subgenus *Quadrisepala* from Ecuadorian Amazonia. *Phytotaxa*, 263 (2), 147-153. <https://dx.doi.org/10.11646/phytotaxa.263.2.7>
- IUCN.** (2012). *IUCN Red List Categories and Criteria, Version 3.1*. Second edition. Prepared by the IUCN Species Survival Commission. Gland, Switzerland; Cambridge, United Kingdom.
- Palacios-Duque, L.** (2015). *Sloanea*. En R. Bernal., S.R. Gradstein., M. Celis (Ed.), *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Bogotá, Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Pennington, T.D.** (2016). Prodrum Sloaneorum Americanarum. *Opuscula Neotropica* 2, 1-24.
- Pennington, T.D., Wise, R.** (2017). *The Genus Sloanea (Elaeocarpaceae) in America*. Milborne Port, United Kingdom. Dh Books.
- NYBG.** (2023). *Index Herbariorum*. Aplicativo digital. New York Botanical Garden. Fecha de consulta: 20 de febrero de 2023. Disponible en: <http://sweetgum.nybg.org/science/ih/>

Artículo original

Un nuevo humedal artificial en la costa central de Perú: primera caracterización de su avifauna

A new artificial wetland in the central coast of Perú: First characterization of its avifauna

David Montes-Iturrizaga^{1,2,*}, Héctor Aponte^{1,2}, Sonia Valle-Rubio¹

¹ Carrera de Biología Marina, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

² Coastal Ecosystems of Peru Research Group. Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

Resumen

Los humedales artificiales se consideran una alternativa al tratamiento de aguas servidas y representan una oportunidad de hábitat para especies residentes y migratorias ante el deterioro de los humedales naturales. En ese contexto, se presentan aquí los primeros resultados de la caracterización de la avifauna del Humedal Artificial de Chilca (HAC) en la costa de Lima. Se hicieron monitoreos quincenales durante diciembre del 2020 y marzo del 2022 y se registraron 56 especies de aves entre residentes (32), migratorias (23) y una divagante para el Perú (1). Las familias con mayor número de especies fueron Scolopacidae (28,57 %), Laridae (12,5 %), Charadriidae (8,93 %) y Ardeidae (8,93 %), que en su conjunto agrupan a más de la mitad de las especies reportadas. La expansión de los cuerpos de agua, así como de la vegetación acuática y circundante, ha permitido el incremento del registro de especies a lo largo del tiempo. Se reportó, además, el asentamiento de una agrupación de *Phoenicopterus chilensis*, la reproducción de *Himantopus mexicanus*, *Anas bahamensis*, *Charadrius alexandrinus* y *C. vociferus* y la presencia de la especie endémica *Geositta peruviana* y de *Larus argentatus*, divagante del hemisferio norte. Se puede considerar que el HAC constituye una nueva oferta de hábitat para especies residentes y migratorias en el sistema de humedales de la costa central, así como un espacio con alto potencial ecoturístico. Los perros ferales, los desechos y el acceso de vehículos motorizados constituyen una amenaza mayor para la avifauna presente.

Palabras clave: Humedal; Pozas de oxidación; Aves migratorias; Plantas silvestres; Chilca, Perú.

Abstract

Artificial wetlands are considered an alternative to wastewater treatment and a habitat opportunity for resident and migratory species in the face of the deterioration of natural wetlands. Based on this, we present the first results on the characterization of the Chilca Artificial Wetland (HAC) avifauna on the coast of Lima. We conducted fortnightly monitorings from December 2020 to March 2022 and registered 56 bird species: residents (32), migratory (23), and wandering (1). The families with the highest number of species were Scolopacidae (28.57%), Laridae (12.5%), Charadriidae (8.93%), and Ardeidae (8.93%), which represented more than half of the reported species. The expansion of the waterbodies and the aquatic and surrounding vegetation has increased the record of species over time. In this sense, we also reported the settlement of a group of *Phoenicopterus chilensis* and the reproduction of *Himantopus mexicanus*, *Anas bahamensis*, *Charadrius alexandrinus*, and *C. vociferus*. The endemic species *Geositta peruviana* and the vagrant *Larus argentatus* from the northern hemisphere were also recorded. HAC can be considered, therefore, a new habitat offer for resident and migratory species in the wetland system of the central coast, as well as a site with high eco-tourism potential. However, feral dogs, waste, and the intrusion of motorized vehicles constitute a significant threat to the avifauna.

Keywords: Wetland; Oxidation pools; Migratory birds; Wild plants; Chilca, Perú.

Citación: Montes-Iturrizaga D, Aponte H, Valle-Rubio S. Un nuevo humedal artificial en la costa central de Perú: primera caracterización de su avifauna. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):352-370, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1883>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

David Montes-Iturrizaga;
dmontes@cientifica.edu.pe

Recibido: 3 de marzo de 2023

Aceptado: 26 de junio de 2023

Publicado en línea: 28 de junio de 2023



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

Introducción

Los humedales son ecosistemas importantes de nuestro planeta que brindan diferentes servicios ecosistémicos: son reservorios de agua y fuente de aprovechamiento de especies de peces y flora. Asimismo, tienen un papel importante en la purificación del agua como reguladores del ciclo hídrico y de los nutrientes en el ecosistema (**Aponte et al.**, 2021, **Pérez et al.**, 2022). Desde el punto de vista cultural son lugares para la recreación, la educación ambiental, la investigación y las actividades turísticas (**Constanza et al.**, 1997; **Moschella**, 2012). Se destaca también su importancia biológica, pues sirven de hábitat para el descanso y reproducción de aves residentes y migratorias y de otras especies de fauna (**Apeño & Aponte**, 2022). La Convención Ramsar, relativa a los humedales de importancia internacional, incluye en su definición de humedales las superficies cubiertas por aguas de régimen artificial, ya sea de forma permanente o temporal (**RAMSAR**, 2004). Se entiende por humedal artificial aquellos ecosistemas donde la infraestructura diseñada por el hombre puede albergar procesos naturales, incluidos los procesos biológicos y los relacionados con el agua como la depuración de aguas servidas (**Sanabria**, 2006). Ante la ausencia de sistemas de alcantarillado eficientes, las lagunas de oxidación y los humedales artificiales representan una buena opción para el tratamiento de aguas servidas (**RAS**, 2000; **Lara**, 1999). En este contexto, un humedal artificial puede incluir un diseño que permite la reducción de contaminantes, además de originar paisajes atractivos y crear hábitats para especies silvestres (**Sierra & López**, 2013), las cuales pueden constituirse en comunidades con relaciones interespecíficas cuyo estudio es necesario para comprender el funcionamiento de dichos hábitats (**Lara**, 1999).

Una de las causas del declive de las poblaciones de aves acuáticas es la degradación de los humedales, situación que se agrava cuando se trata de especies clasificadas como amenazadas (**Birdlife International**, 2000; **Green**, 1996). Esta pérdida de calidad de los humedales naturales ha ocasionado que las aves busquen los humedales artificiales como alternativa de cobijo y alimentación (**Pérez-Granados et al.**, 2015), lo que los convierte en lugares ideales para los estudios de la diversidad de gran importancia turística (**Pulcha & Valencia**, 2019; **Lara**, 1999).

La riqueza y abundancia de la avifauna en los humedales artificiales, al igual que en los naturales, puede variar según las estaciones del año y en función de la modificación de las variables físicas (**Pérez-Granados et al.**, 2015). Para establecer la funcionalidad e importancia de estos ecosistemas es necesario investigar no solo los aspectos fisicoquímicos, sino también los biológicos para determinar su viabilidad (**Terreros**, 2017). La formulación oficial de medidas legales o técnicas para la conservación de sus componentes faunísticos y florísticos se sustenta en la investigación científica (**Pérez-Granados et al.**, 2015; **Vargas-Fonseca**, 2010). **Cisterna-Osorio & Pérez** (2019) afirman, además, que los humedales artificiales repercuten positivamente en la biodiversidad y son de gran importancia como agente complementario en la disminución del impacto contaminante del tratamiento de aguas servidas en su fase final, mejorando así la calidad de vida de las personas.

La costa del Pacífico suramericano está compuesta por una red de humedales entre manglares, estuarios y lagunas costeras (**Rivera et al.**, 2021). Esta red es dinámica, con humedales cuyo origen es reciente (algunos de ellos con menos de 100 años de antigüedad) y tiene relación con la actividad humana (**Aponte**, 2017; **Ywanaga Reh et al.**, 2021). Un caso particular es el de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ubicada en el distrito de Chilca (Cañete, Lima), la cual descarga sus aguas en la zona supralitoral de la playa San Pedro desde el 2015. Con el paso del tiempo esta descarga ha permitido la formación de un humedal artificial que pasó inadvertido para la comunidad científica hasta que se inició la presente investigación. Con ella se logró verificar la expansión continua de cuerpos de agua acompañados del crecimiento constante de la cobertura vegetal y de especies de aves residentes y migratorias. Entre los reportes y censos de aves en humedales de Lima se destaca el estudio de **Koepcke** (1954), que presentó la lista de la avifauna de los hábitats de praderas pantanosas, totorales y lagunas de agua dulce, especialmente de

las especies *Anas bahamensis*, *Oxyura jamaicensis*, *Nycticorax nycticorax*, *Charadrius vociferus*, *Pluvialis dominica*, *Himantopus mexicanus*, *Actitis macularius*, *Tringa flavipes*, *Tringa melanoleuca*, *Tringa solitaria*, *Anthus peruvianus*, *Hirundo rustica*, *Pygochelidon cyanoleuca*, *Gallinula chloropus* y *Fulica ardesiaca*. En cuanto a los censos del departamento de Lima entre 1992 y 1995, **Velarde** (1998) reporta en la Laguna El Paraíso (Huacho) cuatro familias y un número máximo de nueve especies, siendo *Rollandia rolland*, *Gallinula chloropus* y *A. bahamensis* las de mayor frecuencia y número, en tanto que en Pantanos de Villa se registraron hasta 38 especies de aves agrupadas en 15 familias, entre las que se destacaban *Egretta thula*, *G. chloropus* y *Calidris alba*.

Acuy & Pulido (2008), en su censo neotropical de aves acuáticas del Perú, determinaron que las especies más abundantes en los humedales eran *Phalacrocorax bougainvillii*, *Gallinula chloropus*, *Fulica ardesiaca*, *Larus modestus*, *Rynchops niger*, *Anas cyanoptera*, *Anas flavirostris* y *Phoenicopterus chilensis*. En el departamento de Lima se contabilizaron más especies (27) que en Laguna Paraíso, en tanto que en Albufera de Medio Mundo solo 20 especies, pero con mayor número de individuos.

Posteriormente (**González & Pulido**, 2011), en el censo neotropical de aves acuáticas del 2010, los autores determinaron que el sitio con mayor número de individuos y especies (35) era Playa Paraíso con *Fulica ardesiaca* como la más abundante en los cinco sitios censados en el departamento de Lima, en tanto que en Poza La Arenilla sólo se registraron 13 especies.

Con respecto a la mayor riqueza y abundancia de especies durante los meses de verano (enero a marzo), **Acuy & Pulido** (2008) reportaron en esta temporada un mayor número de especies debido al desplazamiento hacia los humedales costeros de chorlos y playeros migratorios, así como de anátidos en busca de sitios de refugio y descanso, lo cual amerita la evaluación de la avifauna de humedales en este periodo.

En este estudio se presentan los resultados de la primera caracterización de la avifauna del Humedal Artificial de Chilca (HAC) durante entre diciembre del 2020 y marzo del 2022 como contribución a la caracterización y evaluación de este ecosistema; se discute, asimismo, su importancia para la biodiversidad de los humedales de la costa central del Perú.

Materiales y métodos

Área de estudio

El HAC se ubica en playa San Pedro (distrito de Chilca, provincia de Cañete, departamento de Lima, Perú), que limita al norte con playa Chilca y al sur con playa Yaya. Al este, el cuerpo de agua colinda con un área de vegetación y de desmonte que limita, a su vez, con una pista de trocha. El HAC se halla en zona supralitoral de playa, a 728 m de una PTAR (12°32'21" S, 76°44'44" W). Actualmente el humedal tiene 1,5 km de longitud y 98 m en su punto más ancho; contando la zona de playa contigua, el área evaluada es de 21,4 hectáreas (**Figura 1**).

Los cuerpos de agua que conforman el HAC provienen de la PTAR del distrito de Chilca. La coloración rojiza del agua y el mal olor en todo el trayecto del canal de descarga sugieren que el proceso de oxidación no es completo. El tramo del canal que ingresa en la zona del humedal presenta una vegetación diversa que lo cubre en gran parte, y en él se percibe falta de mantenimiento y acumulación de desperdicios sólidos como botellas, envases de plástico y otros desechos similares. El punto de descarga se ubica en un área de la playa con un relieve irregular, lo que ocasiona que las aguas se dirijan hacia los extremos norte y sur sin alcanzar la orilla del mar.

Zonificación y hábitats del área de estudio

Para facilitar el estudio se zonificó el área del HAC y los hábitats colindantes en tres zonas (**Figura 1**).

Zona sur (ZS), desde el punto donde descargan las aguas provenientes de la planta de tratamiento y, de allí, hacia el sur. Se caracteriza por presentar cuerpos de agua intercomunicados. Limita con el hábitat de playa por el oeste y presenta un área de vegetación en



Figura 1. Ubicación y extensión actualizada del Humedal Artificial de Chilca (HAC). La elaboración se hizo con base en la imagen disponible extraída de Google Earth correspondiente en enero del 2022. ZN: zona norte; ZC: zona centro; ZS: zona sur; PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales; T: trayecto de descarga de PTAR

la arena por el este. Gran parte de su extensión tiene una profundidad menor a los 20 cm aproximadamente. En el punto de descarga de las aguas procedentes de la PTAR y en los alrededores inmediatos fue evidente la coloración rojiza y el mal olor, sin embargo, se notó un crecimiento constante de vegetación macrófita principalmente en las orillas, de forma rala y con especies poco abundantes como *Sesuvium portulacastrum* (L.) L., *Heliotropium curassavicum* L. y *Althernanthera halimifolia* (Lam.) Standl. ex Pittier; en el cuerpo de agua fue posible apreciar de forma ocasional algunas frondas de *Lemna gibba* L. sin ser muy abundante.

Zona centro (ZC): desde el punto de descarga, las aguas de la planta de tratamiento se dirigen hacia la parte media hasta un abrupto angostamiento. Este tramo está constituido por cuerpos de agua intercomunicados y es la zona de mayor extensión del HAC. La cobertura vegetal terrestre y acuática se extiende por toda la zona, tanto en el cuerpo de agua como en sus orillas. El agua presentaba una coloración verdosa, sin malos olores. Esta zona limita con la playa y el hábitat marino por el oeste, en tanto que al este limita con un área de vegetación en la parte seca y una angosta y corta franja de desmonte. La profundidad es mayor que en la zona sur o en la norte, con un promedio de 40 cm. Se caracteriza por la presencia de grama de *Distichlis spicata* (L.) Greene, una población medianamente abundante de *Solanum pimpinelifolium* L., una zona con totora (*Schoenoplectus californicus* (C.A. Mey.) Soják) y algunos individuos dispersos de *Chenopodium* sp., *Enydra sessilifolia* (Ruiz & Pav.) Cabrera y *Sesuvium portulacastrum*. Como sucede en la zona sur, en el cuerpo de agua fue posible apreciar algunas frondas ocasionales de *L. gibba* L. no muy abundantes.

Zona norte (ZN): se extiende desde el angostamiento notorio de la zona central hasta el límite norte del humedal. Constituida por un solo cuerpo de agua de gran extensión y con escasa vegetación, principalmente de macrófitas, limitada a algunas áreas de sus orillas. Colinda con el hábitat de playa por el oeste y por el este se aprecia una franja ancha y extensa de desmonte y una reducida área de vegetación en la zona seca. La coloración de las aguas era verdosa y no se percibieron malos olores. La profundidad es menor a 15 cm aproximadamente en toda su extensión. Esta zona se caracteriza por una abundante presencia de plantas subfruticasas con la predominancia de *Solanum americanum* Mill.; también fue posible apreciar zonas de grama (*D. spicata*) y matas de *A. halimifolia*, *E. sessilifolia* y *Rumex* sp. En los cuerpos de agua fue posible apreciar *Ludwigia* sp.

Con base en **Angulo-Pratolongo et al.** (2010), también se consideraron tres hábitats en el área de estudio: humedal (H), es decir, toda área cubierta por agua y vegetación, inundable o no, sobre la arena que la bordea; playa y mar (P), o sea, toda la extensión de arena en límites con el humedal y el océano Pacífico, y desmonte (D), toda extensión de tierra donde se evidenció el depósito de desechos de construcciones.

Registro e identificación de aves

Se hicieron 26 evaluaciones quincenales durante el periodo de estudio (diciembre del 2020, y abril del 2021 a marzo del 2022), con excepción de mayo y junio del 2021, cuando se efectuó una sola evaluación. Se registraron especies en dos horarios: 06:30 y 15:00 horas. El número mínimo de observadores fue de una persona. Se usó el siguiente equipo óptico: binoculares Tasco 20x50mm; monocular Cafini 16x52mm; cámara digital Canon T3 y un teleobjetivo Tamron SP 150-600 mm F/5-6.3.

Para el registro, se establecieron transectos a 30 m de distancia a partir del borde de los cuerpos de agua del humedal desde el extremo norte hacia el extremo sur y, luego, en sentido contrario, evitando siempre alterar el comportamiento de las aves. Durante cada recorrido se identificaron las especies con ayuda de los equipos ópticos. Se hicieron capturas fotográficas de todos los ejemplares observados para registrar posteriormente su hábitat y confirmar su identificación. Se anotó también el estadio reproductivo (huevos, polluelos, juveniles y adultos) de las especies observadas. La identificación se ajustó a la guía de aves de Perú de **Schulenberg et al.** (2010). Para la revisión de la nomenclatura taxonómica se usó la lista de aves del Perú (**Plenge**, 2022).

Análisis de resultados

Tomando como base el territorio peruano, se determinó el carácter de residente, endémico, emigrante boreal, emigrante austral y divagante de la avifauna siguiendo a **Schulenberg et al.** (2010). Se cuantificó el número de especies identificadas durante todo el estudio (Rt), y por mes (Rm) y hábitat (Rh); los gráficos representativos se hicieron en Excel ®Microsoft (bajo licencia). Para la determinación de la frecuencia relativa de cada especie de ave registrada, se usó la siguiente fórmula según **MINAM** (2015):

$$Fr = \frac{L_x}{N} \times 100,$$

donde Fr corresponde a frecuencia relativa, Lx al número de registros en los que la especie estuvo presente en el HAC, y N, el número total de registros realizados en el HAC.

Resultados y discusión

Riqueza de especies

Se registraron 56 especies de aves distribuidas en 11 órdenes, 22 familias y 38 géneros (**Tabla 1**). Según su distribución, se determinaron las especies residentes (32), emigrantes boreales (22), emigrante austral (1) y una divagante para el Perú (*Larus argentatus*). Se incluyeron en este conteo una especie endémica (*Geositta peruviana*) y dos especies de patos andinos divagantes para la costa central (*Anas flavirostris* y *A. georgica*) (**Tabla 1**). Las familias Scolopacidae, Laridae y Charadriidae agruparon 28 de las especies, es decir, el 50 % de la avifauna de este humedal, en tanto que 15 familias estuvieron representadas por una sola especie (26,8 %) (**Figura 2a**).

La riqueza de especies de aves registrada en este estudio no dista mucho de otros estudios en humedales de la costa central (**Gobierno Regional de Lima**, 2015; **Cruz et al.**, 2007; **SERNANP**, 2010; **Pisconte et al.**, 2020), con datos similares en cuanto a la proporción de varias especies residentes y emigrantes. Por ejemplo, en la región central peruana la riqueza de aves es de 55 a 211 especies con 1,15 especies de aves por hectárea (**Tabla 2**). En este contexto, el HAC se encuentra en el segundo lugar en cuanto a especies de aves por unidad de área, solo por debajo del Humedal Costero Poza de la Arenilla (**Podestá & Cotillo**, 2016). Esto nos permite resaltar que, aunque el hábitat estudiado es

Tabla 1. Lista de especies registradas en el Humedal Artificial de Chilca (HAC) según taxonomía, distribución, hábitat y zona. R: residente, EB: emigrante boreal, EA: emigrante austral, E: endémico, V: divagante, H: humedal, P: playa, D: desmonte; N: zona norte, C: zona centro, S: zona sur. (*) Divagantes para la costa central

Nº	Órdenes, familias y especies	Nombre común	Distribución	Hábitat	Zona
Phoenicopteriformes					
Phoenicopteridae					
1	<i>Phoenicopterus chilensis</i>	Parihuana, flamenco austral	R	H,P	N, C, S
Pelecaniformes					
Pelecanidae					
2	<i>Pelecanus thagus</i>	Pelicano peruano	R	P	C
Threskiornithidae					
3	<i>Plegadis ridgwayi</i>	Yanavico, ibis de la puna	R	H	N, C, S
Ardeidae					
4	<i>Ardea alba</i>	Garza grande	R	H,P,D	C, S
5	<i>Bubulcus ibis</i>	Garza bueyera	R	H	C
6	<i>Egretta caerulea</i>	Garcita azul	R	H,P,D	N, C, S
7	<i>Egretta thula</i>	Garcita blanca	R	H,P,D	N, C, S
8	<i>Nycticorax nycticorax</i>	Garza huaco común	R	H	C
Suliformes					
Phalacrocoracidae					
9	<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	Cormorán neotropical (cushuri)	R	H,P	C
Anseriformes					
Anatidae					
10	<i>Anas bahamensis</i>	Pato gargantilla	R	H	N, C, S
11	<i>Anas cyanoptera</i>	Pato colorado	R	H	N, C, S
12	<i>Anas flavirostris</i>	Pato barcino	R(*)	H	N, C, S
13	<i>Anas georgica</i>	Pato jergón	R(*)	H	N, C, S
Charadriiformes					
Burhinidae					
14	<i>Burhinus superciliaris</i>	Alcaraván, huerequque	R	D	N
Charadriidae					
15	<i>Charadrius alexandrinus</i>	Chorlo nevado	R	H,P,D	N, C, S
16	<i>Charadrius semipalmatus</i>	Chorlo semipalmado	EB	H,D	N, C, S
17	<i>Charadrius vociferus</i>	Chorlo gritón	R	H,D	N, C, S
18	<i>Pluvialis dominica</i>	Chorlo dorado americano	EB	H,D	N, C
19	<i>Pluvialis squatarola</i>	Chorlo gris	EB	H,D	N, C
Haematopodidae					
20	<i>Haematopus palliatus</i>	Ostrero americano	R	H,P,D	N, C, S
Laridae					
21	<i>Chroicocephalus cirrocephalus</i>	Gaviota capucha gris	R	H,P	N, C, S
22	<i>Larus argentatus</i>	Gaviota argétea	V	H,P	N
23	<i>Larus belcheri</i>	Gaviota peruana	R	H,P	N, C, S
24	<i>Larus dominicanus</i>	Gaviota dominicana	R	H,P	N, C, S
25	<i>Leucophaeus modestus</i>	Gaviota gris	EA	H,P	N, C, S
26	<i>Leucophaeus pipixcan</i>	Gaviota de Franklin	EB	H,P	N, C, S
27	<i>Thalasseus maximus</i>	Gaviotín real	EB	H,P	C

Recurvirostridae					
28	<i>Himantopus mexicanus</i>	Cigüeñuela cuello negro	R	H,P	N, C, S
Rynchopidae					
29	<i>Rynchops niger</i>	Rayador	EB	H	C
Scolopacidae					
30	<i>Actitis macularius</i>	Playero coleador	EB	H	C, S
31	<i>Arenaria interpres</i>	Vuelve piedra rojizo	EB	H,D	N, C
32	<i>Calidris alba</i>	Playero arenero	EB	H,P,D	N, C, S
33	<i>Calidris bairdii</i>	Playerito de Baird	EB	H	N, C, S
34	<i>Calidris himantopus</i>	Playero de pata larga (p.a.)	EB	H	C, S
35	<i>Calidris mauri</i>	Playerito occidental	EB	H	N, C, S
36	<i>Calidris melanotos</i>	Playero pectoral	EB	H	N, C, S
37	<i>Calidris minutilla</i>	Playerito menudo	EB	H,P,D	N, C, S
38	<i>Calidris pusilla</i>	Playerito semipalmado	EB	H,P,D	N, C, S
39	<i>Limnodromus griseus</i>	Agujeta de pico corto	EB	H	C
40	<i>Limosa haemastica</i>	Aguja de mar	EB	H	C
41	<i>Numenius phaeopus</i>	Zarapito trinador	EB	H,P	N, C, S
42	<i>Phalaropus tricolor</i>	Falaropo tricolor	EB	H	N, C
43	<i>Tringa melanoleuca</i>	Playero pata amarilla mayor	EB	H	C, S
44	<i>Tringa flavipes</i>	Playero pata amarilla menor	EB	H	C, S
45	<i>Tringa semipalmata</i>	Playero de aliblanca	EB	H	C, S
Falconiformes					
Falconidae					
46	<i>Falco sparverius</i>	Cernícalo americano	R	H,D	C
Cathartiformes					
Cathartidae					
47	<i>Cathartes aura</i>	Gallinazo de cabeza roja	R	H,P,D	N, C, S
48	<i>Coragyps atratus</i>	Gallinazo de cabeza negra	R	H,P,D	N, C, S
Strigiformes					
Strigidae					
49	<i>Athene cucularia</i>	Lechuza de arenal, l. terrestre.	R	H	C
Passeriformes					
Furnariidae					
50	<i>Geositta peruviana</i>	Minero peruano	E	H,D	N, C
Hirundinidae					
51	<i>Pygochelidon cyanoleuca</i>	Santarosita, golondrina azul y blanca	R	H	N, C, S
Motacillidae					
52	<i>Anthus peruvianus</i>	Cachirla peruana	R	H,D	N, C
Thraupidae					
53	<i>Sicalis luteola</i>	Chirigüe común, sabanero	R	H	C, S
Gruiformes					
Rallidae					
54	<i>Gallinula chloropus</i>	Polla de agua común	R	H	C
55	<i>Fulica ardesiaca</i>	Gallareta andina	R	H	C
Columbiformes					
Columbidae					
56	<i>Zenaida meloda</i>	Tórtola melódica (cuculí)	R	H	C

pequeño y artificial, puede considerarse de importancia por constituir un espacio para el descanso y refugio de la avifauna registrada. Al igual que en otros estudios sobre diversidad de aves en humedales de la región Lima, la familia Scolopacidae registró el mayor número de especies (16) en el HAC, todas ellas emigrantes boreales, por lo que este humedal puede tenerse en cuenta como parte del corredor migratorio para aves provenientes del Neotrópico, al igual que de otras especies registradas como *Charadrius semipalmatus*, *Leucophaeus pipixcan*, *Pluvialis dominica*, *P. squatarola*, *Thalasseus maximus* y *Rynchops niger* (Tabla 1). La población de las aves residentes y migratorias puede declinar debido a factores como la contaminación, la destrucción del hábitat y el cambio climático, lo que reduce la oferta de espacios e incrementa el número poblacional en los lugares de invernada de las migrantes (Pulido & Bermúdez, 2018). En este sentido, son necesarios más estudios sobre la abundancia de especies migratorias en el HAC para evaluar con mayor detalle la importancia de este ecosistema como un espacio complementario en la ruta de aves que llegan a la costa central del Perú y sus alrededores.

Uso de hábitat

En cuanto a la preferencia de hábitat, 55 especies se registraron en el humedal (H), 22, en la playa y el mar (P), 19 en la zona de desmonte (D) y por lo menos ocho especies compartían dos hábitats (Figura 2b). Se reportaron 26 especies (48 %) que usaban exclusivamente el hábitat del humedal, una el de playa y mar y otra, el desmonte (Figura 2b). *Pelecanus thagus* fue la única especie que se observó exclusivamente en playa y mar, mientras que *Burhinus superciliaris* se registró exclusivamente en el desmonte. Los tres hábitats eran usados conjuntamente por 10 especies (Tabla 1).

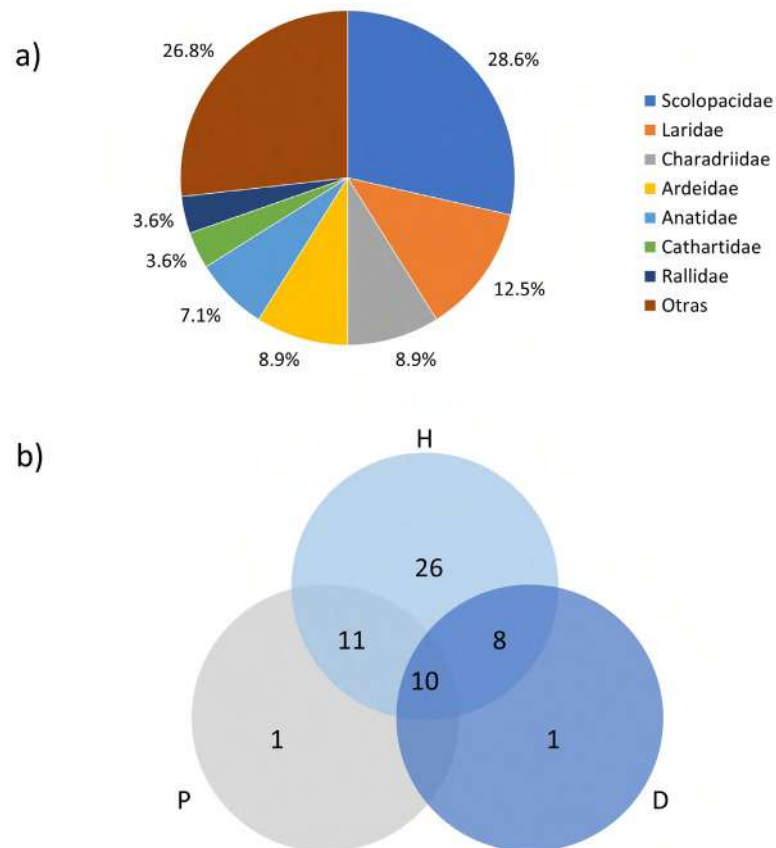


Figura 2. Características generales de la avifauna del HAC. **a)** Porcentaje de especies por familias de aves del HAC. **b)** Número de especies por hábitat (H: humedal, P: playa y mar, D: desmonte)

Tabla 2. Área, riqueza histórica y número de especies de ave por unidad de área (especies/hectárea) de algunos humedales de la costa central peruana

Humedal		Área (ha)	Riqueza histórica	Especies / área	Referencia
Los Pantanos de Villa	12°12'39"S - 76°59'20"O	263,27	211	0,8	Pulido & Bermúdez (2018)
Albufera de Medio Mundo	10°58'05"S - 77°39'23"O	687,71	63	0,09	Gobierno Regional de Lima (2015)
Laguna El Paraíso	11°12'04"S - 77°35'22"O	674,5	81	0,12	Cruz et al. (2007)
ACR Humedales de Ventanilla	11°52'35"S - 77°09'01"O	275,45	126	0,46	Podestá et al. (2021)
Humedal de Puerto Viejo	12°34'16"S - 76°42'35"O	275,81	72	0,26	SERNANP (2010)
Humedal Santa Rosa	11°35'45"S - 77°15'58"O	85	89	1,05	Apeño & Aponte (2022)
Humedal Costero Poza de la Arenilla	12°04'50"S - 77°09'15"O	18,2	98	5,38	Podestá & Cotillo (2016)
Humedal de Caucato	13°40'02"S - 76°12'43"O	54	55	1,02	Pisconte et al. (2020)
Humedal Artificial de Chilca	12°32'21"S - 76°44'44"O	21,4	56	2,61	Presente estudio

El uso de hábitats es variable en los humedales costeros. Así, por ejemplo, en los humedales de Eten (Lambayeque), se determinó que el uso exclusivo de la zona de humedales correspondió a 29 especies, en tanto que 99 lo usaban de forma total o parcial; solo se registraron dos especies que usaban los tres hábitats: *Falco peregrinus* e *Himantopus mexicanus* (**Angulo-Pratolongo et al., 2010**). **Pisconte et al. (2020)** reportaron que en el humedal de Caucato (Pisco-Perú) el uso de hábitat por parte de las aves era mayor en la orilla de la laguna, seguida por la orilla de la playa y menor en el espejo de agua. Así, la situación sería distinta en el HAC, ya que no presenta características uniformes en las tres zonas (varían el hábitat, las profundidades, la vegetación y el relieve); además, se suman los hábitats de playa y mar, lo que ofrece una mayor oferta de espacios para las diversas especies.

Con respecto a la distribución de las aves en las zonas descritas del HAC, 28 especies se registraron en las tres zonas (zonas norte, centro y sur) (**Tabla 1**); entre ellas se destacan *Phoenicopterus chilensis*, *Plegadis ridgwayi*, *Egretta caerulea*, *E. thula*, *Himantopus mexicanus*, *Haematopus palliatus*, *Charadrius* spp. y *Calidris* spp. En las zonas centro y norte se registraron 13 y dos especies exclusivas, respectivamente. No se registraron especies que usaran exclusivamente la zona sur. Siete especies se observaron únicamente en dos zonas (centro y sur) y otras seis en las zonas norte y centro. Debe destacarse que la zona centro fue la preferida por la avifauna registrada en el HAC, pues presenta un cuerpo de agua de mayor extensión y profundidad, además de tener una mayor cobertura vegetal distribuida en forma de islas, así como en las orillas y en la parte seca, lo que significa una mayor oferta de hábitat y de nicho ecológico comparada con las zonas norte y sur.

Frecuencia de observación

La frecuencia de observaciones en el HAC fue de un 50 % para 22 especies registradas, destacándose *Phoenicopterus chilensis* y *Plegadis ridgwayi*, con un porcentaje de 100 %, en tanto que cinco especies (*Anas flavirostris*, *A. georgica*, *Thalasseus maximus*, *Athene cucularia*, *Fulica ardesiaca*) se observaron una única vez (**Tabla 3** y **material suplementario 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1883/3379>). En el

hábitat de playa, se observaron sólo cuatro especies con una frecuencia mayor al 50 %, siendo *Haematopus palliatus* la observada con más frecuencia (80,8 %). En el hábitat de descampado se registró el menor número de avistamientos, con *Charadrius vociferus* y *Calidris alba* como las especies más frecuentemente observadas (seis avistamientos; 23,1 %), en contraste con *Burhinus superciliaris* con 15,4 % (**Tabla 3** y **material suplementario 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1883/3379>).

El número de especies registradas mensualmente en el hábitat de humedal (H) comenzó a incrementarse marcadamente a partir de julio del 2021, especialmente en los meses de febrero y marzo del 2022, con un conteo total de 39 y 40 especies, respectivamente (**Material suplementario 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1883/3379>). Este incremento también fue notorio para las especies residentes y migratorias boreales (**Tabla 4**), lo que estaría relacionado con la llegada de especies migratorias; esta misma observación hicieron **Pulido & Bermúdez** (2018) en el humedal de Pantanos de Villa, en donde en enero se registró el mayor número de especies por

Tabla 3. Frecuencia por hábitat. Se muestra el número de observaciones y su frecuencia con respecto al total de muestreos de los avistamientos de las especies en cada hábitat.

N°	Familia/Especie	Humedal		Playa		Desmonte	
		N°	Frec. %	N°	Frec. %	N°	Frec. %
Phoenicopteridae							
1	<i>Phoenicopus chilensis</i>	26	100	4	15,4		
Pelecanidae							
2	<i>Pelecanus thagus</i>			1	3,8		
Threskiornithidae							
3	<i>Plegadis ridgwayi</i>	26	100	1	3,8		
Ardeidae							
4	<i>Ardea alba</i>	14	53,8			1	3,8
5	<i>Bubulcus ibis</i>	4	15,4				
6	<i>Egretta caerulea</i>	13	50			1	3,8
7	<i>Egretta thula</i>	22	84,6	4	15,4		
8	<i>Nycticorax nycticorax</i>	3	11,5				
Phalacrocoracidae							
9	<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	3	11,5	2	7,7		
Anatidae							
10	<i>Anas bahamensis</i>	25	96,2				
11	<i>Anas cyanoptera</i>	16	61,4				
12	<i>Anas flavirostris</i>	1	3,8				
13	<i>Anas georgica</i>	1	3,8				
Burhinidae							
14	<i>Burhinus superciliaris</i>					4	15,4
Charadriidae							
15	<i>Charadrius alexandrinus</i>	14	53,8	3	11,5	5	19,2
16	<i>Charadrius semipalmatus</i>	20	76,9			4	15,4
17	<i>Charadrius vociferus</i>	12	46,2	1	3,8	6	23,1
18	<i>Pluvialis dominica</i>	3	11,5			2	7,7
19	<i>Pluvialis squatarola</i>	5	19,2			1	3,8

Haematopodidae							
20	<i>Haematopus palliatus</i>	14	53,8	21	80,8	1	3,8
Laridae							
21	<i>Chroicocephalus cirrocephalus</i>	15	57,7				
22	<i>Larus argentatus</i>	3	11,5	4	15,4		
23	<i>Larus belcheri</i>	21	80,8	15	57,7		
24	<i>Larus dominicanus</i>	13	50	3	11,5		
25	<i>Leucophaeus modestus</i>	7	26,9	6	23,1		
26	<i>Leucophaeus pipixcan</i>	11	42,3	9	34,6		
27	<i>Thalasseus maximus</i>	1	3,8	1	3,8		
Recurvirostridae							
28	<i>Himantopus mexicanus</i>	23	88,5	1	3,8		
Rynchopidae							
29	<i>Rynchops niger</i>	5	19,2				
30	<i>Actitis macularius</i>	9	34,6				
31	<i>Arenaria interpres</i>	13	50	1	3,8		
32	<i>Calidris alba</i>	15	57,7	14	53,8	6	23,1
33	<i>Calidris bairdii</i>	7	26,9	2	7,7		
34	<i>Calidris himantopus</i>	8	30,8				

Tabla 4. Número de especies registradas por mes según distribución en el HAC

Distribución	2020			2021						2022			
	Dic	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Residente	6	10	7	13	20	19	14	17	18	18	17	25	20
Emigrante boreal	5	6	1	2	9	13	9	10	11	15	11	12	16
Emigrante austral			1	1	1							1	1
Divagante para la costa central													2
Divagante para el Perú												1	1
Total	11	16	9	16	30	32	23	27	29	33	28	39	40

la llegada de emigrantes boreales, mientras que mayo y julio fueron los meses en que se presentó el menor número de especies de aves debido al retorno de las migratorias neárticas a partir del mes de marzo hacia Norteamérica, y este nicho fue ocupado por las migrantes australes y las altoandinas. Nuestros resultados apoyan la idea de que el HAC es una oferta de espacio importante para albergar especies migratorias, dándoles refugio y descanso como parte del corredor de humedales de la costa central. Las características ecosistémicas del humedal permiten asimismo el asentamiento de colonias permanentes como las de *Phoenicopterus chilensis* y *Plegadis ridgwayi*, las cuales se observaron en todos los momentos de registro (Tabla 3).

Los resultados obtenidos en este estudio permiten establecer una buena línea de base y comparar la avifauna de humedales artificiales y naturales (Castillo-Guerrero *et al.*, 2001). De mantenerse las evaluaciones estacionales en este humedal, se podría obtener información sobre la influencia de las aves migratorias en la composición del humedal (García-Olaechea *et al.*, 2018; Podestá *et al.*, 2017), y usar la estructura y la composición de la comunidad de aves como indicador ambiental (Eiseimann & Avendaño, 2006).

Registro de estadios reproductivos

A lo largo de la investigación se pudieron observar diversos estadios reproductivos: huevos, polluelos y juveniles, de las especies *H. mexicanus*, *C. alexandrinus*, *C. vociferus* y *A. bahamensis*, así como plumaje reproductivo en proceso en *Egretta thula* y *Bubulcus ibis* (Tabla 5) (Figura 3). Ionescu *et al.* (2020) reportaron la reproducción de *Ardea alba*, *Ardea purpurea*, *Ardea cinerea* y *Egretta garzetta* en humedales artificiales de Rumania, afirmando que estos ambientes pueden constituir lugares propicios para la reproducción de aves incluso en áreas de poca extensión, pero con gran riqueza de especies. Lei *et al.* (2021) estudiaron durante tres temporadas reproductivas la viabilidad de 852 nidos de *Recurvirostra avosetta* en las salinas de Nanpu (China), considerada como una de las más grandes del mundo, y registraron un 55 % de pérdidas debidas, según ellos, a las diferencias

Tabla 5. Nidos, juveniles, polluelos y plumajes reproductivos registrados en el Humedal Artificial de Chilca (HAC) según la especie. ZN: zona norte, ZC: zona central, ZS: zona sur, H: humedal, P: playa, D: descampado

Especie	Etapas	Área y hábitat	Fecha	Observaciones
<i>Himantopus mexicanus</i>	Nido (1 huevo)	ZC, H	30-Oct-21	En la zona de descarga, en pequeña isla de vegetación
	Nido (3 huevos)	ZC, H	31-Oct-21	Mismo nido que el 30 de octubre, pusieron 2 huevos más.
	Nido	ZC, H	14-Nov-21	Conducta de ataque extremo al tratar de acercarse al mismo nido. No se pudo verificar el número de huevos.
	Juveniles (2)	ZC, H	30-Nov-21	En la laguna central, padres vigilantes y cerca
	Nido (4 huevos)		30-Nov-21	En montículo de arena elevado. Sin vegetación
<i>Egretta thula</i>	Plumaje reproductivo	ZC, P	24-Jul-21	Individuo solitario
	Plumaje reproductivo	ZC, H	31-Ene-22	Individuo solitario
<i>Bubulcus ibis</i>	Plumaje reproductivo	ZC, H	30-Nov-21	Individuo solitario
	Plumaje reproductivo	ZC, H	20-Ene-22	Individuo solitario
	Plumaje reproductivo	ZC, H	28-Feb-22	Individuo solitario
<i>Charadrius vociferus</i>	Polluelo	ZN, D	30-Nov-21	Corriendo en zona de desmonte norte
	Polluelo	ZS, H	30-Nov-21	Corriendo entre vegetación no inundable del humedal
<i>Anas bahamensis</i>	Polluelos (9)	ZC, H	28-Dic-21	En laguna principal con ambos padres
	Polluelos (4)	ZC, H	19-Feb-22	En laguna principal con ambos padres.
	Polluelos (3)	ZC, H	28-Feb-22	En laguna principal con ambos padres.
	Polluelos (7)	ZC, H	16-Mar-22	En laguna principal con ambos padres.
	Polluelos (2)	ZC, H	16-Mar-22	Ocultos en vegetación no inundable del humedal central, salieron por ataque de perros ferales
	Polluelos (3)	ZC, H	16-Mar-22	En laguna principal con ambos padres
	Polluelos (6)	ZS, H	30-Mar-22	En humedal sur solo con uno de los padres
<i>Charadrius alexandrinus</i>	Juvenil	ZN, D/H	20-Ene-22	En descampado y humedal zona norte
	Juvenil	ZN, D	31-Ene-22	En descampado zona norte



Figura 3. Estadios de reproducción de aves observados en el Humedal Artificial de Chilca (HAC). **a)** Huevos de *Himantopus mexicanus*. **b)** Juvenil de *Charadrius alexandrinus*. **c)** Polluelo de *Charadrius vociferus*. **d)** Polluelos de *Anas bahamensis* con ambos padres

en el sustrato de anidación, la oferta de alimento y la lluvia, factores influyentes para el éxito de los nidos. Antes, en el mismo lugar de estudio, se había registrado la anidación de *Himantopus himantopus*, *Sterna hirundo* y *Sterna albifrons* con bajos porcentajes de éxito en la anidación debido principalmente a causas antropogénicas (Yang *et al.*, 2008; Que *et al.*, 2015). El HAC presenta hábitats con diferentes características que permiten satisfacer la demanda básica de guarida y alimento para la supervivencia de las especies observadas, permitiendo luego el uso de recursos con fines reproductivos en algunas de ellas. Esto debe evaluarse con mayor detalle para determinar el potencial reproductivo de algunas de las especies registradas, sin embargo, la acción depredadora de los perros ferales contra las aves puede dificultar esta tarea.

Especies amenazadas

Según la lista de especies amenazadas incluida en la legislación peruana (DS N° 004-2014 MINAGRI), *Pelecanus thagus* es la única especie que se encuentra categorizada como En Peligro (EN), en tanto que *Phoenicopterus chilensis* se ha categorizado como Casi Amenazada (NT). Las dos especies están en la categoría de Casi Amenazadas según la IUCN (2022). *P. chilensis* se ha registrado en todas las evaluaciones con un número promedio de 65 ejemplares, por lo que puede asumirse que conforma una colonia residente en el HAC.

El HAC no es un ecosistema artificial prediseñado siguiendo los lineamientos de creación de humedales artificiales (por ejemplo, los detallados por Moret, 2014; Reyes & Reyes, 2008; Lara, 1999; Cisterna-Osorio & Pérez, 2019); sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio demuestran que incluso bajo las condiciones en que se formó alberga una riqueza de fauna comparable a otros humedales de la costa central, a pesar de su corta extensión (Tabla 2). Otros estudios han demostrado el impacto positivo de las lagunas de oxidación y los estanques de almacenamiento de aguas tratadas en la reproducción de aves características de humedales, como las familias Podicipedidae, Ardeidae, Rallidae y Charadriidae, aduciendo que ello se debe al incremento en la oferta de hábitats dulceacuícolas, especialmente en zonas donde hay escasez de estos ecosistemas, o en zonas aledañas, donde puedan verse afectadas por contaminación o urbanización

(Castillo-Guerrero *et al.*, 2001). La variedad de vegetación en el HAC también puede condicionar la de la avifauna, ya que incrementa la oferta de nichos ecológicos, de tal manera que podría establecerse una relación directa entre ambas variables (Castillo-Guerrero & Carmona, 2001). Esto destaca la importancia de los cuerpos de agua dulce artificiales cuyo efecto es positivo al constituir sitios valiosos para el desarrollo de aves residentes y el arribo de las migratorias tal como lo indica Castillo (2000).

En el HAC se registró la presencia de *Larus argentatus* (Figura 4) tanto en el hábitat de playa como en humedal, lo que constituye un avistamiento importante considerando que esta especie se limita al hemisferio norte. Anteriormente, en 1983, habían sido observados ejemplares subadultos en la playa de Ventanilla (Callao-Perú) (Krabbe *et al.*, 2001). En el presente estudio se observaron ejemplares juveniles en febrero y marzo de 2022, lo que constituye el segundo registro y el más austral de la especie en el Perú (Montes-Iturrizaga *et al.*, en preparación).

Otro avistamiento destacable corresponde a un individuo de *Calidris pusilla* anillado con el mismo código (octubre del 2021 y enero del 2022) (Figura 5), y un tercer registro de la misma especie en febrero del 2022, pero con código ilegible. Este hallazgo confirma la importancia de este humedal como ecosistema de descanso para las especies migratorias.

Potencial y amenazas en el HAC

El HAC puede considerarse un lugar potencial de oferta de refugio, reproducción y descanso para aves en el sistema de humedales de la costa central, además de su posibilidad de convertirse en un espacio ecoturístico para la observación y fotografía de aves, actividades que pueden traer beneficio directo a la comunidad de Chilca, tal como lo indican Pulcha & Valencia (2019) con respecto a otros humedales artificiales. Asimismo, el HAC puede representar un espacio para la investigación de aves propias de humedales de la costa del Perú, así como de especies migratorias.

Entre las amenazas observadas en este periodo de estudio se destaca la acumulación de desechos en todos los ambientes, situación que se agrava en los meses de verano por el incremento de visitantes a las playas aledañas. La caza y la depredación de los nidos

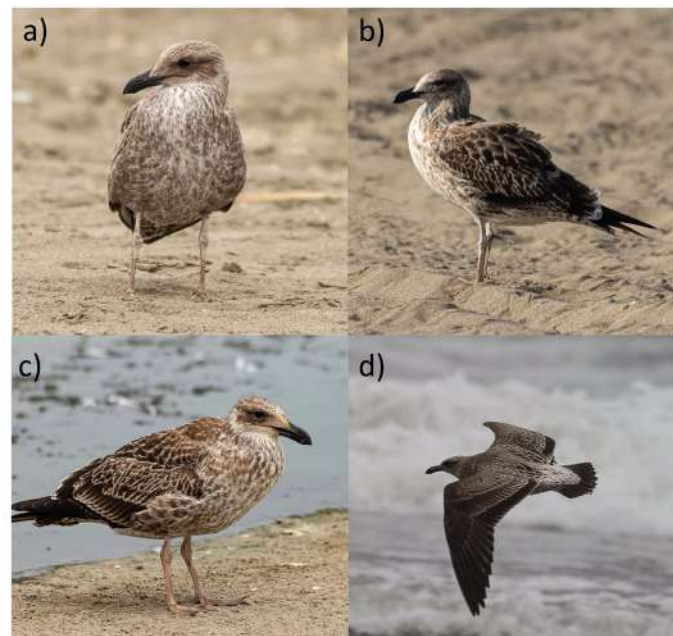


Figura 4. Juveniles de *Larus argentatus* observados en el HAC. En **a)**, **b)** y **c)** se muestran ejemplares posados mostrando la coloración de patas y plumaje característicos y en **d)** un ejemplar en vuelo mostrando las particularidades del plumaje de alas y cola.



Figura 5. Ejemplar de *Calidris pusilla* con etiqueta observado en el HAC

por parte de perros ferales también perturban a las aves. Esto ya había sido mencionado en humedales peruanos como amenaza contra especies de mamíferos, por ejemplo, el cuy silvestre *Cavia tchudii* Fitzinger, 1867 (Quispe-López *et al.*, 2021), por lo que constituye un problema que debe analizarse con mayor detenimiento en los humedales costeros peruanos. La falta de vigilancia y avisos que regulen o prohíban el tránsito de personas y camionetas en las zonas aledañas al humedal propicia que las aves estén sometidas a estrés frecuente y, además, implican un riesgo para los investigadores y visitantes de este humedal artificial.

Conclusiones

Se registran 56 especies de aves, de las cuales el 57 % eran residentes, incluyendo una especie endémica. Durante el estudio, el HAC albergaba 22 especies de aves emigrantes boreales (39 %); se registró, además, una especie emigrante austral, así como la presencia de *Larus argentatus*, considerada divagante para el Perú. Estos resultados sitúan al HAC en el segundo lugar en cuanto a especies de aves por unidad de área en humedales costeros del Perú. La mayoría de las especies de aves registradas comparte los diferentes hábitats del HAC. Las tres zonas descritas no tienen características uniformes de profundidad, vegetación y relieve; el humedal cuenta, además, con los hábitats de playa y mar, lo que genera una mayor oferta de espacios para las diversas especies. El número de especies de aves se incrementó en los meses de verano, lo que se asoció con la llegada de especies migratorias y confirma que el HAC constituye una oferta de espacio importante para albergar especies migratorias dándoles refugio y descanso como parte del corredor de humedales de la costa central, a pesar de ser un hábitat de reducida extensión y de formación “artificial”. El presente estudio constituye una línea de base en cuanto a la caracterización ecológica y de avifauna del HAC. El control de las autoridades para eliminar la acumulación de desechos y otras actividades negativas que tienen impacto sobre las aves es necesario.

Material suplementario

Ver el material suplementario en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1883/3379>

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a Frank Manrique, por invitarnos a conocer y descubrir este nuevo humedal cuando trabajaba en el área de Turismo de la Municipalidad de Chilca, así como por su ayuda durante gran parte del estudio. A Mire Tomatis y familia por su gran interés y gestiones en pro de la investigación y conservación del HAC. Al Serenazgo y Policía del distrito de Chilca por la frecuente vigilancia durante los horarios de ejecución del estudio.

Contribución de los autores

D.M-I: conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, supervisión, preparación del borrador original, redacción, revisión y edición del manuscrito. H.A.: análisis formal, investigación, metodología, preparación del borrador original, revisión y edición del manuscrito. S.V.-R.: análisis formal, investigación, metodología, preparación del borrador original, revisión y edición del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Acuy, M., Pulido, V.** (2008). *Perú: Informe Anual. Censo Neotropical de Aves Acuáticas 2007* [en línea]. En Unterkofler D.A. y D.E. Blanco (eds.): *El Censo Neotropical de Aves Acuáticas 2007; Una herramienta para la conservación*. Wetlands International. <http://lac.wetlands.org/>
- Angulo-Pratolongo, F., Schulenberg, T., Puse-Fernández, E.** (2010). Las aves de los humedales de Eten, Lambayeque, Perú. *Ecología Aplicada*, 9(2), 71-81. <https://doi.org/10.21704/rea.v9i1-2.397>
- Apeño, A., Aponte, H.** (2022). Caracterización de la diversidad de aves en un humedal altamente intervenido del Pacífico suramericano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(179), 380-392. <https://doi.org/10.18257/racefyn.1605>
- Aponte, H., Corvacho, M.F., Lertora, G., Ramírez, D.W.** (2021). Reserva de carbono en un humedal del desierto costero de Sudamérica. *Gayana Botánica*, 78(2), 184-190. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432021000200184>
- Aponte, H.** (2017). *Humedales de la costa central del Perú. Un diagnóstico de los humedales Santa Rosa, laguna El Paraíso y albufera de Medio Mundo*. CooperAcción. https://www.academia.edu/35242909/Humedales_de_la_Costa_central_del_Per%C3%BA_Un_diagn%C3%B3stico_de_los_humedales_de_Santa_Rosa_laguna_El_Para%C3%ADso_y_Albufera_de_Medio_Mundo
- Birdlife International.** (2000). *Threatened birds of the world*. Cambridge: Lynx Editions. 852 p. Barcelona. <https://www.lynxeds.com/es/producto/threatened-birds-of-the-world/>
- Castillo, J.A.** (2000). Composición temporal de aves acuáticas en el estanque de almacenamiento de aguas tratadas del ejido El Centenario, Baja California Sur, México. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California Sur. <https://biblio.uabcs.mx/tesis/tesis/te1142.pdf>
- Castillo-Guerrero, J.A., Carmona, R.** (2001). Distribución de aves acuáticas y rapaces en un embalse dulceacuícola artificial de Baja California Sur, México. *Biología Tropical*, 49(3-4), 1131-1142. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972002000100011&lng=es&nrm=iso
- Castillo-Guerrero, J., Zamora-Orozco, E., Carmona, R.** (2001). Aves acuáticas anidantes en dos cuerpos dulceacuícolas artificiales, adyacentes a la ciudad de La Paz, B.C.S. *México Hidrobiológica*, 12(1), 85-87. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972002000100011&lng=es
- Cisterna-Osorio, P., Pérez, L.** (2019). Propuesta de humedales artificiales, impulsores de biodiversidad, que depuran aguas contaminadas para la recuperación de lagunas urbanas de Concepción. *Revista Hábitat Sustentable*, 9(1), 20-31. <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2019.09.01.02>
- Costanza, R., D'Arge, R., Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., van del Belt, M.** (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>

- Cruz Z, Angulo F, Burger H, Borgesa R.** (2007). Evaluación de aves en la laguna El Paraíso, Lima, Perú. *Rev. Peru. biol.* 14(1), 139-144. <https://doi.org/10.15381/rpb.v14i1.2179>
- Eisermann, K., Avendaño, C.** (2006). *Evaluation of water birds populations and their conservation in Guatemala. Final Report.* Sociedad Guatemalteca de Ornitología. <https://www.researchgate.net/publication/263162660>
- García-Olaechea, A., Chávez-Villavicencio, C., Tabilo-Valdivieso, E.** (2018). ¿Influyen las aves migratorias neárticas en el patrón estacional de aves de los humedales costeros? *Revista Peruana de Biología*, 25(2), 117-122. <https://doi.org/10.15381/rpb.v25i2.13281>
- Gobierno Regional de Lima.** (2015). *Plan Maestro del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo 2015-2019.* Gobierno Regional de Lima. <http://siar.regionlima.gob.pe/documentos/plan-maestro-area-conservacion-regional-albufera-medio-mundo>
- González, O., Pulido V.** (2011). *Perú: Informe Anual. Censo Neotropical de Aves Acuáticas 2010.* En Unterkofler D.A. y D.E. Blanco (eds.): *El Censo Neotropical de Aves Acuáticas 2010.* Wetlands International.
- Green, A.J.** (1996). Analyses of globally threatened Anatidae in relation to threats, distribution, migration patterns and habitat use. *Conservation Biology*, 10(5), 1435-1445. <http://www.jstor.org/stable/2386918>
- Ionescu D, Hodor C, Petritan C.** (2020). Artificial Wetlands as Breeding Habitats for Colonial Waterbirds within Central Romania. *Diversity*, 12, 371. <https://doi.org/10.3390/d12100371>
- IUCN.** (2022). *The IUCN Red List of Threatened Species.* Version 2021-3. <https://www.iucnredlist.org>
- Koepcke, M.** (1954). *Corte ecológico transversal en los Andes del Perú Central con especial consideración de las Aves. Parte 1: Costa, Vertientes Occidentales y Región Altoandina.* Memorias del Museo de Historia Natural Javier Prado. <https://museohn.unmsm.edu.pe/memorias.html>
- Krabbe, N., James, S., Walker, B.** (2001). An observation of Herring Gull *Larus argentatus* on the Peruvian coast. *Cotinga*, 15, 66.
- Lara, J.** (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Tesis, Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. <https://agua.org.mx/biblioteca/depuracion-de-aguas-residuales-municipales-con-humedales-artificiales/>
- Lei, W., Wu, Y., Wu, F., Piersma, T., Zhang, Z., Masero, J.A.** (2021). Artificial Wetlands as Breeding Habitats for Shorebirds: A Case Study on Pied Avocets in China's Largest Saltpan Complex. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 622756. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.622756>
- MINAGRI,** (2014). Actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas, Ministerio de Agricultura y Riego. DS N° 004-2014-. El Peruano Normas Legales: 520497-520504.
- MINAM.** (2015). *Guía de inventario de la fauna silvestre.* Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural.
- Moret, I.** (2014). Optimización de lagunas de estabilización mediante el uso de macrofitas. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Perú. <https://hdl.handle.net/11042/1753>
- Moschella, P.** (2012). Variación y protección de humedales costeros frente a procesos de urbanización: Casos Ventanilla y Puerto Viejo. Tesis, Magistra en Desarrollo Ambiental. Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/4527>
- Pérez, A., Escobedo, R., Castro, R., Jesús, R., Cardich, J., Romero, P.E., Salas-Gismondi, R., Ochoa, D., Aponte, H., Sanders, C.J., Carré, M.** (2022). Carbon and nutrient burial within Peruvian coastal marsh driven by anthropogenic activities. *Marine Pollution Bulletin*, 181, 113948. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113948>
- Pérez-Granados, C., Serrano-Davies, E., García-Lozano, M., Ponce, C.** (2015). *El humedal artificial de Meco: su importancia durante el periodo primaveral.* En: Juan M, Pérez-Granados C, De la Puente J. (Editores) Anuario Ornitológico de Madrid 2011-2014. SEO-Monticola. https://www.researchgate.net/profile/Cristian-Perez-Granados/publication/322041452_
- Plenge, M.A.** (2022). List of the birds of Peru / Lista de las aves del Perú. Unión de Ornitólogos del Perú. <https://sites.google.com/site/boletinunop/checklist>
- Pisconte, J., Anchante, J., Aparcana, M., Chipana, J., Ramos, L.** (2020). Variación de la abundancia y diversidad de las aves migratorias en el humedal de Caucato, Pisco Perú. ÑAWPARISUN. *Revista de Investigación Científica*, 3(1), 103-110. <https://doi.org/10.47190/nric.v3i1.132>

- Podestá, J., Cotillo, A.** (2016). Avifauna del Área de Conservación Municipal Humedal poza La Arenilla (Callao, Perú): Actualización y categorías de conservación. *Científica* 13(1), 38-57. <https://revistas.cientifica.edu.pe/index.php/cientifica/issue/view/37>
- Podestá, J., Cotillo, A., Segura-Cobeña, E., Cabanillas, G.** (2017). Temporal variation in richness and abundance of wading shorebirds in Arenilla coastal wetland - La Punta, Callao. *The Biologist*, 15(1), 23-35. <https://doi.org/10.24039/rb2017151136>
- Podestá, J., Gil, F., Liviac-Espinoza, R., Barona, D., Balarezo-Díaz, A., Zárate, R.** (2021). Aves de los humedales de la región Callao: Actualización y estados de conservación. *The Biologist*, 19(2), 155-173. <https://doi.org/10.24039/rb20211921048>
- Pulcha, J., Valencia, M.** (2019). Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas de residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales. (Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas). Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/14458>
- Pulido, V., Bermúdez, L.** (2018). Patrones de estacionalidad de las especies de aves residentes y migratorias de los Pantanos de Villa, Lima, Perú. *Arnaldoa*, 25(3), 1107-1128. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.253.25318>
- Que, P., Chang, Y., Eberhart-Phillips, L., Liu, Y., Székely, T., Zhang, Z.** (2015). Low nest survival of a breeding shorebird in Bohai Bay. *China. Journal Ornithology*, 156, 297-307. <https://doi.org/10.1007/s10336-014-1126-9>
- Quispe-López, M., Barreda, S., Marcelo-Carranza, D., Pacheco, V., Aponte, H., Ramírez, D.** (2021). Relative abundance and habitat selection of the montane guinea pig *Cavia tschudii* in a wetland at coastal desert with comments on its predators. *THERYA*, 12(3), 423-433. <https://doi.org/10.12933/therya-21-1096> ISSN 2007-3364
- RAS.** (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Ministerio de Desarrollo Económico. Título E. Tratamiento de aguas residuales.* Dirección General de Agua Potable y Saneamiento Básico. República de Colombia. https://www.academia.edu/38158569/Aspectos_generales_de_los_sistemas_de_agua_potable_y_saneamiento_basico
- RAMSAR.** (2004). *The Ramsar Convention Manual: a guide to the Convention on wetlands (Ramsar, Iran, 1971).* 3rd ed. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat. https://moe.gov.lb/ProtectedAreas/pdf/ramsar_convention.pdf
- Reyes, J.E., Reyes, J.L.** (2008). Depuración de aguas residuales, usando humedales artificiales subsuperficiales en el Distrito de Chao. Tesis para obtener el Título de Ingeniero Agrícola. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Trujillo. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9872>
- Rivera, G., Gonzáles, S., Aponte, H.** (2021). Wetlands of the South American Pacific coast: A bibliometric analysis. *Wetlands Ecology and Management*, 30, 869-877. <https://doi.org/10.1007/s11273-021-09830-8>
- Sanabria, A.** (2006). Humedar I: Alternativa innovadora de bajo costo para depurar aguas residuales en países en vía de desarrollo. *Revista ambiental agua, aire y suelo. Universidad de Pamplona*, 1, 84-91. https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/revista_ambiental/06082010/rev_ambiental_voll_num1_art9.pdf
- Schulenberg, T., Stotz, D., Lane, D., O'Neill, J., Parker III, T.** (2010). *Aves de Perú.* Centro de Ornitología y Biodiversidad (CORBIDI), Lima, Perú, Serie Biodiversidad Corbidi.
- SERNANP.** (2010). *Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. 2010. Guía oficial de Áreas Naturales Protegidas del Perú.* CIMAGRAF <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/06/ANP240516.pdf>
- Sierra, O., López, G.** (2013). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. *Kuxulkab'*, 19(36), 47-55. <https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/337/260>
- Terreros, C.** (2017). Adaptación de lagunas de oxidación como humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la sabana de Bogotá. Viabilidad técnica. (Proyecto de Grado en la modalidad de Monografía para optar el título de Tecnólogo en Construcciones Civiles). Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad Tecnológica. Tecnología en Construcciones Civiles. Bogotá. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/6852/TerrerosFollecoCarlosJavier2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas-Fonseca, E.** (2010). Caracterización de la avifauna y su relación con las variables físicas del Humedal Laguna Pochotal, Puntarenas, Costa Rica. Tesis de Licenciatura en Biología

-
- con énfasis en Recursos Naturales. Universidad Nacional de Costa Rica. https://www.researchgate.net/publication/325668174_Caracterizacion_de_la_avifauna_y_su_relacion_con_las_variables_fisicas_del_Humedal_Laguna_Pochotal_Puntarenas_Costa_Rica
- Velarde, D.** (1998). *Resultados de los Censos Neotropicales de Aves Acuáticas en el Perú 1992-1995*. Lima. Perú. Programa de Conservación y Desarrollo Sostenido de Humedales. Perú.
- Yang, H.Y., Chen, B., Zhang, Z.W.** (2008). Seasonal changes in numbers and species composition of migratory shorebirds in northern Bohai Bay, China. *Wader Study Group Bulletin*, 115(3), 133-139. <https://www.waderstudygroup.org/article/2925/>
- Ywanaga-Reh, N.G., González-Campos, C.A., Gutiérrez-Ramos, J.N., Rodríguez-Rodríguez, E.F.** (2021). Nuevo registro de humedal y la presencia estival de *Phoenicopterus chilensis* Molina, 1782, en la playa Sur de Salaverry, Provincia De Trujillo – Perú. *Sagasteguiana*, 9(2), 95-120. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/REVSAGAS/article/view/4415>

Chemical Sciences

Original article

Rainwater chemistry of a developing urban-industrial metropolis in Southeast Nigeria

Química del agua de lluvia de una metrópoli urbano-industrial en desarrollo en el sureste de Nigeria

 Azubuike S. Ekwere

Department of Geology, University of Calabar, Calabar, Nigeria

Abstract

Rainwater (RW) over the Calabar metropolis was analyzed to establish its chemistry, influences, and agricultural suitability. Sampling was done in the rainy and dry seasonal cycles for three years (2018–2020). pH, electrical conductivity (EC), and major ions (Ca^{2+} , Na^{+} , Mg^{2+} , K^{+} , HCO_3^{-} , Cl^{-} , and SO_4^{2-}) were registered and the principal component analysis (PCA) and ionic ratios were used to establish relationships between ionic species and project their sources. RW suitability for agriculture was determined by calculating the sodium and magnesium absorption ratios. Results indicated a relative abundance trend of cations towards $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+}$ while $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-}$ was the trend for anions. pH varied from 6.1 to 7.8 (mean = 6.60). This and the EC reflected influences from atmospheric gases and in-cloud dissolved solids. The volume-weighted mean (VWM) of ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , and Cl^{-}) was 246 eq/l in the rainy season and 198 eq/l in the dry season indicating low-moderate atmospheric pollution. Wet deposition (WD) fluxes for total ionic contents in RW were higher in the rainy season indicating the impact of rainfall. The PCA and the ionic ratios showed that the ionic concentrations were of crustal and marine origins predominantly. RW chemical characteristics in the study area compared with the concentration ranges of other local and global locations with similar geologic settings and low to moderate pollution indices showed close similarity. The RW assessment for agricultural use based on sodium and magnesium absorption ratios indicated good levels of suitability.

Keywords: Rainwater; Chemical composition; Ionic ratios; Agriculture; Calabar; Nigeria.

Resumen

Se analizó el agua de lluvia en la metrópoli de Calabar para establecer sus características químicas y sus influencias e idoneidad para la agricultura. El muestreo se realizó durante los ciclos estacionales secos y de lluvias a lo largo de tres años (2018-2021). Se hicieron mediciones del pH, la conductividad eléctrica y los iones mayoritarios: Ca^{2+} , Na^{+} , Mg^{2+} , K^{+} , HCO_3^{-} , Cl^{-} y SO_4^{2-} . Se hizo un análisis de componentes principales y de proporciones iónicas para establecer las relaciones entre las especies iónicas y proyectar sus fuentes. La idoneidad del agua de lluvia para uso agrícola también se determinó mediante el cálculo de la proporción de absorción del sodio y el magnesio. Los resultados indicaron una tendencia de abundancia relativa de cationes de $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Na}$, en tanto que $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ fue la tendencia de los aniones. El pH varió de 6,1 a 7,8 (con una media de 6,60), lo que conjuntamente con la conductividad eléctrica refleja las influencias de los gases atmosféricos y los sólidos disueltos en las nubes. La media ponderada por volumen de las especies iónicas fue de 246 eq/l para la estación húmeda y de 198 eq/l para la estación seca, lo que indica una contaminación atmosférica de baja a moderada. Los flujos de deposición húmeda para los contenidos iónicos totales en el agua de lluvia fueron más altos en la estación húmeda, lo que indica el impacto de la lluvia. El análisis de componentes principales y las proporciones iónicas evidenciaron que las concentraciones iónicas eran predominantemente de origen marino y de la corteza. Las características químicas del agua de lluvia en el área de estudio comparadas

Citation: Ekwere AS. Rainwater chemistry of a developing urban-industrial metropolis in Southeast Nigeria. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 47(183):371-384, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/racecfyn.1796>

Editor: Luis Fernando Echeverri

Corresponding autor:

Azubuike S. Ekwere;
zerratta77@yahoo.com

Received: October 19, 2022

Accepted: April 20, 2023

Published on line: May 8, 2023



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

con los intervalos de las concentraciones de otras ubicaciones con entornos geológicos similares e índices de contaminación de bajos a moderados fueron muy similares. La evaluación del agua de lluvia para uso agrícola basada en las proporciones de absorción de sodio y magnesio evidenció buenos niveles de idoneidad.

Palabras clave: Agua de lluvia; Composición química; Proporciones iónicas; Agricultura; Calabar; Nigeria.

Introduction

Rainfall is typically a slightly acidic, dilute solution, which generally contains a few parts per million dissolved solids, except where affected by air pollutants (**Berner & Berner**, 1996). **Langmuir** (1997) defines rainfall over continents as containing important amounts of Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , H^+ , SO_4^{2-} , and NO_3^- with Ca^{2+} usually exceeding Na^+ . Trace elements in rain are associated with particulates from the wash-out of windblown dust or aerosols, some volatile enough to exist as vapor in the atmosphere (**Langmuir**, 1997). However, the effects of tropospheric aerosols on climate are not quantitatively understood because of the limited information on their chemical composition, physical and optical properties, and geographical distribution (**Arimoto et al.**, 2004).

The composition of rainwater depends on the particulate or gaseous atmospheric constituents emitted by natural or anthropogenic sources locally or transported from distant sources (**Rao et al.**, 2016; **Majumdar & Adhikaryb**, 2022; **Li et al.**, 2022; **Ma et al.**, 2023). Consequently, the composition of rainfall can be both spatially and temporally variable across different environmental settings.

Rainfall has been shown to be a major scavenger for particulates and dissolved gaseous pollutants in the atmosphere. Its acidity, alkalinity, and ionic concentrations depend on the intensity of the constituent sources and their physical and chemical transformation and incorporation into the rainfall during cloud formation processes (**Rao et al.**, 2016; **Herrera et al.**, 2009). Rainfall composition is also the reflection of a series of processes within and below the cloud cover. The chemistry of rainfall is a major environmental concern, especially regarding acid deposition, eutrophication, trace metal deposition, health issues, and biogeochemical cycling (**Huang et al.**, 2010). According to **Casartelli et al.** (2008), the chemistry of rainfall is important in developing countries because it is an efficient mechanism of removing pollutants from the air.

The chemical composition of rainfall invariably gives an insight into the atmospheric quality in a specific region, which depends on the emission sources, the atmospheric chemistry, and the meteorological conditions (**Zunckel et al.**, 2003).

Long-term and frequent observation of rainwater chemistry provides an opportunity to explore the evolution of air pollutant emissions and the effectiveness of emission control measures (**Li et al.**, 2022; **Majumdar & Adhikaryb**, 2022; **Mazurkiewicz et al.**, 2022).

The study of the chemistry of rainfall and other forms of precipitation has been of great interest in recent times; it has focused on a better understanding of the environmental quality and the attendant effects of the resulting rainfall on the regional climate, the soil, the vegetation, and other natural cycles and systems, as evidenced by authors such as **Goncalves et al.** (2000), **Mouli et al.** (2005), **Rocha et al.** (2010), **Honorio** (2010), **Niu et al.** (2014), **Vet et al.** (2014), **Raimundo et al.** (2015), **Rao et al.** (2016), **Keresztesi et al.** (2019), **Keresztesi et al.** (2020), **Huang et al.** (2022), **Misawal et al.** (2022), and **Mazurkiewicz et al.** (2022).

The present study is part of a baseline research project on rainfall characteristics and the dynamics controlling its chemistry in the developing urban settlement of Calabar Metropolis, Nigeria. The study answers to recent somewhat visible increases in particulate matter content in rainwater over the area. There has also been a noticeable defacement in the aesthetics of public and private buildings and the infrastructure within the study area. These effects are assumed to be related to the rainfall regimes and chemical composition variations in recent times. Besides, it has been shown that RW recharge has a major

influence on the contamination vulnerability of groundwater in the region (**Ekwere & Edet, 2015**). In this context, estimating rainfall composition, verifying possible sources of nutrients in wet precipitation, and projecting the possible effects of rain composition on the ecosystem are among the main objectives of the research project.

Materials and methods

Study area

Calabar Metropolis is located $4^{\circ} 15' -5^{\circ} 1'5$ North and $8^{\circ} 15' -8^{\circ} 25'$ East (**Figure 1**). It is a rapidly expanding modern city with increasing urbanization and industrialization within and around the city's environs over the last 30 years. Some of the major industries include limestone and cement processing and production facilities; wrought-iron smelting and processing factories; petroleum products and gas storage, and tank farms. More pollution is also expected with the increasing vehicular traffic and exhaust fume emissions within the city and adjoining suburbs.

Calabar is situated on the fringe of tropical rainforest vegetation of West Africa, which extends from the Oban hills into the Cameroon volcanic highlands and is bound to the south by the Atlantic Ocean.

The area is built on the Niger Delta basin Tertiary and Quaternary sediments (**Short & Stauble, 1967**) that consist of alternating sequences of gravel, sand, silt, clay, and alluvium. These sediments are primarily derived from the adjoining Precambrian basement (Oban Massif) complex and Cretaceous (Calabar Flank) rocks (**Ekwere et al., 2021; Ekwere & Elueze, 2012**). The basement complex is made up of gneisses, granites, schists, pegmatites, and a host of ultra-mafic suites (**Ekwere et al., 2012**) while the Cretaceous sedimentary unit is built up of limestone, sandstones, shales, and marls (**Reijers, 1996**). The soils and sediments on which the study area is domiciled represent a link between the fresh bedrock, the weathered profiles, and the soils that envelope the landscape of the lower Niger Delta basin. The soils are of the ultisol class characteristic of old landscape settings, i.e., lateritic (**Ekwere et al., 2021**).



Figure 1. Map of the Study area, Calabar, metropolis: insert is map of Nigeria showing Calabar (adapted and modified from map data 2023).

The area receives an annual average rainfall of 2,300 mm within two distinct seasons: rainy and dry and is generally hot and humid all year round with mean annual temperatures and relative humidity of 26.8° C and 84.6%, respectively. The topographic variations extend from less than 10 m in the south to about 80 m in the north with highly and deeply weathered well-drained soil cover.

Sample collection

Rainwater (RW) samples were collected using precipitation samplers as modeled and adapted from **Raimundo et al.** (2015). This involved the use of 2-liter polyethylene bottles with a funnel of 120 mm in diameter to collect direct precipitation. Sixteen (16) plastic bottles were mounted on a mobile platform in an area devoid of any interfering substances that could contaminate the rainwater within the premises of the University of Calabar. Samples were collected from 2018 to 2020 during rainfall events within the period. Monthly rainfall was consolidated into composite samples (**Table 1**). The sample bottles were thoroughly rinsed with a few drops of antiseptic (chloroxylenol) to prevent the growth of microorganisms. The bottles were then rinsed several times with de-ionized water prior to use and wrapped in aluminium foil to prevent sunlight according to **Raimundo et al.** (2015). Complimentary rainfall data was also collected from the Nigerian Meteorological Agency (NIMET) station in Calabar, Cross River State.

The characteristic tropical climate that prevails during the rainy and dry seasons is controlled by the movement of the Inter Tropical Discontinuity (ITD), a zone separating the warm, humid maritime tropical air mass from the dry continental tropical air mass. The rainy season spans for about six months (May to October) and the dry season lasts from November to April. Temperatures are high with negligible diurnal and annual variations.

Analytical and interpretational techniques

The pH and conductivity values of rainwater were measured immediately after every collection using a standard water quality probe (PHT-027 multi-parameter probe). The water samples were filtered with a 0.45 µm filter paper. Selected nutrients, which included Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, and SO₄²⁻, were analyzed.

Na⁺ and K⁺ were determined using flame photometry, Mg²⁺ and Ca²⁺ by the titrimetric method using EDTA titration, SO₄²⁻ by the turbidimetric method, HCO₃⁻ by the titrimetric method, and chloride by the Brucine colorimetric method as in **Ademoroti** (1996) using a UNICAM UV2 spectrophotometer with a wavelength accuracy of ±1 nm and a transmittance accuracy of ±0.5% T.

The quality of the analytical data was tested by calculating the charge balances in the rainwater composition and the distribution of species. The charge balance is expressed as:

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

For all cases, there was a calculated negative charge ranging from -3.063x10⁻³ to -7.546x10⁻⁵ with a percentage error of 100* (Cation - [Anion]) / Cation (Cation + [Anion]) ranging from -18.76 to 12.41.

Table 1. Monthly rainfall across the study period (values in mm)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2018	27.1	25.5	222.9	248.1	328.3	387.3	343.3	522.9	293.5	341.0	148.3	85.1
2019	7.1	48.2	262.9	184.9	216.8	272.9	115.0	241.5	265.3	176.5	104.8	0.00
2020	30.5	35.4	107.8	316.2	246.3	314.6	390.2	539.3	380.2	299.5	56.4	0.00
Annual mean	21.57	36.37	197.87	249.73	263.80	324.93	282.83	434.57	313.00	272.33	103.17	28.37

The selected nutrients were chosen as their presence and interrelationships define the basic nature and origin of water chemistry and possible controlling influences (Keresztesi *et al.*, 2019; Keresztesi *et al.*, 2020; Ekwere & Edet, 2021; Majumdar & Adhikaryb, 2022).

The volume-weighted mean and the wet deposition fluxes were calculated to estimate intrinsic rainwater characteristics using the following formula.

Volume Weighted Mean (VWM) of rainwater ionic constituents:

$VWM (\mu\text{eq/l}) = \sum_{i=1}^N C_i P_i / \sum_{i=1}^N P_i$ where C_i is the ionic concentration of individual components ($\mu\text{eq/l}$) and P_i and N are the rain amounts for each rainy event (in mm) and the total number of rainfall events (Akpo *et al.*, 2015).

Wet Depositional (WD) fluxes were calculated as:

$WD (\text{kg/ha/yr}) = VWM (\text{mg/l})$ multiplied by $RF/100$ with seasonal rainfall (RF) expressed in mm.

Analytical data were also statistically analyzed and the average constituent concentrations in RW were compared to established standards and concentrations from other parts of the world. Principal component analysis (PCA) and ionic ratios were used to assess interrelationships between ions and their concentrations and to determine factors controlling ion concentration data variability and sourcing. RW suitability for agricultural use in irrigation was also assessed.

Results and discussion

Rainfall in the rainy seasons during the study period (defined here as a monthly volume not less than 200 mm according to Raimundo *et al.*, 2015) had an average total quantity of 2,964 mm within the study period with a minimum of 249.7 mm (April) and a maximum of 434.7 mm (August).

In the dry seasons, the total average volume was 387.3 mm with a minimum of 28.3 mm (December) and a maximum of 197.9 mm (March). It is obvious then that about 92% of the total annual precipitation during the study period fell within the rainy season, well within the range of 90-95% reported by the Nigerian Meteorological Agency (NIMET) for the region.

pH and electrical conductivity

The measurements showed that the pH ranged from 6.1 to 7.8 across seasons during the study period. The mean pH values for dry and rainy seasons within each year of monitoring (2018-2020) did not show any significant differences (Tables 2, 3, 4). The mean pH value

Table 2. Results of measured parameters in rainwater in 2018 (units are in mg/l)

Month	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁺	pH	EC(μs/cm)
JAN	2.25	0.75	1.76	0.36	0.25	0.85	6.7	48.3
FEB	1.85	0.63	2.24	0.52	0.42	0.74	6.6	37.5
MAR	0.95	0.82	1.85	0.55	0.55	0.55	6.1	45.8
APR	1.15	0.09	2.04	0.23	0.36	0.84	6.5	40.7
MAY	0.87	1.14	1.05	0.63	0.24	0.62	6.4	42.8
JUN	1.68	0.86	1.55	0.77	0.75	0.77	6.7	56.0
JUL	0.95	0.75	2.08	0.15	0.64	0.56	7.3	38.5
AUG	1.28	0.92	2.26	0.75	0.56	0.85	6.8	66.7
SEP	1.06	1.05	1.85	0.66	0.72	0.72	6.2	38.5
OCT	2.18	0.75	2.46	0.32	0.45	0.82	6.7	47.5
NOV	1.97	0.88	1.87	0.42	0.19	0.73	6.5	56.8
DEC	0.75	1.18	1.56	0.47	0.53	0.66	6.2	64.6
Dry mean	1.66	0.84	1.96	0.44	0.40	0.73	6.47	50.08
Rainy mean	1.24	0.81	1.83	0.52	0.52	0.73	6.62	47.61

Table 3. Results of measured parameters in rainwater in 2019 (units are in mg/l)

Month	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁺	pH	EC(μs/cm)
JAN	1.68	0.62	1.08	0.42	0.54	0.78	6.8	37.4
FEB	0.67	0.54	1.02	0.74	0.66	0.78	6.5	48.6
MAR	0.64	0.74	2.02	0.53	0.71	0.74	6.8	52.5
APR	2.04	0.65	1.16	0.28	0.36	0.81	6.4	70.4
MAY	0.85	0.56	1.25	0.75	0.54	1.03	6.8	45.6
JUN	1.23	1.05	2.14	0.82	0.66	0.72	7.8	37.2
JUL	1.05	1.26	1.75	0.41	0.18	0.80	6.6	74.5
AUG	0.77	0.78	1.06	0.70	0.55	0.60	6.7	45.5
SEP	2.36	1.14	1.08	1.03	0.28	0.35	6.6	63.0
OCT	1.14	0.62	1.35	0.68	0.34	0.78	6.5	54.7
NOV	1.08	0.74	1.56	0.52	0.25	0.84	6.7	62.0
DEC	0.82	1.12	2.01	0.58	0.37	0.65	6.6	52.4
Dry mean	1.01	0.73	1.51	0.58	0.48	0.76	6.65	51.27
Rainy mean	1.38	0.91	1.41	0.67	0.43	0.72	6.82	56.03

Table 4. Results of measured parameters in rainwater in 2019 (units are in mg/l)

Month	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁺	pH	EC(μs/cm)
JAN	1.88	0.52	2.14	0.48	0.46	0.64	6.5	47.8
FEB	0.85	0.76	2.05	0.45	0.55	0.58	6.4	51.2
MAR	1.77	0.98	2.17	0.48	0.24	0.64	6.5	60.8
APR	0.55	0.88	1.87	0.57	0.51	0.69	6.7	56.6
MAY	1.18	1.08	2.10	0.76	0.86	0.66	6.8	47.2
JUN	0.95	0.75	2.08	0.15	0.64	0.76	7.6	44.5
JUL	1.28	0.86	1.76	0.58	0.56	1.05	6.6	66.8
AUG	1.24	0.98	1.85	0.46	0.84	0.92	6.2	48.5
SEP	2.38	0.77	2.46	0.32	0.56	0.84	6.6	37.5
OCT	0.92	1.04	2.11	0.58	0.42	0.65	6.6	52.4
NOV	1.09	0.62	1.15	0.78	0.44	0.78	6.7	64.2
DEC	0.87	1.12	1.34	0.53	0.64	0.76	6.4	60.6
Dry mean	1.23	0.84	1.83	0.55	0.46	0.68	6.52	56.17
Rainy mean	1.26	0.89	2.02	0.47	0.66	0.82	6.75	50.18

during the wet seasons was 6.66 ± 0.42 and 6.60 ± 0.07 during the dry seasons indicating a slight decrease in acidity from the dry to the rainy seasons. Rainfall within the study area was generally within the acceptable pH limits of 6.5–8.5 for potable water (WHO, 2008). Under clean atmospheric conditions, RW is expected to have a pH of ~5.6 due to the dissolution of CO₂ in rain droplets (Rao *et al.*, 2016). Values below this indicate acid rain (Oliveira *et al.*, 2012), therefore, RW in the study area showed no acidity threats. Alkaline species concentrations in the atmosphere may result in RW acidity neutralization and a somewhat basic nature (Chughtai *et al.*, 2014).

Rainwater conductivity was measured with a multi-parameter water probe (model PHT-027). Conductivity values ranged from 74.5 to 37.2 μs/cm across seasons during the

study period with a mean value of 51.48 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for the rainy seasons and of 50.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for the dry ones, i.e., very similar to those reported by **Abeng & Idim** (2019). Conductivity is generally an indicator of total dissolved solids in precipitation (**Gioda et al.**, 2013).

Mean conductivity values were higher during 2018 and 2020 dry seasons than during the rainy seasons but lower in 2019. However, there were no marked significant differences in the range of values across seasons during the study period. This may reflect the combined effects of the variations in the atmospheric quality during the dry seasons and a greater scavenging of particulates and aerosols during the rainy seasons due to more rainfall. The variations within seasons may also reflect differences in air mass transport over the coastal area. During dry seasons, winds generally blow from the northeast trans-Sahara belt across the dominantly agrarian landmass of north and central Nigeria and are laden with dust particles. The air masses in the rainy seasons are trans-Atlantic south-east winds blowing across the dominantly industrial coastal states with reported high pollution levels. Similar high conductivity RW has been reported in areas with high levels of pollution (**Kaskaoutis et al.**, 2014; **Tiwari et al.**, 2015).

Rainwater nutrients

The parameter averages measured during monthly rainfall events and the mean values across seasons for the three-year monitoring period are presented in **tables 2, 3, and 4**. The means of the parameters measured across seasons for individual years within the monitoring period indicated a general increase in ionic species during the rainy seasons. Higher K^+ , Mg^{2+} , and Ca^{2+} values during the dry season were recorded only in 2018, which confirms the scavenging of particulates and aerosols during the rainy seasons. Across seasons during the study period, the relative abundance of cationic and anionic contents in rainwater showed $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ and $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ trends, respectively. **Figure 2** shows the percentage distribution of inorganic chemical species in rainwater during the study period, and **figure 3** the statistical distribution of chemical species data variation trends.

The total ionic species VWM was 246 $\mu\text{eq}/\text{l}$ in the rainy season and 198 $\mu\text{eq}/\text{l}$ in the dry season. These values indicate low to moderate atmospheric pollution over the metropolis.

The total WD fluxes of total ions were 72.91 $\text{kg}/\text{ha}/\text{yr}$ during the rainy seasons and 6.7 $\text{kg}/\text{ha}/\text{yr}$ during the dry seasons. The WD in the rainy seasons was greater than that in the dry season by a factor of 10.8 showing the impact of rainfall on deposition over the study area. WD values in the study area were within the reported ranges in India (**Rao et al.**, 2016) during similar seasonal regimes.

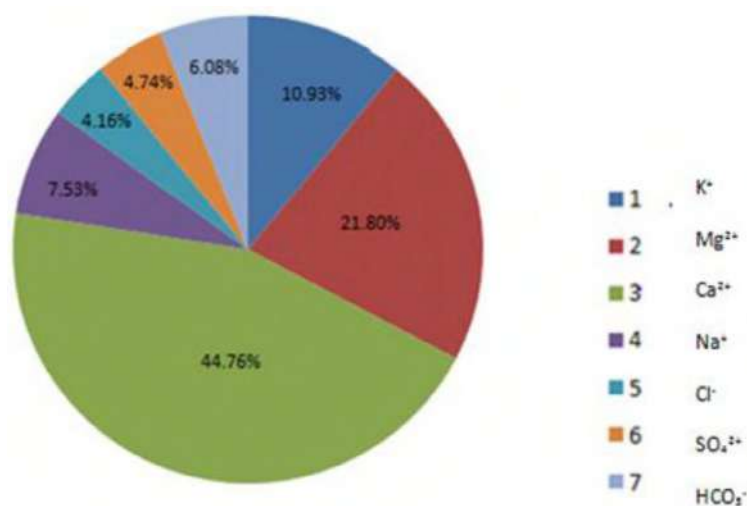


Figure 2. Distribution of inorganic chemical species in rainwater over the study period

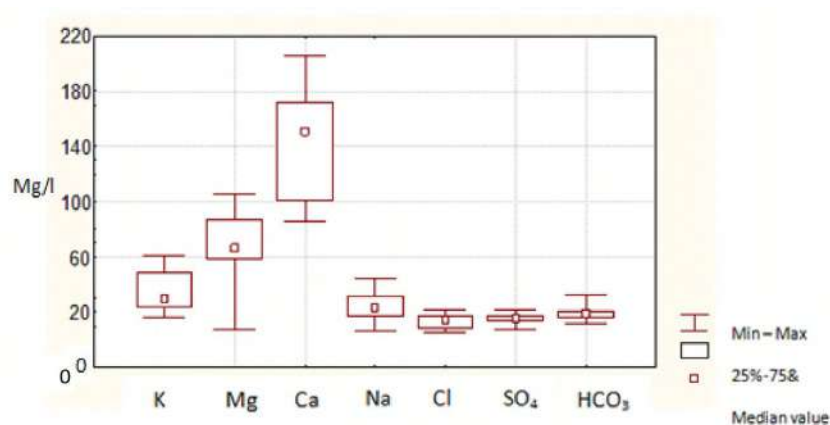


Figure 3. Statistical distribution diagram of measured concentration (Box and whisker diagram)

The monthly composite nutrient averages for the three-year period are presented in **Tables 2-4**. There were no significant variations in monthly concentration levels. However, the bulk comparison of seasonal variations in concentration levels over the period showed some notable variations. Calcium concentration ranged between 1.05 and 2.46 mg/l with a mean of 1.72 mg/l and a standard deviation of 0.44. The other cations had the following ranges, means, and standard deviations: Mg [(0.09 - 1.26) mg/l, 0.83mg/l, 0.27], Na [(0.15 - 1.03) mg/l, 0.55mg/l, 0.22], and K [(0.64 - 2.36) mg/l, 1.35mg/l, 0.56].

As for the anions, HCO₃⁻ ranged from 0.38–1.03 mg/l with a mean of 0.61 mg/l and a standard deviation of 0.15. Chloride (Cl⁻) had range, mean, and standard deviation of 0.18–0.75 mg/l, 0.46 mg/l, and 0.18, respectively. Sulphate (SO₄²⁻) had a range of 0.35–1.03mg/l, a mean of 0.73mg/l, and a standard deviation of 0.14.

Calcium (Ca²⁺) and bicarbonate (HCO₃⁻) were the dominant ions accounting for 52.65% and 40.59% of total cations and anions, respectively.

Generally, the highest concentrations of cations and anions were registered during the wet seasons highlighting the significance of climatic conditions and the scavenging properties of precipitation. Only Na⁺ and K⁺ showed higher values at the onset of the dry seasons (November), which may be related to the abrupt temperature variation usually experienced around that period in the region.

These ion concentrations in RW are a clear indication of calcareous soil suspensions, windblown dust, material anthropogenic processing (cement), and possible contributions from sea salt.

The mean concentrations of chemical constituents in the study area were compared with those from other areas locally and worldwide (**Table 5**). The ionic concentration of the major reported acidic species (SO₄²⁻) in the current study was higher than the maximum range of values reported by **Abeng & Idim** (2019) for Calabar. The values were also higher than the ranges reported by **Okoya et al.** (2017) for the Ile-Ife area in southwestern Nigeria but lower than those registered in China, Mexico, Spain, Delhi, Belgium, and Jordan. Acidic species concentrations can be attributed to anthropogenic emissions, particularly from gas flaring and other industrial sources in the region (**Ekwere & Edet**, 2023). As for the soil-derived components K, Ca, and Mg (**Rao et al.**, 2016; **Majumdar & Adhikaryb**, 2022), the study area had greater concentrations than Benin, Brazil, Mexico, and Belgium. These high concentrations would originate from the dust particulates associated with intensive rock aggregate quarrying in the Oban Massif and the limestone quarrying in the Mfamosing Karst formation (**Rauf et al.**, 2022; **Ekwere & Edet**, 2021; **Ekwere et al.**, 2012), which have been shown to be rich in calcite (**Ekwere & Edet**, 2021).

Table 5. Mean and range concentrations of chemical and physical parameter analysis of rainwater (units are in mg/l except for pH)

Month	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁺	HCO ₃ ⁻	pH	References
Calabar	24.64	69.09	141.91	23.87	13.20	15.02	19.28	6.7	Present study
Calabar	-	-	-	15.6-80.4	15.8-93.64	0.01-5.15	-	5.4-8.0	Abeng & Idim, 2019
Ile-Ife	0.09-0.17	0.07-0.10	0.09-0.15	0.12-0.21	-	0.15-0.17	4.5-18.8	6.13-6.62	Okoya <i>et al.</i> , 2017
Djougou, Benin	1.85	0.63	2.24	-	-	0.74	-	5.19	Akpo <i>et al.</i> , 2015
Beijing, China	9.17	30.5	273	-	-	357	-	4.85	Xu <i>et al.</i> , 2015
Brazil	1.15	0.09	2.04	-	-	0.84	-	6.5	Mimura <i>et al.</i> , 2016
Mexico	2.04	63.7	70.0	-	-	76.7	-	-	Baez <i>et al.</i> , 2007
Coruña, Spain	15.1	53.7	121.7	-	-	72.5	-	5.55	Moreda-Piñeiro <i>et al.</i> , 2014
Delhi, India	5.3	69.2	198.6	-	-	91.6	-	6.35	Rao <i>et al.</i> , 2016
Belgium	2.0	9.3	28.9	-	-	47.3	-	5.19	Staelens <i>et al.</i> , 2005
Jordan	85.2	93.1	165.3	-	-	112.4	-	6.91	Le Bolloch & Guerzon, 1995

Principal component analysis (PCA)

A correlation analysis was conducted for both chemical and physical RW parameters to establish the interrelations between them (Table 6). The results showed positive correlations between Na–Mg–Ca indicating the presence of ionic chemical species of crustal (soil) origin (Rao *et al.*, 2016). A positive correlation was also detected between Na–K–Cl indicating marine sourcing of the ionic species, especially during the wet seasons, and common soil sourcing during the dry seasons (Safai *et al.*, 2004; Tiwari *et al.*, 2012; Majumdar & Adhikaryb, 2022). The correlation between soil-derived Ca²⁺ and Mg²⁺ with acidic species of SO₄ could be related to atmospheric HSO₄ chemical reactions with alkaline species and carbonate materials present as windblown particulate matter (Rao *et al.*, 2016).

The factor analysis (Table 7) showed two possible dominant factors responsible for data variation. Only the factors with scores greater than 0.30 (moderate significance) were considered significant in determining the major parameters in the factor loadings. The two established factor loadings accounted for 53.29% of the data variability. Factor 1 (31.85%) consisted of HCO₃⁻, Mg, Ca, Na, and SO₄ and indicated a mixture of inputs from debris and dust particulates mainly of crustal or environmental origin. Factor 2 was composed of K, Ca, and Cl (21.44%) and appeared to have a geogenic origin related to mineral salt.

Table 6. Correlation coefficient matrix of measured parameters

	K	Mg	Ca	Na	Cl	SO ₄	HCO ₃	pH	EC
K	1								
Mg	-0.04	1							
Ca	0.10	-0.13	1						
Na	-0.03	0.50	0.47	1					
Cl	0.52	-0.02	0.30	0.42	1				
SO ₄	-0.01	0.50	0.49	-0.27	0.04	1			
HCO ₃	-0.11	0.23	-0.14	0.51	0.02	-0.24	1		
pH	-0.01	-0.01	0.42	0.11	0.41	0.10	0.43	1	
EC	0.20	0.46	-0.27	0.05	-0.35	0.03	0.04	-0.29	1

Table 7. Factor loadings (normalized). Clusters of loadings are in bold.

	Factor 1	Factor 2
HCO ₃	0.6588	-0.1195
K	0.1609	0.7037
Mg	0.6522	0.0485
Ca	0.5382	0.3661
Na	0.8019	-0.1506
Cl	-0.0438	0.8918
SO ₄	0.6398	-0.1923
% total variance	31.85	21.44
Cumul. % variance	31.85	53.29

Table 8. The ratio of Na to other elements as sourcing indicator

Ratio	Mean Ratio	Seawater Ratio
Cl/Na	0.67	1.80
SO ₄ /Na	0.75	0.25
K/Na	1.78	0.12
Mg/Na	3.19	0.12
Ca/Na	4.47	0.04

Ionic ratios

The ratio of Na⁺ to an element X (values expressed in milliequivalents, mEq) can be used to assess the likelihood of such an element originating from a marine source (Casartelli *et al.*, 2008). Such equity in the ratio indicates that the element is of marine origin. Higher ratios point to other important contributing sources. Based on these assumptions, the possibility of inputs from marine sourcing was calculated for the ions (Table 8). The Cl-/Na+ ratio was lower than the average for seawater indicating possible marine sourcing (Majumdar & Adhikaryb, 2022). Other element ratios were higher than the average seawater ratios indicating that other sources also contribute.

Atmospheric precipitation and deposition, especially in coastal settings like the study area, are usually from marine salts and mineral particulates. The particulates are basically from soil dust or mining and earth excavation work. In the proximity of the study area, there is intensive rock and aggregate quarrying in the crystalline basement of the Oban Massif, as well as limestone quarrying and cement processing within the adjacent Mfamosing karst country. Thus, contributions from other elements may come from rock mass quarrying and processing. The burning of dried foliage and agricultural debris can also contribute, particularly due to high SO₄²⁻ and K⁺ to Na⁺ ratios.

Suitability assessment of rainwater for agricultural use

In view of the common practice of the local population of harvesting rainwater for small-scale seasonal farming, especially during somewhat dry climatic spells, the study also assessed RW suitability for agricultural use based on the sodium absorption ratio (SAR) and that of magnesium (MAR).

SAR was calculated using the following formula:

$$SAR = Na+ / \sqrt{1/2 (Ca^{2+} + Mg^{2+})} \text{ with ionic contents expressed in meq/l.}$$

Higher SAR indicates a higher potential for long-term damage to the soil. Values of less than 3 are safe, while values of >9 cause severe permeability problems on textured soils, e.g., silty-clay and loam (**Baride et al.**, 2014), although it has less effect on coarse sandy soils.

SAR calculations for rainwater within the study period ranged from 0.03 to 0.24 with an average value of 0.13. These values were far below the risk value of 9 indicating rainwater suitability for agricultural use within the area.

Calcium and magnesium are usually in equilibrium in water. High Mg adversely affects crop yield and soil quality.

The magnesium absorption ratio (MAR) is computed as:

$$MAR = \frac{Mg}{Mg+Ca} \times 100$$

Values greater than 50% indicate the water is poisonous for agricultural use (**Mizra et al.**, 2017). Calculated rainfall MAR values within the study area ranged from 0.74–9.50% posing no threat to agricultural use.

Conclusions

Major ionic species analysis, PCA-based interpretations, and ionic ratios were used to determine the hydrochemical characteristics and possible sources of ionic species in rainwater within the Calabar Metropolis.

Rainfall in the study area generally lies within the potable and permissible pH limits of 6.5–8.5. The trend of nutrients in rainwater was $Ca > Mg > K > Na$ and $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ for cations and anions, respectively, with both sets of nutrients reaching the highest values in the rainy season. The higher nutrient concentration in the rainy season arises from the scavenging influence of more rain within the period. Principal component analyses and ionic ratios indicated that the rainfall composition was controlled by crustal-derived particulates and marine salts, which are geogenic with minimal anthropogenic inputs. The chemical composition of rainfall within the study area was within the concentration range of other world locations with similar geological settings and low to moderate pollution incidences.

Based on sodium and magnesium absorption ratio indices, rainwater within the study area was deemed suitable for agricultural purposes and uses currently.

The present study provides baseline data for the study area, although it only covers a three-year period, and the variability of rainfall and its constituents is considerable over time. Therefore, it is advisable to conduct continuous monitoring and assessment of rainwater in the area over time to check for possible variations, especially from anthropogenic sources. Future studies may also incorporate isotope studies of rainfall constituents for more definitive projections.

Conflicts of interest

There is no conflict of interest as concerns the development of this research through to the production of this manuscript.

References

- Abeng, F. E., Idim, V. D.** (2019). Physicochemical properties of rainwater quality of Calabar Municipality, S.E. Nigeria. *International Journal of Chemistry Studies*, 4 (3), 1-5.
- Adegunwa, A., Adebisi, F. M., Asubiojo, O.** (2019). Evaluating aerial pollution using rainwater chemistry for sustainable environmental development. *Management of Environmental Quality*, 31(3), 713-739.
<https://doi.org/10.1108/meq-07-2019-0146>
- Ademorati, C.M.A.** (1996). *Environmental Chemistry and Toxicology*. Ibadan, Nigeria: Foludex press.
- Akpo, A.B., Galy-Lacaux, C., Laouali, D., Delon, C., Liousse, C., Adon, M., Gardrat, E., Mariscal, A., Darakpa, C.** (2015). Precipitation chemistry and wet deposition in a remote wet savanna site in West Africa: Djougou, Benin. *Atmospheric Environment*, 115, 110-123.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.064>

- Arimoto, R., Zhang, X. Y., Huebert, B.J., Kang, C.H., Savoie, D. L., Prospero, J.M., Sage, S. K., Schloesslin, C. A., Khaing, H. M., Oh, S.N.** (2014). Chemical composition of atmospheric aerosols from Zhenbeitai, China and Gosan, South Korea, during ACE-Asia. *Journal Geophysics Research*, 109, D19S04.
- Baez, A. P., Belmont, R. D., García, R.M., Torres, M.C., Padilla, H.G.** (2007). Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico. *Atmospheric Research*, 80, 67-85.
- Baride, M., Sanjaykumar, N.P., Rushikesh, G.** (2014). Groundwater geochemistry of shallow and deep aquifers from Jalgaon district, northern Maharashtra (India). *International Journal of Advances Geosciences*, 2(2), 97-104.
- Berner, E. K., Berner, R. A.** (1996). *Global environment: water, air and geochemical cycles*. Upper Saddle River, NJ. Prentice Hall, Inc.
- Casartelli, M.R., Mirlean, N., Peralba, M.C., Barrionuevo, S., Gómezrey, M.X., Madeira, M.** (2008). An assessment of the chemical composition of precipitation and throughfall in rural-industrial gradient in wet subtropics (southern Brazil). *Environmental Monitoring Assess*, 144, 105-116.
- Chughtai, M., Mustafa, S., Mumtaz, M.** (2014) Study of Physicochemical parameters of Rainwater: A case study of Karachi, Pakistan. *American Journal of Analytical Chemistry*, 5(2014), 235-242.
- Ekwere, A.S., Edet, B.B.** (2023). Hydrochemistry of groundwaters within the rock quarrying districts of western Oban Massif, southeastern Nigeria. *Indian Journal Environmental Protection*, 43(2), 108-118.
- Ekwere, A.S., Edet, B.B.** (2021). Temporal variations of heavy metals in sediments, soils, and dust particulates across the rock quarrying districts of the Oban Massif, southeastern Nigeria. *Environment Nanotechnology, Monitoring and Management*, 15 (100431).
- Ekwere, A.S., Kudamnya, E A., Osung, W.E.** (2021). Assessment of potentially toxic metals and their mineral species in soils of arable farmlands in the southeastern Niger delta basin, *Nigeria Soil Environment*, 40(2), 119-126.
- Ekwere, A.S., Elueze, A.A.** (2012). Trace element assessment of stream sediments around the Aluminium Smelting Company in Ikot Abasi, south-eastern Nigeria. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering & Technology*, 4(4), 256-261.
- Ekwere, A.S., Edet, A. E.** (2015). Vulnerability assessment of aquifers within the Oban Massif, south-eastern Nigeria, using DRASTIC method. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 6 (10), 1123-1136.
- Ekwere, A.S., Edet, A.E., Ekwere, S.J.** (2012). Groundwater chemistry of the Oban Massif, South-Eastern Nigeria. *Ambiente-Agua, Taubaté*, 7(1), 51-66.
- Gioda, A., Mayol-Bracero, O.L., Scatena, F.N., Weathers, K.C., Mateus, V.L., McDowell, W.H.** (2013). Chemical constituents in clouds and rainwater in Puerto Rican rainforest: potential sources and seasonal drivers. *Atmospheric Environment*, 68, 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.017>
- Gonçalves, F.L.T., Massambani, O., Beheng, K.D., Vautz, W., Schilling, M., Solci, M. C.** (2000). Modelling and measurements of below cloud scavenging processes in the highly industrialized region of Cubatão-Brazil. *Atmospheric Environment*, 34 (24), 4113-4120. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00503-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00503-8)
- Herrera, J., Rodríguez, S., Baez, A.P.** (2009). Chemical composition of bulk precipitation in the metropolitan area of Costa Rica, Central America. *Atmospheric Research*, 94, 151-160.
- Honório, B.A.D., Horbe, A.M.C., Seyler, P.** (2010). Chemical composition of rainwater in western Amazonia – Brazil. *Atmospheric Research*, 98, 416-425.
- Huang, X. F., Li, X., He, L. Y., Feng, N., Hu, M., Niu, Y. W., Zeng, L. W.** (2010). 5-year study of rainwater chemistry in a coastal mega-city in South China. *Atmospheric Research*, 97, 185-193.
- Huang, H., Wang, Z., Guo, J., Wang, C., Zhang, X.** (2022). Composition, seasonal variation and sources attribution of volatile organic compounds in urban air in southwestern China. *Urban Climate*, 45(101241).
- Kaskaoutis, D. G., Kumar, S., Sharma, D., Singh, R. P., Kharol, S. K., Sharma, M., Singh, A. K., Singh, S., Singh, A., Singh, D.** (2014). Effects of crop residue burning on aerosol properties, plume characteristics and long-range transport over Northern India. *Journal Geophysics Research* 119, 3019-3026.

- Keresztesi, Á., Birsan, M.-V., Nita, I.-A., Bodor, Z., Szep, R.** (2019). Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000-2017. *Environment Science European*, 31 (50). <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0234-9>.
- Keresztesi, Á., Nita, I.-A., Boga, R., Birsan, M.-V., Bodor, Z., Szép, R.** (2020). Spatial and long-term analysis of rainwater chemistry over the conterminous United States. *Environmental Research*, 188, 109872.
- Langmuir, D.** (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- Le Bolloch, O., Guerzoni, S.** (1995). Acid and alkaline deposition in precipitation on the western coast of Sardinia, central Mediterranean (40° N 8° E). *Water Air and Soil Pollution*, 85, 2155-2160.
- Li, J., Wu, H., Jiang, P., Fu, C.** (2022). Rainwater chemistry in a subtropical high-altitude mountain site, South China: Seasonality, source apportionment and potential factors. *Atmospheric Environment*, 268, 118786.
- Ma, X., Xia, D., Chen, P.** (2023). Heavy metal distribution, magnetic properties, source apportionment and potential risks in urban street dust of northwest China. *Water Air and Soil Pollution*, 234(2), 133. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06132-y>
- Majumdar, D., Adhikaryb, H.** (2022). Identification of sources of ions in early monsoon precipitation over Kolkata Metropolis and two adjoining towns. *Urban Climate*, 41, 101087.
- Masiwal, R., Sharma, C., Shukla, D.K., Radhakrishnan, S.R., Pandey, K., Uniyal, S.K., Ranjan, A.** (2022). Influence of precursors and meteorology on ambient ozone over Indian western Himalayas. *Urban Climate*, 45, 101239.
- Mazurkiewicz, K., Jeż-Walkowiak, J., Michalkiewicz, M.** (2022). Physicochemical and microbiological quality of rainwater harvested in underground retention tanks. *Science of the Total Environment*, 814 (152701)
- Mimura, A.M.S., Almedia, J.M., Vaz, F.A.S., de Oliveira, M.A.L., Ferreira, C.C.M., Silva, J.C.J.** (2016). Chemical composition monitoring of tropical rainwater during a typical dry year. *Atmospheric Research*, 169, 391-399.
- Mizra, A.T.M., Tanvir, R., Saadat, A.H.M., Md., Safiqul, I, Md. Abdullah, A., Shamim, A.** (2017). Groundwater characterisation and selection of suitable water type for irrigation in western region of Bangladesh. *Applied Water Science*, 7, 233-243.
- Moreda-Piñeiro, J.M., Alonso-Rodríguez, E.L., Moscoso-Pérez, C. M., Blanco-Heras, G. B., Turnes-Carou, I. T., López-Mahía, P.L., Muniategui-Lorenzo, S. M., Prada-Rodríguez, D. P.** (2014). Influence of marine, terrestrial and anthropogenic sources on ionic and metallic composition of rainwater at a suburban site (Northwest Coast of Spain). *Atmospheric Environment*, 88, 30-38.
- Mouli, P.C., Mohan, S.V., Reddy, S.J.** (2005). Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition. *Atmospheric Environment*, 39, 999-1008.
- Niu, H., He, Y., Lu, X.X., Shen, J., Du, J., Zhang, T., Pu, T., Xin, H., Chang, L.** (2014). Chemical composition of rainwater in the Yulong snow mountain region, south-western China. *Atmospheric Research*, 144, 195-206.
- Okoya, A.A., Osungbemi, W.B., Ologunorisa, T.** (2017). Spatial variation of rainwater in Ile-Ife, Osun State, Nigeria. *Journal of Sustainable Development*, 10(2), 203-217.
- Oliviera, P.I., Figueiredo, B.R., Cardoso, A.A.** (2012). Rainwater major and trace element contents in southeastern Brazil: an assessment of a sugar cane region in dry and wet period. *Journal Brazilian Chemical Society*, 23 (12), 2258-2265.
- Raimundo C. O., Michael, M. K., José F. R., Troy P. B., Patrick M. C., Plinio, B.C., Joost H.** (2015). Chemical analysis of rainfall and throughfall in the Tapajos National Forest, Belterra, Para, Brazil. *Revista Ambiente Água*, 10(2), 263-285. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1552>
- Rao, P.S.P., Tiwari, S., Matwale, J.L., Pervez, S., Tunved, P., Safai, P.D., Srivastava, A.K., Bisht, D.S., Singh, S., Hopke, P.K.** (2016). Sources of chemical species in rainwater during monsoon and non-monsoonal periods over two mega cities in India and dominant source region of secondary aerosols. *Atmospheric Environment*, 146, 90-99.
- Rauf, A. U., Mallongi, Daud, A., Hatta, M., Amiruddin, R., Stang, S., Wayuh, A., Astuti, R.D.P.** (2022). Spatial Distribution and Ecological Risk of Potentially Toxic Elements in Maros Regency, Indonesia. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 17(1), 93 - 100. <https://doi.org/10.26471/cjees/2022/017/203>

- Reijers, T.J.A.** (1996). *Selected Chapters on Geology, Sedimentary Geology and Sequence Stratigraphy and three case studies and field guide*, SPDC Publications, Warri, Nigeria, 197p.
- Rocha, F.R., Silva, J.A.F., Lago, C.L., Fornaro, A., Gutz, I.G.R.** (2003). Wet deposition and related atmospheric chemistry in the Sao Paulo metropolis, Brazil, Part 1: major inorganic ions in rainwater as evaluated by capillary electrophoresis with contactless conductivity detection. *Atmosphere*, 37, 105-115.
- Safai, P.D., Rao, P.S.P., Momin, G.A., Ali, K., Chate, D.M., Praveen, P.S.** (2004). Chemical precipitation during 1984-2002 at Pune, India. *Atmospheric Environment*, 38, 1705-1714.
- Short, K. C., Stauble, A. J.** (1967). Outline of geology of Niger Delta. *AAPG Bulletin* 52, 761-779.
- Staelens, J., Schrijver, A.D., Avermaet, P.V., Genouw, G., Verhoest, N.** (2005). A comparison of bulk and wet only deposition at two adjacent sites in Melle. *Atmospheric Environment*, 39, 7-15.
- Tiwari, S., Hopke, P.K., Pipal, A.S., Srivastava, A.K., Bisht, D.S., Tiwari, S., Singh, A.K., Soni, V.K., Attri, S.D.** (2015). Intra-urban variability of particulate matter (PM₂₅ and PM₁₀) and its relationship with optical properties of aerosols over Delhi, India. *Atmospheric Research*, 166, 223-232.
- WHO.** (2008). *Guideline for Drinking-water Quality (3rd ed. Incorporating 1st and 2nd Agenda)*, Vol. 1. Recommendations, Geneva, 668p.
- Xu, Z., Yao, W., Wien-Jing, L., Chong-Shan, L., Jianpeng, J., Tong, Z., Xuang, Z.** (2015). Chemical composition of rainwater and acid neutralization effect at Beijing and Chizhou city, China. *Atmospheric Research*, 164-165, 278-285.
- Zunckel, M., Saizar, C., Zaruaz, J.** (2003). Rainwater composition in northeast Uruguay. *Atmospheric Environment*, 37, 1601-1611.

Artículo original

Evaluación computacional de las interacciones de compuestos naturales y el dominio unión al ARN de las nucleolinas utilizando acoplamiento molecular y simulaciones de dinámica molecular

Computational evaluation of the interactions of natural compounds with the RNA binding domain of nucleolins using molecular docking and molecular dynamics simulations

Elvio Gayozo-Melgarejo^{1,*}, Laura Rojas-Aguadé²

¹Laboratorio de Mutagénesis, Carcinogénesis y Teratogénesis Ambiental, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay

²Departamento de Microbiología Industrial, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay

Citación: Gayozo-Melgarejo E, Rojas-Aguadé L. Evaluación computacional de las interacciones de compuestos naturales y el dominio unión al ARN de las nucleolinas utilizando acoplamiento molecular y simulaciones de dinámica molecular. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):385-399, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefn.1830>

Editor: Luis Fernando Echeverri

***Correspondencia:**

Elvio Gayozo-Melgarejo;
elviologo@gmail.com

Recibido: 1 de diciembre de 2022

Aceptado: 2 de junio de 2023

Publicado en línea: 16 de junio de 2023



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

Resumen

Varios estudios proponen la nucleolina como un blanco alternativo para la búsqueda y el diseño de nuevas terapias antitumorales o anticancerígenas. El objetivo de este estudio fue evaluar compuestos con potenciales afinidades de unión al ARN de las nucleolinas mediante herramientas bioinformáticas. Se evaluaron diez compuestos de los cuales tres moléculas (ácido betulínico, triptolide y berberina) presentaron afinidades de interacción con el dominio de unión al ARN (*RNA binding domain*, RBD), exhibiendo valores de energía de unión significativamente favorables ($p < 0,05$) y una constante de disociación calculada ($K_{d \text{ calc}}$) entre 0,14 y 0,91 μM . Las simulaciones de dinámica molecular evidenciaron que únicamente el complejo nucleolina-berberina tuvo estabilidad de interacción y energía libre de unión favorable en el tiempo simulado. Los residuos involucrados en la formación del complejo eran aminoácidos que cumplen funciones importantes en el sitio activo. Los hallazgos sugieren que, entre los compuestos evaluados, la berberina tuvo resultados favorables como potencial inhibidor de las actividades de la nucleolina, específicamente del dominio RBD.

Palabras clave: Bioinformática; Berberina; Cáncer; *in silico*; Nucleolinas; Productos naturales.

Abstract

Nucleolin has been proposed as an alternative target to search for and design possible new antitumor or anticancer therapies. Our objective was to evaluate compounds with potential binding affinities to the RNA binding domain (RBD) of nucleolins using bioinformatics tools. Ten compounds were evaluated of which three molecules (betulinic acid, triptolide, and berberine) showed binding affinities to the RBD domain with significantly favorable ($p < 0.05$) binding energy values and calculated dissociation constant ($K_{d \text{ calc}}$) between 0.14-0.91 μM . Molecular dynamics simulations evidenced that only the nucleolin-berberine complex exhibited interaction stability and favorable binding free energy in the simulated time. The residues involved in the complex formation were amino acids that play important roles in the active site. These findings suggest that among the evaluated compounds, berberine showed favorable results as a potential inhibitor of nucleolin activities, specifically in the RBD domain.

Keywords: Bioinformatics; Berberine; Cancer; *in silico*; Nucleolins; Natural products.

Introducción

Los productos naturales han demostrado ser fuentes importantes de compuestos con actividad inhibitoria de proteínas y potencial anticancerígeno. Muchos, como el curcumol, están en la mira de los investigadores para su desarrollo farmacológico (Wang *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2019), y muchos otros, como el paclitaxel, la camptotecina y nuevos derivados de la colchicina, ya se emplean farmacológicamente (Berrada *et al.*, 2005; Howat *et al.*, 2014; Johnson *et al.*, 2017).

Muchos de los compuestos naturales con posibles aplicaciones anticancerígenas interactúan con blancos moleculares proteicos e inhiben sus funciones y actividades (Pan *et al.*, 2012; Khazir *et al.*, 2014). Recientemente, se ha evaluado la nucleolina como blanco terapéutico en la búsqueda y desarrollo de moléculas inhibitoras o reguladoras de su expresión en células tumorales (Watanabe *et al.*, 2010; Meng *et al.*, 2011; Chen & Xu, 2016; Wang *et al.*, 2018). Este es el caso del curcumol y la oridonina, en los que se han reportado actividades inhibitorias de nucleolinas en células de carcinoma nasofaríngeo, desencadenando una disminución en la proliferación celular (Wang *et al.*, 2018; Vasaturo *et al.*, 2018).

La nucleolina es la proteína más abundante en los nucléolos (~90 %); cumple funciones importantes como la transcripción y el tráfico del ARNr, la regulación de la estructura de la cromatina y la nucleogénesis, y participa en el ensamblaje de ribosomas (Bugler *et al.*, 1982; Ginisty *et al.*, 1999; Tajrishi *et al.*, 2011; Berger *et al.*, 2015). Sin embargo, en células tumorales presenta una expresión alterada, localizándose abundantemente en el citoplasma y en la superficie celular, por lo que los investigadores correlacionan su sobreexpresión y abundancia con varios tipos de cáncer debido a su intervención en los procesos de proliferación y crecimiento celular (Berger *et al.*, 2015; Chen & Xu, 2016).

Las nucleolinas presentes en la superficie celular son capaces de interrumpir procesos apoptóticos mediante la interacción con ligandos (ácidos nucleicos y proteínas) relacionados con este evento, promoviendo, así, la división descontrolada de células tumorales (Meng *et al.*, 2011, Berger *et al.*, 2015; Chen & Xu, 2016). La disminución de la concentración de esta proteína es capaz de generar la inhibición de la proliferación de células cancerígenas y desencadenar su apoptosis (Meng *et al.*, 2011; Chen & Xu, 2016).

Para contribuir en la selección de moléculas con posibles actividades inhibitorias de las nucleolinas, el objetivo principal de este estudio fue evaluar e identificar compuestos naturales con potencial actividad inhibitoria del RBD de las nucleolinas mediante el análisis de modelos de acoplamiento molecular y simulaciones de dinámica molecular.

Materiales y métodos

Caracterización de la capacidad farmacofórica del RBD de la nucleolina

El sitio con capacidades farmacofóricas en el RBD de la nucleolina (PDB: 2KRR) se determinó y se caracterizó empleando las herramientas DoGSiteScorer (Volkamer *et al.*, 2012) y GRASP (Santana *et al.*, 2020). Para ello se establecieron descriptores como las dimensiones del sitio farmacofórico, los grupos funcionales y la composición de residuos presentes, así como el puntaje de capacidad farmacofórica y la predicción de residuos con mayor probabilidad de interacción con ligandos.

Pruebas de acoplamiento molecular

Se hicieron pruebas de acoplamiento molecular entre la nucleolina (PDB: 2KRR) y compuestos naturales que han demostrado propiedades medicinales beneficiosas para el ser humano (Tabla 1). Las estructuras de la proteína y de las moléculas se obtuvieron de las bases de datos Protein Data Bank RCSB (Arumugam *et al.*, 2010; Berman *et al.*, 2000) y PubChem (Kim *et al.*, 2016).

Para la preparación y minimización energética de la estructura de los compuestos y de la nucleolina se emplearon: el algoritmo de campo de fuerza universal (UFF), utilizando cuatro pasos por actualización; el algoritmo de gradientes conjugados, con un ciclo de

50.000 pasos y un criterio de convergencia de $0,001 \text{ kcal.mol}^{-1}.\text{Å}^{-1}$, y se añadieron cargas parciales y átomos de hidrógeno polares con un pH fisiológico celular de 7,4 mediante los programas Avogadro (Hanwell *et al.*, 2012) y PyRx 0.8 (Dallakyan & Olson, 2015). Se hicieron pruebas de acoplamiento molecular en diez réplicas y se empleó una caja de interacción con dimensiones de $43 \times 44 \times 52 \text{ Å}^3$, con el fin de minimizar el grado de incertidumbre de los ensayos computacionales; estas pruebas se hicieron con el programa AutoDock Vina v.1 (Trott & Olson, 2010). Como control se usó el diterpeno oridonina, la cual ha demostrado su actividad inhibitoria de las nucleolinas (Vasaturo *et al.*, 2018).

La afinidad de interacción se determinó mediante la estimación de la constante de disociación calculada ($K_{d \text{ calc}}$) en la ecuación 1 (Ec. 1), así como la eficacia del ligando (EL) en la ecuación 2 (Ec. 2); para ello se emplearon las ecuaciones utilizadas por Choudhury *et al.* (2021) y Onawole *et al.* (2018), respectivamente:

$$Kd \text{ calc} = e^{\left(\frac{\Delta G \times 1000}{RT}\right)} \dots\dots\dots \text{Ec.1}$$

$$EL = \frac{-\Delta G}{HA} \dots\dots\dots \text{Ec. 2,}$$

donde T es la temperatura corporal de 310 K (37 °C), R es la constante de los gases ideales con valor de $1,987207 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ y HA es el número de átomos pesados presentes en la estructura química del ligando (Hopkins *et al.*, 2014; Onawole *et al.*, 2018; Choudhury *et al.*, 2021).

Se seleccionaron aquellos compuestos con valores de energía libre de unión (ΔG) significativamente favorables y valores de $K_{d \text{ calc}}$ menores a los registrados con el control, para su análisis y visualización.

La visualización, análisis y caracterización de los complejos resultantes de la interacción de los compuestos seleccionados y el RBD de las nucleolinas, se hicieron con el programa Discovery Studio Visualizer v.20 (Dassault Systèmes BIOVIA, 2019).

Simulaciones de dinámica molecular

Las simulaciones de dinámica molecular se hicieron por triplicado para disminuir los errores y el grado de incertidumbre generados durante la determinación de la estabilidad de los complejos y la energía libre de interacción de los ligandos en el tiempo simulado; para ello se emplearon los programas NAnoscale Molecular Dynamics 2.14 (Phillips *et al.*, 2005) y Visual Molecular Dynamics 1.9.4a53 (Humphrey *et al.*, 1996).

En las simulaciones se emplearon los parámetros de campo de fuerza del programa CHARMM36 (Vanommeslaeghe *et al.*, 2010); los datos topológicos de los compuestos se generaron con la herramienta Ligand Reader & Modeler (Jo *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2017) de CHARMM-GUI (Brooks *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2016). Los complejos seleccionados se sometieron a solvatación con moléculas de agua (H_2O TIP3P) (Jorgensen *et al.*, 1983), y para neutralizar las cargas parciales del sistema, se agregaron iones cloruro (Cl^-) e iones sodio (Na^+). A cada complejo se le aplicó una minimización energética empleando el método del gradiente de descenso más pronunciado para un máximo de 50.000 pasos; posteriormente, cada complejo fue restringido empleando un ensamble isotérmico-isobárico (NPT) por 100 ps. Las simulaciones se hicieron a una temperatura de 310 K empleando el esquema de termostato de Berendsen (Berendsen *et al.*, 1984) y a una presión de 1,02 bares al emplear el esquema de baróstato de Parrinello-Rahman (Parrinello & Rahman, 1980). Se utilizó el valor de 1 como constante dieléctrica del solvente; las simulaciones se realizaron durante 10 ns con intervalos de 2 fs y un periodo de oscilación de 150 fs, y las velocidades se determinaron según la distribución de Maxwell.

Como parámetros de estabilidad de la interacción se estimaron la raíz de la desviación cuadrática media (RMSD), la raíz de la fluctuación cuadrática media (RMSF), la variación de la raíz de la fluctuación cuadrática media (ΔRMSF), el área de superficie accesible al solvente (SASA), y el número de puentes de hidrógeno existente entre la proteína y los compuestos y en todo el complejo, empleando el programa Visual Molecular Dynamics 1.9.4a53 (Humphrey *et al.*, 1996). La energía de Gibbs se determinó para cada complejo

mediante el método de energía de interacción lineal (EIL) (Åqvist *et al.*, 1994; Hansson *et al.*, 1998), empleando el programa CaFE (Liu & Hou, 2016) y los coeficientes $\alpha=0,18$, $\beta=0,5$, $\gamma=0$ (De Amorim *et al.*, 2008; Hansson *et al.*, 1998).

Análisis de datos

Las predicciones de ajuste a la regla modificada de los cinco de Lipinski (peso molecular ≤ 500 g.mol⁻¹, coeficiente de participación agua:octanol de Moriguchi $\leq 4,15$, aceptores de puentes de hidrógeno ≤ 10 , donadores de puentes de hidrógeno ≤ 5) (Lipinski *et al.*, 2001) de los compuestos, se realizaron con la herramienta SwissADME (Daina *et al.*, 2014; Daina & Zoete, 2016; Daina *et al.*, 2017). Los datos de la energía libre de interacción obtenidos en las pruebas de acoplamiento molecular se analizaron mediante el test de Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952) y el test *post-hoc* de Dunn (Dunn, 1964), en ambos casos con un 5 % de nivel de significación, empleando el programa PAST v. 4.10 (Hammer *et al.*, 2001).

Resultados

El análisis de la capacidad farmacofórica del RBD reveló la presencia de un sitio altamente farmacofórico con un puntaje de 0,80, valor que sugiere que este dominio presenta aptitudes fisicoquímicas para dirigir la detección o el diseño de posibles inhibidores (Volkamer *et al.*, 2012). Las dimensiones del sitio fueron de 1774,85 Å³ de volumen, 2524 Å² de superficie y 28,36 Å de profundidad (Figura 1).

Se demostró la presencia de un total de 37 grupos funcionales capaces de actuar como donadores en puentes de hidrógeno y 94 grupos capaces de ser aceptores en puentes de hidrógeno; también se registró una hidrofobicidad del 52 % en el sitio, con un total de 140 grupos funcionales capaces de generar interacciones hidrofóbicas.

La composición de residuos del sitio reveló la presencia de un 28 % de residuos polares, 28 % de residuos apolares, 25 % de residuos básicos y 19 % de residuos ácidos con los siguientes aminoácidos: Phe11, Val12, Gly13, Asn14, Asn16, Phe17, Lys49, Phe50, Tyr52, Asn75, Lys78, Glu80, Lys81, Pro82, Lys83, Gly84, Lys85, Asp86, Lys88, Lys89, Arg91, Asp92, Ala93, Arg94, Thr95, Leu96, Leu97, Lys99, Glu119, Ile120, Arg121, Lys130, Ile132, Tyr134, Ile135, Glu136, Glu140, Glu144, Phe147, Glu148, Gln151, Leu162, Tyr163, Tyr164, Thr165, Gly166, Glu167, Pro168, Lys169, Gly170, Glu171, Gly172 y Leu173. El análisis llevado a cabo con algoritmos de aprendizaje de máquina evidenció que los residuos con mayor probabilidad de participación en interacciones con los ligandos fueron: Phe11, Phe50, Tyr52, Tyr134 y la Tyr163 (Figura 1).

Las pruebas de acoplamiento molecular revelaron que el ácido betulínico, la berberina y el triptolide presentaron valores significativamente favorables ($p<0,05$) de energía libre de interacción con el RBD comparados con el control (Tabla 1). Estos compuestos también demostraron una disminución en la constante de disociación estimada ($K_{d\text{ calc}}$) de

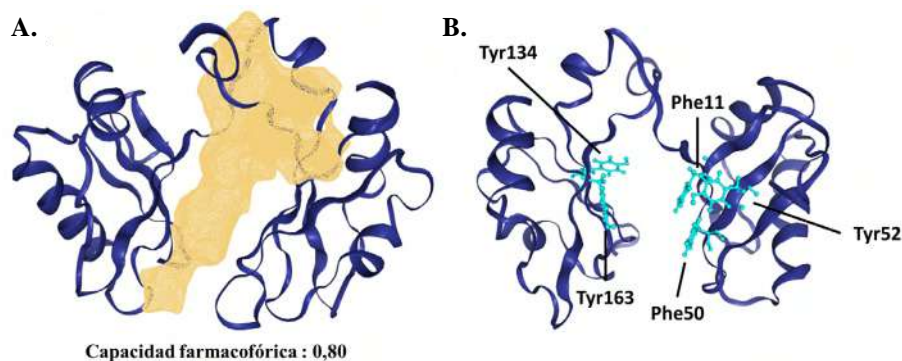


Figura 1. Análisis de la capacidad farmacofórica del RBD de la nucleolina (PDB: 2KRR), sitio farmacofórico (A), residuos con mayor probabilidad de actividad (B)

cada complejo en comparación con el control ($K_{d\text{calc}} = 0,14 \pm 0,01$, $0,52 \pm 0,025$ y $0,91 \pm 0,07$ μM , respectivamente), así como valores óptimos ($\leq 0,3$) de eficacia del ligando ($\text{EL} = 0,2$, $0,3$ y $0,3$ $\text{kcal.mol}^{-1}.\text{átom.pes.}^{-1}$, respectivamente) (Hopkins *et al.*, 2014; Onawole *et al.*, 2018), por lo que fueron seleccionados para analizarlos en las simulaciones de dinámica molecular (Tabla 1).

Las demás moléculas demostraron valores de energía libre de unión y de constante de disociación mayores a lo detectado en el control, lo que sugiere una interacción desfavorable con la nucleolina. El complejo nucleolina-ácido betulínico registró valores de energía libre de unión de $-9,73 \pm 0,04$ kcal.mol^{-1} (Tabla 1). Se detectaron interacciones hidrofóbicas entre cadenas de alquilo del ácido betulínico y el residuo Ile132 e interacciones entre orbitales sigma del ácido betulínico y orbitales pi del residuo Phe50 (Figura 2A).

El complejo formado entre la berberina y la nucleolina reveló valores de energía libre de unión de $-8,91 \pm 0,03$ kcal.mol^{-1} (Tabla 1). Presentó puentes de hidrógeno con los residuos Lys49 y Tyr134, así como interacciones no convencionales entre átomos de carbono polarizados e hidrógeno con los residuos Glu80 y Lys81. También se identificaron interacciones entre orbitales pi de la berberina y cadenas de alquilo de los residuos Leu97 e Ile132, así como interacciones hidrofóbicas entre grupos alquilo del ligando y los residuos Lys49 y Lys83 (Figura 2B).

El complejo nucleolina-triptolide reveló valores de energía libre de unión de $-8,57 \pm 0,05$ kcal.mol^{-1} (Tabla 1). Se registró la formación de puentes de hidrógeno entre el ligando y el residuo Lys99; también se determinó la formación de interacciones del tipo carbono-hidrógeno con el residuo Lys81, así como interacciones hidrofóbicas entre grupos alquilo del triptolide y el residuo Lys78 (Figura 2C). Las afinidades registradas por los residuos de lisina se deben principalmente a la presencia de átomos de oxígeno electronegativos en el triptolide; también se sabe que es capaz de generar interacciones hidrofóbicas y de van Der Waals debido a su naturaleza lipofílica (Liu *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2019).

Las simulaciones de dinámica molecular realizadas con los complejos seleccionados (nucleolina-ácido betulínico, nucleolina-berberina, nucleolina-triptolide) revelaron una mayor estabilidad, principalmente en el complejo nucleolina-berberina, el cual demostró en el tiempo simulado un promedio menor de RMSD, con un valor de $4,60 \pm 0,57$ Å (Figura 3A). Sin embargo, los complejos nucleolina-ácido betulínico y nucleolina-triptolide presentaron mayores promedios de RMSD, con valores de $6,89 \pm 2,06$ y $6,90 \pm 2,08$ Å, respectivamente.

Tabla 1. Energía libre de unión (ΔG) y constante de disociación ($K_{d\text{calc}}$) y eficacia del ligando (EL) en las pruebas de acoplamiento molecular

Compuestos	PubChem CID	ΔG unión (kcal.mol^{-1})	$K_{d\text{calc}}$ (μM)	EL ($\text{kcal.mol}^{-1}.\text{átom.pes.}^{-1}$)
Oridonina ^a	5321010	$-8,56 \pm 0,14$	$0,94 \pm 0,22$	0,2
Ácido betulínico	64971	$-9,73 \pm 0,04^{***}$	$0,14 \pm 0,01$	0,2
Emodina	10207	$-7,69 \pm 0,03$	$3,79 \pm 0,21$	0,3
Berberina	2353	$-8,91 \pm 0,03^{***}$	$0,52 \pm 0,025$	0,3
Colchicina	6167	$-8,17 \pm 0,17$	$1,81 \pm 0,68$	0,2
Curcumina	969516	$-7,6 \pm 0,31$	$4,57 \pm 2,02$	0,2
Genisteína	5280961	$-7,67 \pm 0,17$	$4,05 \pm 1,17$	0,3
Noscapina	275196	$7,83 \pm 0,18$	$3,11 \pm 0,71$	0,2
Partenolida	6473881	$-7,29 \pm 0,12$	$7,37 \pm 1,45$	0,4
Resveratrol	445154	$-6,97 \pm 0,05$	$12,22 \pm 0,99$	0,4
Triptolide	107985	$-8,57 \pm 0,05^{***}$	$0,91 \pm 0,07$	0,3

^a Control; átom.pes.: átomo pesado; *** $p < 0,001$

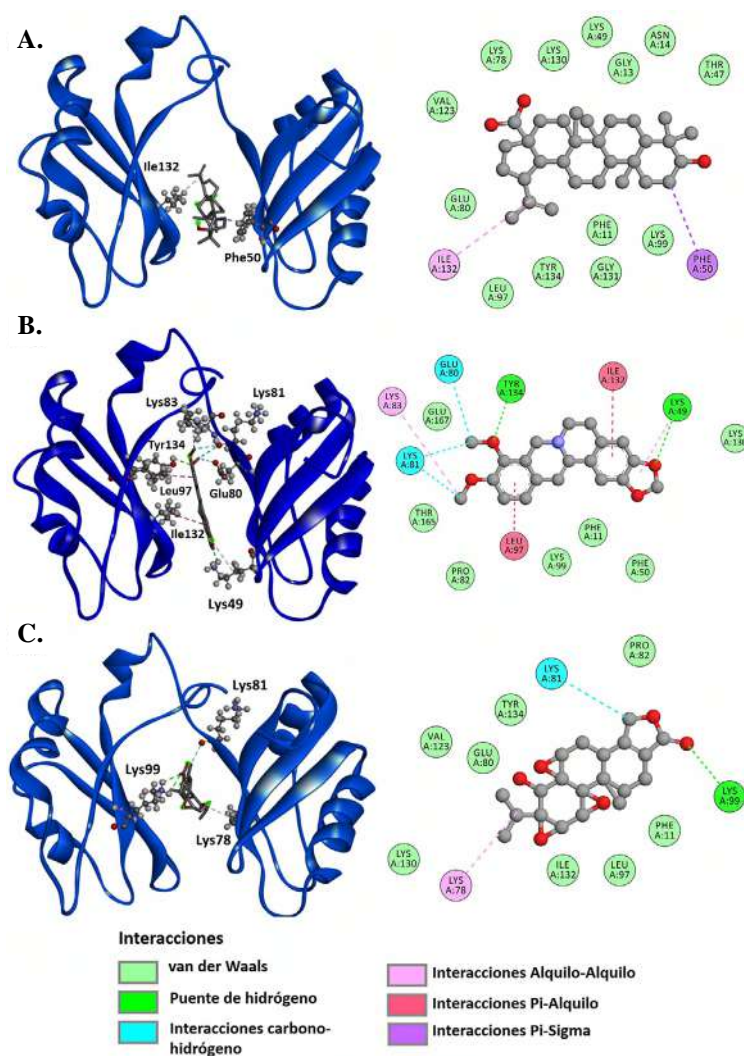


Figura 2. Representaciones tridimensionales y bidimensionales de los complejos ligando-proteína seleccionados: complejo nucleolina-ácido betulínico (A), complejo nucleolina-berberina (B), complejo nucleolina-triptolide (C)

Se registraron fluctuaciones en residuos presentes en las regiones Asp36-Thr47, Phe50-Asp60, Gly84-Asn100, Tyr134-Thr139, y Leu162-Thr165, dándose las mayores principalmente en el residuo Lys88 del complejo nucleolina-berberina en comparación con lo detectado en la proteína en su forma nativa (sin ligandos) (**Figura 3B, C**).

Los valores de superficie accesible al solvente (SASA) tuvieron un ligero aumento en el complejo nucleolina-triptolide, con un promedio de $11983,15 \pm 169,31 \text{ \AA}$. Sin embargo, se registraron promedios similares de SASA en los complejos nucleolina-berberina y nucleolina-ácido betulínico, con valores de $11399,89 \pm 401,45 \text{ \AA}$ y $11776,86 \pm 312,22 \text{ \AA}$, respectivamente (**Figura 3D**). Estos valores sugieren un mayor acceso del solvente en la nucleolina debido a la presencia de los compuestos en el sitio activo.

El análisis del número de puentes de hidrógeno presentes en los complejos entre los ligandos y la nucleolina reveló la presencia de dos puentes de hidrógeno en el complejo nucleolina-berberina durante todo el tiempo simulado, observándose un aumento en su frecuencia después de los 5 ns de simulación (**Figura 3E**).

En el complejo nucleolina-triptolide se detectó la presencia constante de puentes de hidrógeno entre la molécula y la proteína durante el tiempo simulado.

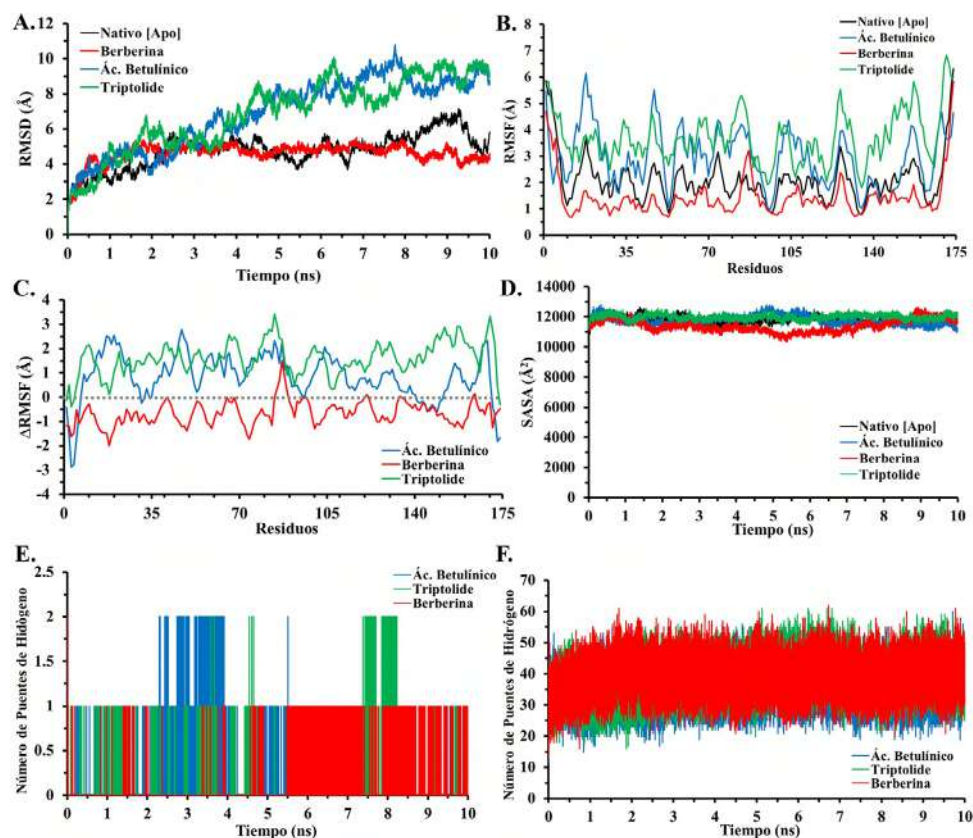


Figura 3. Simulaciones de dinámica molecular de los complejos seleccionados: raíz de la desviación cuadrática media (RMSD) (A), raíz de la fluctuación cuadrática media (RMSF) (B), variación de la raíz de la fluctuación cuadrática media (Δ RMSF) (C), superficie accesible al solvente (SASA) (D), número de puentes de hidrógeno formado entre compuestos y la nucleolina (E), número de puentes de hidrógeno totales (F). Ác.: ácido

Por su parte el complejo nucleolina-ácido betulínico reveló la presencia de puentes de hidrógeno entre el ligando y la proteína durante 7 ns de simulación; el número de interacciones decayó después de este tiempo (Figura 3E). Se pudo apreciar la formación de un número de 13 a 62 puentes de hidrógeno en todo el complejo nucleolina-berberina, siendo este el que presentó un mayor número de puentes de hidrógeno; se registraron 13 a 61 puentes de hidrógeno en todo el complejo nucleolina-triptolide, y entre 11 y 60 en todo el complejo nucleolina-ácido betulínico (Figura 3F).

El cálculo de la energía Gibbs de la interacción (ΔG) de los complejos seleccionados reveló resultados favorables solo en el complejo formado entre la berberina y la nucleolina, con valores promedio de $-15,76 \pm 5,50$ kcal.mol⁻¹. Esto también se pudo constatar en los valores promedio de RMSD, RMSF y SASA, los cuales ofrecen información sobre la estabilidad de los complejos proteína-ligando.

El análisis del total de las trayectorias obtenidas en la simulación demostró que la berberina se mantiene dentro del sitio activo sin presentar grandes cambios en la estructura de la nucleolina (Figura 4A). Sin embargo, los complejos conformados por la nucleolina-ácido betulínico y la nucleolina-triptolide demostraron valores desfavorables de energía libre de unión en el tiempo simulado, con valores de $5,02 \pm 4,73$ y $3,19 \pm 7,30$ kcal.mol⁻¹, respectivamente.

El análisis de la regla de Lipinski de los compuestos demostró que sólo la molécula de ácido betulínico presentó una infracción a la regla, con un valor de coeficiente de partición octanol-agua de Moriguchi de 5,82, mayor a lo recomendado por la regla (Tabla 2).

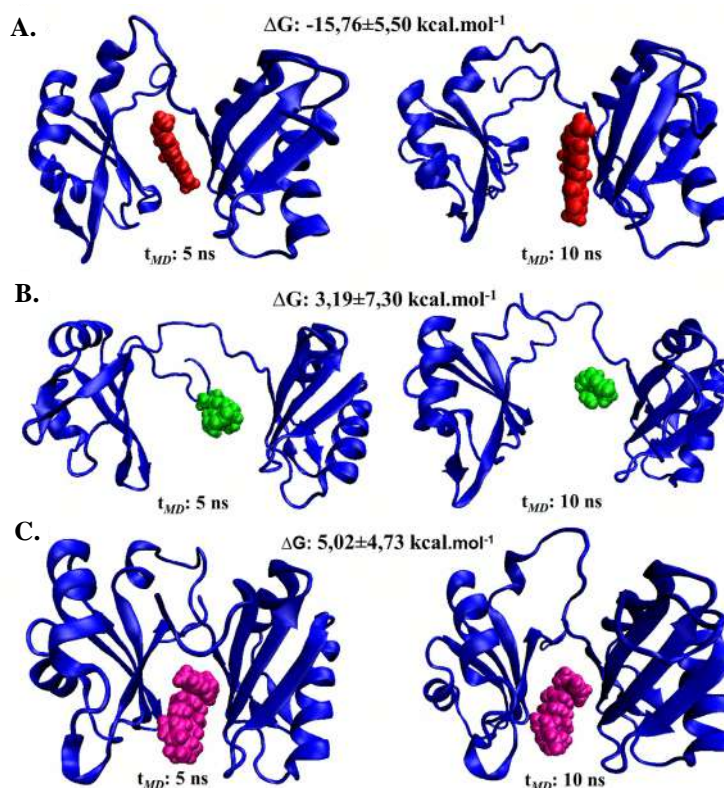


Figura 4. Trayectorias de las simulaciones de dinámica molecular de los complejos seleccionados: complejo nucleolina-berberina (A), complejo nucleolina-triptolide (B), complejo nucleolina-ácido betulínico (C). t_{MD} : tiempo de simulación.

Tabla 2. Evaluación del ajuste de los compuestos a la regla modificada de los cinco de Lipinski

Compuestos	PM ^a	Aceptores de PH	Donadores de PH	TPSA ^b	MLOGP ^c	Infrac.
Ácido betulínico	456,70	3	2	57,53	5,82	1
Emodina	270,24	5	3	94,83	0,10	0
Berberina ^d	336,36	4	0	40,80	2,19	0
Colchicina	399,44	6	1	83,09	1,02	0
Curcumina	368,38	6	2	93,06	1,47	0
Genisteína	270,24	5	3	90,90	0,52	0
Noscapina	413,42	8	0	75,69	1,69	0
Partenolida	248,32	3	0	38,83	2,47	0
Resveratrol	228,24	3	3	60,69	2,26	0
Triptolide	360,40	6	1	84,12	1,26	0

PH: puentes de hidrógeno, Infrac.: número de infracciones a la regla; ^aPM: peso molecular (g.mol⁻¹); ^bÁrea de superficie polar topológica (Å²); ^c Coeficiente de partición octanol-agua de Moriguchi; ^d Berberina en su forma de base.

La regla modificada de los cinco de Lipinski establece que los compuestos deben tener un peso molecular menor a 500 g.mol⁻¹, un número menor a 10 grupos funcionales aceptores de puentes de hidrógeno, un número menor a cinco grupos funcionales donadores

de puentes de hidrógeno, y que la molécula presente un valor de coeficiente de partición octanol-agua de Moriguchi menor a 4,15. Estos parámetros permiten estimar o predecir la solubilidad y la permeabilidad de los compuestos como medida de su biodisponibilidad en el organismo (Lipinski *et al.*, 2001; Walters, 2012).

Es importante destacar que todos los compuestos evaluados, excepto las moléculas de emodina, curcumina y genisteína, revelaron valores de TPSA menores a 90 \AA^2 (Tabla 2). Por lo demás, es importante destacar que los compuestos evaluados demostraron valores dentro de los límites de los parámetros sugeridos por la regla modificada de los cinco de Lipinski empleada en este estudio, excepto la molécula del ácido betulínico, el cual presentó un valor de MLOGP mayor a lo sugerido.

Discusión

Los análisis de acoplamiento molecular revelaron la formación de tres complejos con valores de energía de interacción significativamente favorables entre el RBD de las nucleolínas y los compuestos (ácido betulínico, triptolide y berberina).

Entre las interacciones registradas en estos complejos, la unión específica más importante impulsada por la entalpía, presente en $\sim 67\%$ de los complejos proteína-ligando, son los puentes de hidrógeno. Esta unión ayuda a la orientación del ligando en la proteína blanco, por lo que se encuentra asociada a la distorsión conformacional de los compuestos. También se ha observado que presenta grandes aportes energéticos a la afinidad, de $\sim 0,25$ a 40 kcal.mol^{-1} , por lo que es una de las interacciones más importantes en la búsqueda y diseño de inhibidores (Zhou *et al.*, 2012). Las interacciones mediadas por átomos de carbono parcialmente polarizados en los puentes de hidrógeno no convencionales, se consideran el segundo tipo de unión más importante que afecta la estructura de las proteínas. Se trata de una unión débil, sin embargo, se encuentra en un 20 a 25 % del total de los puentes de hidrógeno; es, además, uno de los fenómenos más comunes en los complejos proteína-ligando y cumple roles importantes en la afinidad de unión al ligando (Zhou *et al.*, 2012).

Las interacciones hidrofóbicas se consideran débiles con aportes de energía de $\sim 1,5$ a 2 kcal.mol^{-1} , no obstante, tienen un papel importante en la estabilización energética del ligando en la estructura de la proteína (Patil *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2012). También se ha reportado que existe una correlación entre la afinidad de interacción de los ligandos y las superficies lipofílicas de las proteínas en el sitio activo o de unión, si bien lo más sobresaliente es que las interacciones hidrofóbicas generan la repulsión y el reordenamiento de las moléculas de agua en el sitio activo de las proteínas, por lo que se consideran importantes para el desarrollo de inhibidores (Böhm & Klebe, 1996; Bissantz *et al.*, 2010).

Las interacciones entre orbitales pi del grupo arilos de los aminoácidos son también interacciones hidrofóbicas, que aportan polarizaciones y momentos cuadrúpolos considerables, los cuales dan lugar a la formación de interacciones con un conjunto de opciones geométricas que el ligando puede adoptar para alcanzar la estabilidad energética (Bissantz *et al.*, 2010).

En cuanto a la proteína diana, esta presenta dominios de unión al ARN (RBD) que cumplen funciones claves en procesos celulares como el empaquetamiento y el transporte de moléculas de ARNr en los nucléolos (Arumugam *et al.*, 2010). Además, se ha descrito que la proteína se encuentra involucrada en la proliferación de células cancerígenas bloqueando la apoptosis (Berger *et al.*, 2015). Se ha relacionado la nucleolina con las interacciones Fas-FasL y, por consiguiente, con la vía de inducción apoptótica en células cancerígenas (Wise *et al.*, 2013; Berger *et al.*, 2015). El sitio activo de la nucleolina implicado en la unión con la proteína Fas es el RBD y la formación de esta interacción bloquea directamente la presencia del complejo Fas-FasL, evitando, así, la apoptosis, por lo que la inhibición de este dominio activo termina desencadenando la muerte celular programada de la célula tumoral (Wise *et al.*, 2013).

Todos los estudios llevados a cabo hasta el momento sugieren que la nucleolina es un blanco prometedor en la búsqueda de posibles candidatos moleculares para el desarrollo de nuevas terapias anticancerígenas (Berger *et al.*, 2015; Vasaturo *et al.*, 2018).

Las simulaciones de dinámica molecular efectuadas en este estudio demostraron fluctuaciones en los complejos analizados con una baja afinidad hacia los ligandos ácido betulínico y triptolide. Otros estudios experimentales han revelado que la especificidad y la afinidad del RBD de las nucleolinas son dependientes de las interacciones que puedan darse en estos sitios, así como también de la naturaleza química de los ligandos, ya que se ha descrito que los RBD son capaces de interactuar con varios tipos de ligandos, como los ácidos nucleicos (ARN), las proteínas, las moléculas pequeñas e, inclusive, iones como el Ca^{+2} (Serin *et al.*, 1997; Ginisty *et al.*, 2001; Losfeld *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2018).

Las fluctuaciones observadas en los valores de RMSD y RMSF de los complejos se deben principalmente a la naturaleza flexible de la nucleolina, específicamente del RBD (Allain *et al.*, 2000; Bouvet *et al.*, 2012). Esta flexibilidad favorece en gran medida las funciones de la nucleolina, tanto en su forma libre como en su estado unido a ligandos (ARN, proteína, iones, etc.), siendo dicha flexibilidad esencial para la adaptabilidad estructural (disminución del desorden estructural del RBD en unión con los ligandos), y para la reducción de los costos entrópicos que se puedan generar durante la formación de las interacciones en los complejos y que afectan directamente la afinidad hacia los ligandos (Serin *et al.*, 1997; Allain *et al.*, 2000; Bouvet *et al.*, 2012).

En los últimos años el desarrollo de terapias anticancerígenas se ha enfocado más especialmente en compuestos naturales que actúan como inductores apoptóticos. Es el caso de las moléculas evaluadas en este estudio (ácido betulínico y triptolide), que han demostrado actividad supresora de la proliferación celular en varios tipos de cáncer (Pisha *et al.*, 1995; Schmidt *et al.*, 1997; Wick *et al.*, 1999; Thurnher *et al.*, 2003; Chintharlapalli *et al.*, 2007; Hordyjewska *et al.*, 2018; Yan & Sun, 2018; Hou *et al.*, 2019).

La berberina es uno de los compuestos naturales más prometedores en la lucha contra el cáncer. Este alcaloide isoquinoléico está presente en varias especies vegetales (Imanshahidi & Hosseinzadeh, 2008; Sun *et al.*, 2009) y ha sido ampliamente estudiado. Se ha demostrado su actividad contra las células cancerosas mediante la regulación de la expresión de genes y la inhibición de proteínas (Sun *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2015; Palmieri *et al.*, 2019; Rauf *et al.*, 2021). Se han reportado varios blancos moleculares de acción para la berberina en células cancerosas, por ejemplo, la AP-1 (Shen *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2009) y los ácidos nucleicos (ADN y ARN) (Islam & Kumar, 2008; Sun *et al.*, 2009; Parchehbaf-Jadid *et al.*, 2012). También se ha descrito que inhibe la N-acetiltransferasa (Lin *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2009), la ciclooxigenasa-2 (COX-2) (Seaver & Smith, 2004; Sun *et al.*, 2009), la telomerasa (Biao *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2009), y la topoisomerasa I mediante la formación de complejos ternarios (ADN-topoisomerasa I-berberina) (Qin *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2009).

En recientes estudios computacionales se ha evidenciado que la berberina presenta también afinidades de interacción con sitios activos del receptor del factor de crecimiento epidérmico (EGFR), la proteína quinasa de serina/treonina (AKT), la P38 y la quinasa regulada por señales extracelulares 1/2 (ERK1/2). Es posible que estas uniones supriman varias vías de fosforilación en células cancerígenas (Jabbarzadeh-Kaboli *et al.*, 2019).

Entre todas las dianas descritas, una de la más importante es la interacción Fas-FasL. Este alcaloide es capaz de intervenir en dicha unión mediante la regulación de la expresión de la FasL, lo cual desencadena la apoptosis de las células cancerígenas (Hsu *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2015).

En otros estudios se ha reportado que el curcumol, un compuesto con propiedades anticancerígenas, en células de carcinoma nasofaríngeo induce a la apoptosis bloqueando la proliferación celular por inhibición de las nucleolinas. También se ha encontrado que es capaz de disminuir el crecimiento de células cancerosas mamarias mediante interacción con nucleolinas y los receptores ER α 36 (Wang *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2023). El análisis computacional reveló que el curcumol presenta interacciones semejantes a las descritas con la berberina en el presente estudio. Este terpenoide (curcumol) se une al RBD formando el complejo nucleolina-curcumol, el cual actúa inhibiendo las actividades de la nucleolina (Wang *et al.*, 2018).

Ambos complejos (nucleolina-curcumol y nucleolina-berberina) presentan residuos comunes involucrados en la estabilización de los complejos. Estos son los aminoácidos Ly49, Lys130, Lys99 y Glu80, con los cuales se generan interacciones como los puentes de hidrógeno, las uniones hidrofóbicas y las fuerzas de van der Waals (Wang *et al.*, 2018).

Tales interacciones no solo conducen a la inhibición de las actividades de la proteína, sino que posiblemente son la causa de las propiedades apoptóticas del curcumol en las células de carcinoma nasofaríngeo (Wang *et al.*, 2018), y podrían aportar significativamente también a las afinidades de interacción y estabilidad energética de la berberina con la nucleolina.

Todos los resultados generados en este estudio evidencian que la berberina, el ácido betulínico y el triptolide presentan afinidades de interacción con el dominio activo RBD de las nucleolinas; sin embargo, las simulaciones de dinámica molecular revelaron que sólo la berberina exhibió interacciones estables y favorables con la nucleolina susceptibles de estudiarse en ensayos *in vitro* e *in vivo* para así determinar todos sus blancos y mecanismos de acción en células cancerígenas.

Agradecimientos

Al Programa Nacional de Incentivo a los Investigadores (PRONII) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) del Paraguay y al Grupo de Investigación en Biología Computacional y Bioinformática Estructural (GIBCBE) por su apoyo a esta investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

EGM, LRA; concepción de la investigación, recolección de resultados y análisis, escritura, edición y revisión de manuscrito; EGM: diseño metodológico y experimental computacional, ensayos computacionales y simulaciones.

Referencias

- Allain F. H. T., Gilbert D. E., Bouvet P., Feigon J. (2000). Solution structure of the two N-terminal RNA-binding domains of nucleolin and NMR study of the interaction with its RNA target. *Journal of Molecular Biology*, 303(2), 227-241. <https://doi.org/10.1006/jmbi.2000.4118>
- Arumugam S., Clarke Miller M., Maliekal J., Bates P. J., Trent J. O., Lane A. N. (2010). Solution structure of the RBD 1, 2 domains from human nucleolin. *Journal of Biomolecular NMR*, 47(1), 79-83. <https://doi.org/10.1007/s10858-010-9412-1>
- Åqvist, J., Medina, C., Samuelsson, J.E. (1994). A new method for predicting binding affinity in computer-aided drug design. *Protein Engineering, Design and Selection*, 7(3), 385-391. <https://doi.org/10.1093/protein/7.3.385>
- Berendsen, H. J., Postma, J. V., Van Gunsteren, W. F., DiNola, A. R. H. J., Haak, J. R. (1984). Molecular dynamics with coupling to an external bath. *The Journal of Chemical Physics*, 81(8), 3684-3690. <https://doi.org/10.1063/1.448118>
- Berger C. M., Gaume X., Bouvet P. (2015). The roles of nucleolin subcellular localization in cancer. *Biochimie*, 113, 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.023>
- Berman H. M., Westbrook J., Feng Z., Gilliland G., Bhat T. N., Weissig H., Shindyalov I. N., Bourne P. E. (2000). The Protein Data Bank. *Nucleic Acids Research*, 28(1), 235-242. <https://doi.org/10.1093/nar/28.1.235>
- Berrada M., Serreqi A., Dabbarh F., Owusu A., Gupta A., Lehnert S. (2005). A novel non-toxic camptothecin formulation for cancer chemotherapy. *Biomaterials*, 26(14), 2115-2120. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.06.013>
- Biao L., Qihou W., Jin L., Shiqing H., Bing H. (2007). Study of the effect of berberine on the telomerase activity of human nasopharyngeal carcinoma (NPC) CNE-2. *Shanxi Medical Journal*, 36, 1281-1283.
- Bissantz, C., Kuhn, B., Stahl, M. (2010). A medicinal chemist's guide to molecular interactions. *Journal of Medicinal Chemistry*, 53(14), 5061-5084. <https://doi.org/10.1021/jm100112j>

- Bouvet P., Allain F. H. T., Finger L. D., Dieckmann T., Feigon, J.** (2001). Recognition of pre-formed and flexible elements of an RNA stem-loop by nucleolin. *Journal of Molecular Biology*, 309 (3), 763-775. <https://doi.org/10.1006/jmbi.2001.4691>
- Böhm, H. J., Klebe, G.** (1996). What can we learn from molecular recognition in protein–ligand complexes for the design of new drugs? *Angewandte Chemie* 35(22), 2588-2614. <https://doi.org/10.1002/anie.199625881>
- Brooks B. R., Brooks C. L., Mackerell A. D., Nilsson L., Petrella R. J., Roux B., Won Y., Archontis G., Bartels C., Boresch S., Caffisch A., Cavas L., Cui Q., Dinner A. R., Feig M., Fischer S., Gao J., Hodoscek M., Im W., Lazaridis T., Ma J., Ovchinnikov V., Paci E., Pastor R. W., Post C. B., Pu J. Z., Schaefer M., Tidor, B., Venable R. W., Woodcock H. L., Wu X., Yang W., York D. M., Karplus M.** (2009). CHARMM: The biomolecular simulation program. *Journal of Computational Chemistry*, 30(10), 1545-1614. <https://doi.org/10.1002/jcc.21287>
- Bugler B., Caizergues-Ferrer M., Bouche G., Bourbon H., Amalric F.** (1982). Detection and localization of a class of proteins immunologically related to a 100-KDa nucleolar protein. *European Journal of Biochemistry*, 128(2-3), 475-480. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1982.tb06989.x>
- Chen Z., Xu X.** (2016). Roles of nucleolin: Focus on cancer and anti-cancer therapy. *Saudi Medical Journal*, 37(12), 1312-1318. <https://doi.org/10.15537/smj.2016.12.15972>
- Chintharlapalli S., Papineni S., Ramaiah S. K., Safe S.** (2007). Betulinic acid inhibits prostate cancer growth through inhibition of specificity protein transcription factors. *Cancer Research*, 67(6), 2816-2823. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-06-3735>
- Choudhury A., Das N. C., Patra R., Bhattacharya M., Ghosh P., Patra B. C., Mukherjee S.** (2021). Exploring the binding efficacy of ivermectin against the key proteins of SARS-CoV-2 pathogenesis: an *in silico* approach. *Future Virology*, 16 (4), 277-291. <https://doi.org/10.2217/fvl-2020-0342>
- Daina A., Zoete V.** (2016). A BOI-LED-Egg to Predict Gastrointestinal Absorption and Brain Penetration of Small Molecules. *Chemi Med Chem*, 11(11), 1117-1121. <https://doi.org/10.1002/cmdc.20160018>
- Daina A., Michielin O., Zoete V.** (2014). iLOGP: A Simple, Robust, and Efficient Description of n-Octanol/Water Partition Coefficient for Drug Design Using the GB/SA Approach. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 54(12), 3284-3301. <https://doi.org/10.1021/ci500467k>
- Daina A., Michielin O., Zoete V.** (2017). SwissADME: A free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules. *Scientific Reports*, 7(1), 42717. <https://doi.org/10.1038/srep42717>
- Dallakyan S., Olson A. J.** (2015). *Small Molecule Library Screening by Docking with PyRx*. En J. E. Hempel, C. H. Williams, & C. C. Hong (Eds.), *Chemical Biology: Methods and Protocols* (pp. 243-250). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2269-7_19
- Dassault Systèmes BIOVIA.** (2019). *Discovery Studio Visualizer, version 20.1*, San Diego: Dassault Systèmes.
- De Amorim H. L. N., Cáceres R. A., Netz P. A.** (2008). Linear interaction energy (LIE) method in lead discovery and optimization. *Current Drug Targets*, 9(12), 1100-1105. <https://doi.org/10.2174/138945008786949360>
- Dunn O. J.** (1964). Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, 6(3), 241-252. <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>
- Ginisty H., Sicard H., Roger B., Bouvet P.** (1999). Structure and functions of nucleolin. *Journal of Cell Science*, 112(6), 761-772. <https://doi.org/10.1242/jcs.112.6.761>
- Ginisty H., Amalric F., Bouvet P.** (2001). Two different combinations of RNA-binding domains determine the RNA binding specificity of nucleolin. *Journal of Biological Chemistry*, 276 (17), 14338-14343. <https://doi.org/10.1074/jbc.M011120200>
- Hammer O., Harper D. A. T., Ryan P. D.** (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 9.
- Hansson T., Marelius J., Åqvist J.** (1998). Ligand binding affinity prediction by linear interaction energy methods. *Journal of Computer-Aided Molecular Design*, 12(1), 27-35. <https://doi.org/10.1023/A:1007930623000>
- Hanwell M. D., Curtis D. E., Lonie D. C., Vandermeersch T., Zurek E., Hutchison G. R.** (2012). Avogadro: An advanced semantic chemical editor, visualization, and analysis platform. *Journal of Cheminformatics*, 4(1), 17. <https://doi.org/10.1186/1758-2946-4-17>

- Hopkins A. L., Keserü, G. M., Leeson P. D., Rees D. C., Reynolds C. H.** (2014). The role of ligand efficiency metrics in drug discovery. *Nature Reviews Drug Discovery*, 13(2), 105-121. <https://doi.org/10.1038/nrd4163>
- Hou W., Liu B., Xu H.** (2019). Triptolide: Medicinal chemistry, chemical biology and clinical progress. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 176, 378-392. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2019.05.032>
- Howat S., Park B., Oh I. S., Jin Y. W., Lee E. K., Loake G. J.** (2014). Paclitaxel: biosynthesis, production and future prospects. *New Biotechnology*, 31(3), 242-245. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2014.02.010>
- Hsu W. H., Hsieh Y. S., Kuo H. C., Teng C. Y., Huang H. I., Wang C. J., Yang S. F., Liou Y. S., Kuo W. H.** (2007). Berberine induces apoptosis in SW620 human colonic carcinoma cells through generation of reactive oxygen species and activation of JNK/p38 MAPK and FasL. *Archives of Toxicology*, 81(10), 719-728. <https://doi.org/10.1007/s00204-006-0169-y>
- Humphrey W., Dalke A., Schulten K.** (1996). VMD: Visual molecular dynamics. *Journal of Molecular Graphics*, 14(1), 33-38. [https://doi.org/10.1016/0263-7855\(96\)00018-5](https://doi.org/10.1016/0263-7855(96)00018-5)
- Imanshahidi M. & Hosseinzadeh H.** (2008). Pharmacological and therapeutic effects of Berberis vulgaris and its active constituent, berberine. *Phytotherapy Research*, 22(8), 999-1012. <https://doi.org/10.1002/ptr.2399>
- Islam, M. M., Kumar G. S.** (2008). RNA targeting by small molecule alkaloids: studies on the binding of berberine and palmatine to polyribonucleotides and comparison to ethidium. *Journal of Molecular Structure*, 875(1-3), 382-391. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2007.05.004>
- Jabbarzadeh Kaboli P., Leong M. P. Y., Ismail P., Ling K. H.** (2019). Antitumor effects of berberine against EGFR, ERK1/2, P38 and AKT in MDA-MB231 and MCF-7 breast cancer cells using molecular modelling and in vitro study. *Pharmacological Reports*, 71(1), 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.pharep.2018.07.005>
- Jo S., Kim T., Iyer V. G., Im W.** (2008). CHARMM-GUI: a web-based graphical user interface for CHARMM. *Journal of Computational Chemistry*, 29(11), 1859-1865. <https://doi.org/10.1002/jcc.20945>
- Johnson L., Swie Goping I., Rieger A., Mane J., Huzil T., Banerjee A., Luduena R., Hassani B., Winter P., Tuszynski A. J.** (2017). Novel colchicine derivatives and their anti-cancer activity. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 17(22), 2538-2558. <https://doi.org/10.2174/1568026617666170104143618>
- Jorgensen W. L., Chandrasekhar J., Madura J. D., Impey R. W., Klein M. L.** (1983). Comparison of simple potential functions for simulating liquid water. *The Journal of Chemical Physics*, 79(2), 926-935. <https://doi.org/10.1063/1.445869>
- Khazir J., Mir B. A., Pilcher L., Riley D. L.** (2014). Role of plants in anticancer drug discovery. *Phytochemistry Letters*, 7, 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2013.11.010>
- Kim J. S., Oh D., Yim M. J., Park J. J., Kang K. R., Cho I. A., Moon S. M., Oh J. S., You J. S., Kim C. S., Kim D. K., Lee S. Y., Lee G. J., Im H. J., Kim S. G.** (2015). Berberine induces FasL-related apoptosis through p38 activation in KB human oral cancer cells. *Oncology Reports*, 33(4), 1775-1782. <https://doi.org/10.3892/or.2015.3768>
- Kim S., Lee J., Jo S., Brooks III C. L., Lee H. S., Im W.** (2017). CHARMM-GUI ligand reader and modeler for CHARMM force field generation of small molecules. *Journal of Computational Chemistry*, 38, 1879-1886. <https://doi.org/10.1002/jcc.24829>
- Kim S., Thiessen P. A., Bolton E. E., Chen J., Fu G., Gindulyte A., Han L., He J., He S., Shoemaker, B. A., Wang J., Yu B., Zhang J., Bryant S. H.** (2016). PubChem Substance and Compound data-bases. *Nucleic Acids Research*, 44(D1), D1202-D1213. <https://doi.org/10.1093/nar/gkv951>
- Kruskal W. H. & Wallis W. A.** (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Lee J., Cheng X., Swails J. M., Yeom M. S., Eastman P. K., Lemkul J. A., Wei S., Buckner J., Jeong J. C., Qi Y., Jo S., Pande V. S., Case D. A., Brooks C. L., Mac-Kerell A. D., Klauda J. B., Im W.** (2016). CHARMM-GUI Input Generator for NAMD, GROMACS, AMBER, OpenMM, and CHARMM/OpenMM Simulations Using the CHARMM36 Additive Force Field. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 12(1), 405-413. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.5b00935>
- Lin S. S., Chung J. G., Lin J. P., Chuang J. Y., Chang W. C., Wu J. Y., Tyan Y. S.** (2005). Berberine inhibits arylamine N-acetyltransferase activity and gene expression in mouse leukemia L 1210 cells. *Phytomedicine*, 12(5), 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2003.11.008>

- Lipinski, C. A., Lombardo, F., Dominy, B. W., Feeney, P. J.** (2001). Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 46, 3-26. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(00\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(00)00129-0)
- Liu, X., Wang, K., Duan, N., Lan, Y., Ma, P., Zheng, H., Li, J., Hua, Z. C.** (2015). Computational prediction and experimental validation of low-affinity target of triptolide and its analogues. *RSC advances*, 5(44), 34572-34579. <https://doi.org/10.1039/C4RA17009A>
- Liu, H., Hou, T.** (2016). CaFE: A tool for binding affinity prediction using end-point free energy methods. *Bioinformatics*, 32(14), 2216-2218. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btw215>
- Liu, H., Shen, M., Zhao, D., Ru, D., Duan, Y., Ding, C., Li, H.** (2019). The effect of triptolide-loaded exosomes on the proliferation and apoptosis of human ovarian cancer SKOV3 cells. *BioMed Research International*, 2019, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2019/2595801>
- Losfeld M. E., El Khoury D., Mariot P., Carpentier M., Krust B., Briand J. P., Mazurier J., Hovanessian A. G., Legrand, D.** (2009). The cell surface expressed nucleolin is a glycoprotein that triggers calcium entry into mammalian cells. *Experimental Cell Research*, 315(2), 357-369. <https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2008.10.039>
- Meng G. Z., Xiao S. J., Zeng S. E., Li Y. Q.** (2011). Downregulation of cell-surface-expressed nucleolin inhibits the growth of hepatocellular carcinoma cells *in vitro*. *Zhonghua zhong liu za zhi [Chinese journal of oncology]*, 33 (1), 23-27.
- Onawole A. T., Kolapo T. U., Sulaiman K. O., Adegoke R. O.** (2018). Structure based virtual screening of the Ebola virus trimeric glycoprotein using consensus scoring. *Computational Biology and Chemistry*, 72, 170-180. <https://doi.org/10.1016/j.compbiolchem.2017.11.006>
- Palmieri A., Scapoli L., Iapichino A., Mercolini L., Mandrone M., Poli F., Gianni A. B., Baserga C., Martinelli M.** (2019). Berberine and *Tinospora cordifolia* exert a potential anticancer effect on colon cancer cells by acting on specific pathways. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, 33, 1-10. <https://doi.org/10.1177/2058738419855567>
- Pan L., Chai H. B., Kinghorn A. D.** (2012). Discovery of new anticancer agents from higher plants. *Frontiers in Bioscience (Schol Ed)*, 4(1), 142-156. <https://doi.org/10.2741/s257>
- Parchehbaf-Jadid A., Zarefatin L., Javadi L.** (2012). A theoretical study on interactions between Berberine as an anticancer drug and DNA. *Journal of the Iranian Chemical Research*, 5(3), 143-153.
- Parrinello, M., Rahman, A.** (1980). Crystal structure and pair potentials: A molecular-dynamics study. *Physical Review Letters*, 45(14), 1196-1199. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.1196>
- Patil, R., Das, S., Stanley, A., Yadav, L., Sudhakar, A., Varma, A. K.** (2010). Optimized hydrophobic interactions and hydrogen bonding at the target-ligand interface leads the pathways of drug-designing. *PloS one*, 5(8), e12029. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012029>
- Phillips J. C., Braun R., Wang W., Gumbart J., Tajkhorshid E., Villa E., Chipot C., Skeel R. D., Kalé L., Schulten K.** (2005). Scalable molecular dynamics with NAMD. *Journal of Computational Chemistry*, 26(16), 1781-1802. <https://doi.org/10.1002/jcc.20289>
- Pisha E., Chai H., Lee I. S., Chagwedera T. E., Farnsworth N. R., Cordell G. A., Beecher C. W. W., Fong H. H. S., Kinghorn A. D., Brown D. M., Wani M. C., Wall M. E., Hieken T. J., Das Gupta T. K., Pezzuto J. M.** (1995). Discovery of betulinic acid as a selective inhibitor of human melanoma that functions by induction of apoptosis. *Nature Medicine*, 1(10), 1046-1051. <https://doi.org/10.1038/nm1095-1046>
- Qin Y., Pang J. Y., Chen W. H., Zhao Z. Z., Liu L., Jiang Z. H.** (2007). Inhibition of DNA topoisomerase I by natural and synthetic mono- and dimeric protoberberine alkaloids. *Chemistry & Biodiversity*, 4(3), 481-487. <https://doi.org/10.1002/cbdv.200790040>
- Rauf A., Abu-Izneid T., Khalil A. A., Imran M., Shah Z. A., Emran T. B., Mitra S., Khan Z., Alhumaydhi F. A., Aljohani A. S. M., Khan I., Rahman M., Jeandet P., Gondal T. A.** (2021). Berberine as a potential anticancer agent: A comprehensive review. *Molecules*, 26(23), 7368. <https://doi.org/10.3390/molecules26237368>
- Santana C. A., Silveira S. D. A., Moraes J. P., Izidoro S. C., de Melo-Minardi R. C., Ribeiro A. J., Tyzack J. D. N., Thornton J. M.** (2020). GRASP: a graph-based residue neighborhood strategy to predict binding sites. *Bioinformatics*, 36(26), i726-i734. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa805>
- Schmidt M. L., Kuzmanoff K. L., Ling-Indeck L., Pezzuto J. M.** (1997). Betulinic acid induces apoptosis in human neuroblastoma cell lines. *European Journal of Cancer*, 33(12), 2007-2010. [https://doi.org/10.1016/S0959-8049\(97\)00294-3](https://doi.org/10.1016/S0959-8049(97)00294-3)
- Seaver B., Smith J. R.** (2004). Inhibition of COX isoforms by nutraceuticals. *Journal of Herbal Pharmacotherapy*, 4(2), 11-18. https://doi.org/10.1080/J157v04n02_02

- Serin G., Joseph G., Ghisolfi L., Bauzan M., Erard M., Amalric F., Bouvet P.** (1997). Two RNA-binding domains determine the RNA-binding specificity of nucleolin. *Journal of Biological Chemistry*, 272(20), 13109-13116. <https://doi.org/10.1074/jbc.272.20.13109>
- Shen G., Jeong W. S., Hu R., Kong A. N. T.** (2005). Regulation of Nrf2, NF- κ B, and AP-1 signaling pathways by chemopreventive agents. *Antioxidants & redox signaling*, 7(11-12), 1648-1663. <https://doi.org/10.1089/ars.2005.7.1648>
- Sun Y., Xun K., Wang Y., Chen X.** (2009). A systematic review of the anticancer properties of berberine, a natural product from Chinese herbs. *Anti-Cancer Drugs*, 20(9), 757-769. <https://doi.org/10.1097/CAD.0b013e328330d95b>
- Tajrishi M. M., Tuteja R., Tuteja N.** (2011). Nucleolin: The most abundant multifunctional phosphoprotein of nucleolus. *Communicative & Integrative Biology*, 4(3), 267-275. <https://doi.org/10.4161/cib.4.3.14884>
- Thurnher D., Turhani D., Pelzmann M., Wannemacher B., Knerer B., Formanek M., Wacheck V., Selzer E.** (2003). Betulinic acid: a new cytotoxic compound against malignant head and neck cancer cells. *Head & Neck: Journal for the Sciences and Specialties of the Head and Neck*, 25 (9), 732-740. <https://doi.org/10.1002/hed.10231>
- Trott O., Olson A. J.** (2010). AutoDock Vina: Improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 31(2), 455-461. <https://doi.org/10.1002/jcc.21334>
- Vanommeslaeghe K., Hatcher E., Acharya C., Kundu S., Zhong S., Shim J., Darian E., Guvench O., Lopes P., Vorobyov I., Mackerell A. D.** (2010). CHARMM general force field: A force field for druglike molecules compatible with the CHARMM all-atom additive biological force fields. *Journal of Computational Chemistry*, 31(4), 671-690. <https://doi.org/10.1002/jcc.21367>
- Vasaturo M., Cotugno R., Fiengo L., Vinegoni C., Dal Piaz F., De Tommasi N.** (2018). The anti-tumor diterpene oridonin is a direct inhibitor of Nucleolin in cancer cells. *Scientific reports*, 8(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35088-x>
- Volkamer A., Kuhn D., Grombacher T., Rippmann F., Rarey M.** (2012). Combining Global and Local Measures for Structure Based Druggability Predictions. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 52(2), 360-372. <https://doi.org/10.1021/ci200454v>
- Walters, W. P.** (2012). Going further than Lipinski's rule in drug design. *Expert opinion on drug discovery*, 7(2), 99-107. <https://doi.org/10.1517/17460441.2012.648612>
- Wang J., Wu J., Li X., Liu H., Qin J., Bai Z., Chi B., Chen X.** (2018). Identification and validation nucleolin as a target of curcumol in nasopharyngeal carcinoma cells. *Journal of Proteomics*, 182, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2018.04.025>
- Wang N., Tan H. Y., Li L., Yuen M. F., Feng Y.** (2015). Berberine and Coptidis Rhizoma as potential anticancer agents: Recent updates and future perspectives. *Journal of Ethnopharmacology*, 176, 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.10.028>
- Watanabe T., Hirano K., Takahashi A., Yamaguchi K., Beppu M., Fujiki H., Suganuma M.** (2010). Nucleolin on the cell surface as a new molecular target for gastric cancer treatment. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 33(5), 796-803. <https://doi.org/10.1248/bpb.33.796>
- Wei, W., Rasul, A., Sadiqa, A., Sarfraz, I., Hussain, G., Nageen, B., Liu, X., Watanabe, N., Selamoglu, Z., Ali, M., Li, X., Li, J.** (2019). Curcumol: from plant roots to cancer roots. *International Journal of Biological Sciences*, 15(8), 1600-1609. <https://doi.org/10.7150/ijbs.34716>
- Wei, Z. L., Juan, W., Tong, D., Juan, L. X., Sa, L. Y., Jie, H. F. M., Xiao, G., Xiang, L. G., Jie, H. M., Xu, C.** (2023). Curcumol inhibits breast cancer growth via NCL/ER α 36 and the PI3K/AKT pathway. *Food & Function*, 14 (2), 74-885. <https://doi.org/10.1039/d2fo02387c>
- Wick W., Grimmel C., Wagenknecht B., Dichgans J., Weller M.** (1999). Betulinic acid-induced apoptosis in glioma cells: A sequential requirement for new protein synthesis, formation of reactive oxygen species, and caspase processing. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 289(3), 1306-1312.
- Wise J. F., Berkova Z., Mathur R., Zhu H., Braun F. K., Tao R. H., Sabichi A. L., Ao X., Maeng H., Samaniego F.** (2013). Nucleolin inhibits Fas ligand binding and suppresses Fas-mediated apoptosis in vivo via a surface nucleolin-Fas complex. *Blood, The Journal of the American Society of Hematology*, 121(23), 4729-4739. <https://doi.org/10.1182/blood-2012-12-471094>
- Yan P., Sun X.** (2018). Triptolide: A new star for treating human malignancies. *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, 14(9), 271-275. <https://doi.org/10.4103/0973-1482.235340>
- Zhou, P., Huang, J., Tian, F.** (2012). Specific noncovalent interactions at protein-ligand interface: implications for rational drug design. *Current Medicinal Chemistry*, 19(2), 226-238. <https://doi.org/10.2174/092986712803414150>

Artículo original

Predicción del ciclo solar 25 mediante modelos ARIMA y redes neuronales LSTM

Prediction of solar cycle 25 using ARIMA models and LSTM neural networks

Samuel Tomas¹, Oliver Saavedra², Israel Espinoza¹

¹Departamento de Ciencias Exactas, Universidad Privada Boliviana, Cochabamba, Bolivia

²Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Privada Boliviana, Cochabamba, Bolivia

Resumen

Se realizó un estudio para predecir el número de manchas solares en el Ciclo Solar 25 mediante el uso de dos modelos: un modelo de redes neuronales recurrentes Long short-term memory (LSTM) y un modelo Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA). Los datos utilizados para entrenar los modelos fueron obtenidos del sitio web del Centro Mundial de Datos SILSO, del Real Observatorio de Bélgica en Bruselas, desde 1749 hasta 2018. Nuestro modelo LSTM demostró un rendimiento excepcional (RMSE=3,6) en comparación con el mejor modelo ARIMA (RMSE=32,6). Esto demostró que nuestro modelo LSTM es significativamente más preciso en términos de predicción, con una mejora del 89% en la reducción del RMSE. Según nuestro modelo LSTM, se prevé que el número máximo de manchas solares en el Ciclo Solar 25 ocurra en marzo de 2025, alcanzando un valor máximo de 182 manchas solares. En contraste, el modelo ARIMA predice que el máximo se alcanzará en diciembre de 2024, con un valor máximo de 99 manchas solares.

Palabras clave: Ciclo Solar 25; Manchas solares; Redes neuronales recurrentes; Predicción.

Abstract

A study was conducted to predict the number of sunspots in Solar Cycle 25 using two models: a Long short-term memory (LSTM) recurrent neural network model and an autoregressive integrated moving average (ARIMA) model. The data used to train the models was obtained from the website of the World Data Center SILSO, Royal Observatory of Belgium in Brussels, from 1749 to 2018. Our LSTM model demonstrated exceptional performance (RMSE=3.6) compared to the best ARIMA model (RMSE=32.6). This showed that our LSTM model is significantly more accurate in terms of prediction, with an 89% improvement in RMSE reduction. According to our LSTM model, the maximum number of sunspots in Solar Cycle 25 is expected to occur in March 2025, reaching a maximum value of 182 sunspots. In contrast, the ARIMA model predicts that the maximum will be reached in December 2024, with a maximum value of 99 sunspots.

Keywords: Solar Cycle 25; Sunspots; Recurrent neural networks; Prediction.

Introducción

La actividad solar no sólo afecta al clima espacial, sino que también tiene un impacto directo en la vida en la Tierra **Hathaway**, 2015; **Pulkkinen**, 2007. Las llamaradas solares y las eyecciones de masa coronal pueden causar daños en los sistemas de energía y comunicaciones **Gour et al.**, 2021; **Lybekk et al.**, 2012; **Solanki**, 2003; **Walterscheid**, 1989 como se ha visto en lo ocurrido en el año 1859, cuando el Sol estuvo muy activo y expulsó partículas muy cargadas que sobrecargaron las redes telegráficas, dejándolas inutilizables. Tal fue el impacto de estas partículas cargadas que se pudieron observar auroras boreales incluso en lugares poco habituales como Cuba, Madrid y Florida. Este evento es conocido en la comunidad de física solar como el evento Carrington, en honor al astrónomo inglés

Citación: Tomas S, Saavedra O, Espinoza I. Predicción del ciclo solar 25 mediante modelos ARIMA y redes neuronales LSTM. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):400-411, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1849>

Editor: Santiago Vargas Domínguez

***Correspondencia:**

Samuel Tomas; stomas@upb.edu

Recibido: 19 de diciembre de 2022

Aceptado: 3 de abril de 2023

Publicado en línea: 19 de abril de 2023



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

Richard Carrington, quien observó y registró el evento en detalle **Cliver & Dietrich**, 2013; **Moreno Cárdenas et al.**, 2016. Otro evento más reciente se registró en 1989, cuando una tormenta solar provocó un apagón en Quebec, y en 2003, cuando interrumpió las comunicaciones satelitales. Además, se ha descubierto que los ciclos solares también tienen efectos en la salud humana **Azcárate et al.**, 2016, como el aumento de la incidencia de enfermedades cardíacas y accidentes cerebrovasculares durante los máximos solares. Es esencial tener una predicción precisa de la actividad solar para tomar precauciones y minimizar los daños en las tecnologías y la salud humana **Juckett & Rosenberg**, 1993. Las implicaciones de la actividad solar son significativas y afectan a múltiples áreas de la vida en la Tierra, lo que subraya la importancia de seguir investigando en esta área.

La actividad solar se mide comúnmente a través del número de manchas solares **Usoskin**, 2017, lo cual ha sido registrado públicamente desde 1749. Para predecir el número de manchas solares, se han utilizado varias técnicas tanto métodos de aprendizaje no profundo como el modelo Autoregressive Integrated Moving Average ARIMA **Box & Jenkins**, 1976, como de aprendizaje profundo como Long Short-Term Memory LSTM **Hochreiter & Schmidhuber**, 1997, siendo estos últimos preferidos debido a su capacidad para extraer representaciones complejas de los datos. A pesar de que existen varios métodos para la predicción del número de manchas solares los modelos ARIMA y los métodos de aprendizaje profundo como LSTM son los más comúnmente utilizados debido a su capacidad para modelar patrones complejos en los datos **Han et al.**, 2019; **Li et al.**, 2021. Además, estos modelos han demostrado tener un alto grado de precisión en la predicción del número de manchas solares, lo que los hace valiosos para la toma de decisiones en diversas áreas que dependen de la actividad solar, como la energía y las comunicaciones.

Entre algunas investigaciones recientes en el campo de la predicción del número de manchas solares, podemos destacar el trabajo realizado por **Benson et al.**, 2020 en el que combinaron redes neuronales WaveNet y Long Short-Term Memory (LSTM) para predecir el número de manchas solares a partir de datos de series de tiempo desde 1749 hasta 2019. Los resultados de su modelo indican que el próximo Ciclo Solar 25 tendrá un número máximo de manchas solares cercano a $106 \pm 19,75$.

Por otro lado, **Prasad et al.**, 2022 utilizó el modelo de memoria a largo plazo basado en aprendizaje profundo LSTM para predecir la fuerza y el tiempo máximo del ciclo solar 25. Para ello, empleó datos mensuales del número de manchas solares. Su predicción indica que el Ciclo Solar 25 será más fuerte que el ciclo 24 y más débil que el ciclo 23, alcanzando su pico en agosto de 2023 ± 2 meses con una amplitud de número de manchas solares de $171, 9 \pm 3, 4$, lo que representa un aumento del 47% con respecto al ciclo 24.

Otra investigación interesante es la de **Dani & Sulistiani**, 2019, quienes utilizaron cuatro métodos de regresión de aprendizaje automático diferentes (Regresión Lineal, Bosque Aleatorio, Función de Base Radial y Máquina de Soporte Vectorial) para predecir el número de manchas solares. Los resultados de sus predicciones indican que el máximo del Ciclo Solar 25 se producirá en septiembre de 2023, con un número de manchas solares de $159, 4 \pm 22, 3$.

Finalmente, **Dang et al.**, 2022 y su equipo compararon tres modelos basados en aprendizaje no profundo, cuatro modelos populares de aprendizaje profundo y su modelos de ensamble para predecir el número de manchas solares. Su modelo XGBoost-DL logró el mejor rendimiento de predicción (RMSE = 25,70 y MAE = 19,82), superando al mejor modelo basado en aprendizaje no profundo SARIMA (RMSE = 54,11 y MAE = 45,51) y al mejor modelo de aprendizaje profundo Informer (RMSE = 29,90 y MAE = 22,35). Según este modelo, se espera que el Ciclo Solar 25 alcance su máximo con un número de manchas solares de 133,47 en mayo de 2025.

Si bien se han logrado avances en la predicción de manchas solares para el ciclo 25, todavía existen limitaciones significativas que afectan la calidad de las series históricas utilizadas y la precisión de los indicadores de error RMSE. Por esta razón, es necesario un enfoque más robusto y con datos más completos, utilizando modelos avanzados y técnicas sofisticadas para analizar dichos datos.

En la predicción de series temporales, los modelos LSTM y ARIMA se encuentran entre las herramientas más prometedoras debido a su capacidad para mejorar significativamente la precisión. Los modelos LSTM son especialmente útiles para analizar patrones complejos y de largo plazo en los datos, mientras que los modelos ARIMA son ideales para analizar datos estacionarios y predecir valores futuros basados en patrones históricos.

En este estudio se ha llevado a cabo una comparación exhaustiva de ambos enfoques, LSTM y ARIMA. El objetivo principal es determinar cuál de los dos enfoques es más adecuado para predecir el número de manchas solares durante el ciclo 25.

Se espera que los resultados de este estudio proporcionen una comparación rigurosa de estos dos enfoques de modelado diferentes, lo que permitirá comprender mejor la variabilidad solar y sus efectos en nuestro clima espacial.

Métodos

En esta sección, se describirán los métodos utilizados para llevar a cabo la investigación sobre la predicción de manchas solares.

Modelo ARIMA

Una serie de tiempo es una secuencia de datos observados en momentos sucesivos en el tiempo, que se utilizan para analizar y predecir el comportamiento de un fenómeno en particular. En nuestro caso de estudio, la serie temporal corresponde al número de manchas solares observadas en el sol en períodos de 11 años, que se conocen como ciclos solares. El objetivo es utilizar los datos históricos para hacer una predicción del número de manchas solares en el ciclo solar 25.

El modelo ARIMA es un modelo econométrico utilizado para analizar y predecir series de tiempo **Shumway & Stoffer, 2011**. Se basa en la descomposición de una serie temporal en tres componentes: tendencia, estacionalidad y error. La tendencia representa la evolución a largo plazo de la serie, la estacionalidad describe patrones que se repiten a lo largo del tiempo y el error es la variación aleatoria no explicada por la tendencia y la estacionalidad.

El modelo ARIMA se construye a partir de la combinación de tres modelos básicos: el modelo AR (autorregresivo), el modelo de media móvil (MA) y el modelo de diferenciación (I). El modelo AR se basa en la regresión de la serie temporal en sí misma, es decir, se utiliza información pasada de la serie para predecir valores futuros. El modelo MA se basa en la regresión de la serie de errores, es decir, utiliza la información pasada de los residuos para predecir valores futuros. Finalmente, el modelo de diferenciación se utiliza para transformar una serie no estacionaria en una serie estacionaria. La idea es que, si una serie no es estacionaria, se puede aplicar una diferencia para eliminar la tendencia y la estacionalidad, dejando solo el error aleatorio.

Para aplicar el modelo ARIMA al ciclo solar 25, primero se realiza un análisis exploratorio de los datos históricos de las manchas solares. Se identifica si la serie temporal presenta tendencia y/o estacionalidad y se determina el número de diferencias necesarias para convertir la serie en estacionaria. Luego, se ajusta el modelo ARIMA a los datos estacionarios y se realiza una validación cruzada para evaluar la precisión del modelo en la predicción del número de manchas solares en el ciclo solar 25 **Montgomery et al., 2015**.

Descripción de los datos

Se empleó un conjunto de datos recopilado a partir del número promedio mensual de manchas solares, obtenido del sitio web del Centro Mundial de Datos SILSO, del Real Observatorio de Bélgica en Bruselas, <https://www.sidc.be/silso/> es importante destacar que el conjunto de datos es continuamente actualizado, sin embargo, para los propósitos de esta investigación, se consideró un conjunto de datos con 3240 registros que cubren el período desde enero de 1749 hasta diciembre de 2018.

Posteriormente, se dividió el conjunto de datos en dos grupos: entrenamiento y validación. El grupo de entrenamiento comprendió 2592 registros que cubren desde enero de 1749 hasta enero de 1965. El grupo de validación incluyó 648 registros, desde febrero de 1965 hasta diciembre de 2018.

Para realizar la predicción del ciclo solar 25, se utilizaron dos modelos: Redes neuronales recurrentes LSTM y modelos ARIMA. Se emplearon tanto métodos estadísticos como modelos de aprendizaje profundo para ajustar los datos y predecir el número de manchas solares en el futuro. El objetivo principal es identificar el modelo más preciso en términos de la métrica RMSE, con el fin de realizar pronósticos precisos del número de manchas solares durante el ciclo solar 25, desde enero de 2019 hasta diciembre de 2030. Este ciclo solar es de gran importancia para la comunidad científica, por lo que se busca obtener resultados confiables y precisos en la predicción de las manchas solares durante este período.

Implementación

Para iniciar la preparación de los datos y aplicar el modelo ARIMA, iniciamos con la visualización de la serie de tiempo del número de manchas solares mensuales desde el año 1749 hasta el año 2018, lo cual se puede observar en la **figura 1**. Este enfoque de análisis completo permite capturar tanto las tendencias históricas como las variaciones estacionales y cíclicas de la serie de tiempo, lo que es esencial para mejorar la precisión de las predicciones.

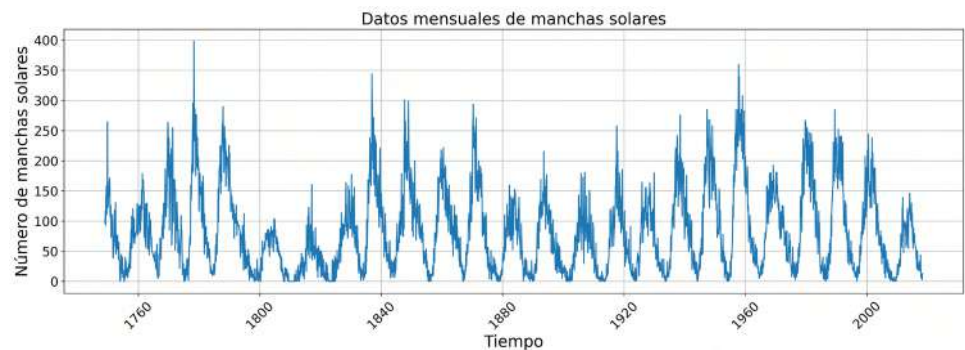


Figura 1. Recuento de manchas solares mensuales, registrado desde el año 1749 hasta el año 2018

Al analizar el gráfico del recuento de manchas solares, ver **figura 1**, se observa una periodicidad en los ciclos solares, con un periodo aproximado de 11 años. Cada ciclo solar tiene una fase de máxima actividad (con un mayor número de manchas solares) y una fase de mínima actividad (con un menor número de manchas solares).

Además, se ha observado una variabilidad en la duración e intensidad de estos ciclos solares a lo largo de la historia, lo que puede afectar la actividad y el clima espacial. Por ejemplo, el ciclo solar número 19 (entre 1954 y 1964) fue uno de los más intensos del siglo XX, con un máximo solar registrado en 1958.

Esta información está respaldada por estudios y observaciones realizadas por la comunidad científica, como el trabajo de **Hathaway et al.**, 1999, que estableció un modelo de predicción de la actividad solar basado en el análisis de los ciclos solares históricos y su duración e intensidad. Además, el estudio de **Eddy**, 1976 sugiere que el mínimo solar registrado entre 1645 y 1715 (conocido como el "Mínimo de Maunder") coincidió con una época de enfriamiento global conocida como la Pequeña Edad de Hielo.

A simple vista, la serie de tiempo del recuento de manchas solares no parece mostrar una tendencia clara a lo largo del tiempo, lo que sugiere que no sería necesario realizar

una diferenciación para estabilizar la varianza. Sin embargo, para confirmar esto, se puede utilizar la prueba estadística de Dickey-Fuller (ADF), que se utiliza para evaluar la estacionariedad de la serie de tiempo.

En la prueba ADF, el valor p indica la probabilidad de que la serie de tiempo sea no estacionaria. Un valor de p menor a 0,05 se considera suficiente para rechazar la hipótesis nula de no estacionariedad. Para la serie de tiempo de manchas solares, se ha encontrado que el valor $p = 0,02$ es menor que 0,05, lo que sugiere que la serie de tiempo es estacionaria y no requiere diferenciación.

Es importante tener en cuenta que la identificación de la estacionariedad es crucial para el modelado de series de tiempo, ya que los modelos ARIMA se basan en la suposición de que la serie de tiempo es estacionaria. Una serie no estacionaria puede llevar a modelos inapropiados y predicciones poco precisas **Box & Jenkins, 1976; Dickey & Fuller, 1979**.

Además de evaluar la estacionariedad de la serie de tiempo, también es importante considerar la homogeneidad de la varianza para asegurarnos de que los errores del modelo no presenten una varianza que cambie con el tiempo. En nuestro caso, hemos utilizado la prueba de homogeneidad de varianza de Levene para evaluar la homocedasticidad de la serie de tiempo del recuento de manchas solares. El resultado indica que la hipótesis nula de homogeneidad de varianza no se rechaza, ya que el valor de significancia obtenido es de $p > 0,66$. Por lo tanto, podemos asumir que la serie de tiempo es homocedástica.

Una vez confirmada la estacionariedad y homogeneidad de varianza de la serie de tiempo de recuento de manchas solares, podemos proceder con la identificación del modelo. En particular, podemos afirmar que la serie tiene media constante y no presenta tendencia, lo que es consistente con la naturaleza cíclica de los datos. Además, como mencionamos previamente, se ha confirmado la homogeneidad de la varianza de la serie. De esta manera, podemos proceder a la identificación del modelo ARIMA que mejor se ajuste a la serie de tiempo.

Identificar el modelo adecuado para una serie de tiempo es un proceso crítico en el análisis de series de tiempo. Existen varias técnicas que se utilizan para la identificación del modelo ARIMA, como el análisis de la función de autocorrelación (ACF) y la función de autocorrelación parcial (PACF), entre otras. Estas técnicas permiten seleccionar los valores apropiados para los parámetros p , d , y q del modelo ARIMA **Box & Jenkins, 1976**.

Para llevar a cabo la identificación del modelo ARIMA más adecuado, dividimos los datos disponibles en dos conjuntos: uno que utilizaremos para el ajuste del modelo y otro que emplearemos para su validación. En concreto, utilizamos el 80% de los datos para el ajuste y el 20% restante para la validación.

Una vez definidos los conjuntos de entrenamiento y validación, procedemos a la identificación del modelo adecuado. Para ello, analizamos las gráficas de la función de autocorrelación (ACF) y de la función de autocorrelación parcial (PACF) ver **figura 2**, las cuales nos permiten determinar los valores de los parámetros p , d y q del modelo ARIMA. En función de las características de las gráficas, se pueden identificar distintos modelos que se ajusten a los datos **Abdel-Rahman & Marzouk, 2018**.

Es importante destacar que la elección del modelo final no solo se basa en el análisis de las gráficas **figura 2**, sino que también se tienen en cuenta otros criterios, como el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información bayesiano (BIC), entre otros.

Durante el proceso de identificación del modelo, se llevó a cabo un análisis de las gráficas de autocorrelación y autocorrelación parcial, tal como se muestra en la **figura 2**. Además, se emplearon técnicas como AutoARIMA y Búsqueda en Cuadrícula para encontrar el modelo ARIMA óptimo. En esta última técnica, se estableció un rango de valores para los parámetros p , d y q mediante $p = \text{range}(0, 5)$, $d = \text{range}(0, 5)$ y $q = \text{range}(0, 5)$, respectivamente. Se iteró a través de todas las combinaciones posibles dentro de estos rangos para encontrar el modelo con el valor más bajo de AIC. El número total de iteraciones realizadas fue de 125, lo que permitió la identificación de varios modelos potenciales. En la **tabla 1**, se presentan los modelos más prometedores.

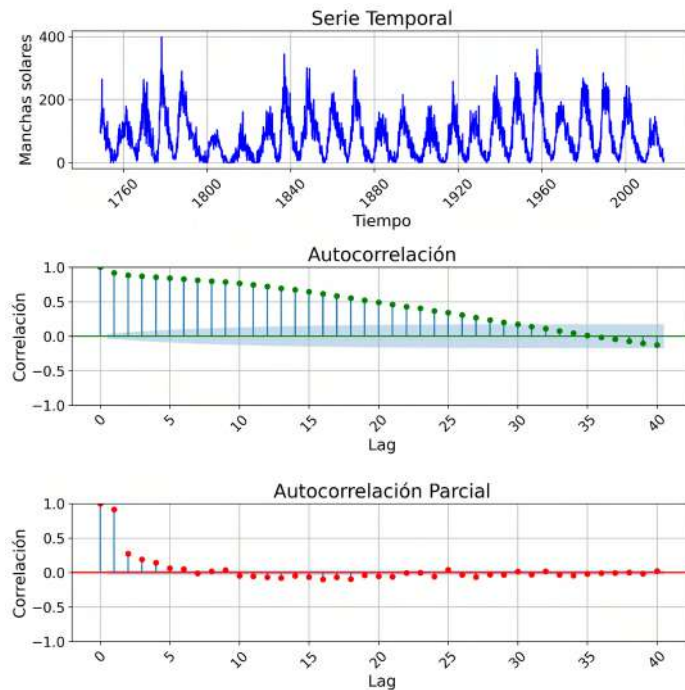


Figura 2. La autocorrelación simple y la autocorrelación parcial de la serie temporal muestran valores cercanos a 1 en los primeros intervalos de tiempo, lo que indica una fuerte correlación entre los valores pasados y presentes de la serie. Este patrón se puede observar fácilmente en el gráfico de autocorrelación, y se utilizó para identificar la presencia de patrones estacionales o de tendencias en la serie temporal, y la autocorrelación parcial se utilizó para eliminar el efecto de la correlación indirecta de los intervalos intermedios, permitiendo una mejor identificación de la verdadera relación entre los valores pasados y presentes de la serie

Tabla 1. Modelos candidatos y sus valores correspondientes de AIC, BIC y métrica RMSE

Modelo ARIMA	Orden (p, d, q)	AIC	BIC	RMSE
ARIMA 1	(3, 0, 2)	10071	10113	32,6
ARIMA 2	(1, 0, 8)	11024	11001	45,2
ARIMA 3	(2, 0, 1)	15071	15113	67

Luego de comparar los modelos candidatos, se seleccionó como modelo óptimo ARIMA (3, 0, 2), ya que presentaba el valor más bajo de AIC (10071) y de BIC (10113).

Para evaluar la calidad del ajuste del modelo, se realizó la prueba de Kolmogorov Smirnov, obteniéndose un valor de significancia de 0,98. Este resultado indica que los residuos del modelo siguen una distribución normal, lo cual es un indicador importante de que el modelo ARIMA es adecuado para la serie de tiempo analizada.

Además de realizar el análisis de normalidad de los residuos, se compararon los modelos utilizando métricas de evaluación de ajuste. Se calculó el RMSE para cada modelo, lo que proporciona una medida de la precisión de las predicciones al cuantificar la diferencia entre las predicciones del modelo y los valores reales. Se encontró que el modelo ARIMA (3,0,2) presentó el valor más bajo de RMSE, lo que indica un mejor ajuste a los datos. Los valores de RMSE y AIC de los tres modelos más representativos se presentan en la **tabla 1**.

A continuación, se muestra una comparación entre las predicciones de tres modelos diferentes: ARIMA(2,0,1), ARIMA(1,0,8) y ARIMA(3,0,2) ver **figura 3**.



Figura 3. Predicción correspondiente a ARIMA(2,0,1) (predicción 3) no se ajusta bien a los datos, mientras que las predicciones correspondientes a ARIMA(1,0,8) (predicción 2) y ARIMA(3,0,2) (predicción 1) tienen un mejor ajuste, según sus valores de RMSE y AIC. Además, se puede visualizar un mejor ajuste en el gráfico para estas dos últimas predicciones.

Estos resultados indican que el modelo ARIMA (3,0,2) presenta el mejor ajuste en la serie temporal analizada.

Resultados del modelo ARIMA

La elección del modelo ARIMA (3, 0, 2) como el mejor modelo de pronóstico se basó en su desempeño sobresaliente en las métricas de evaluación, como el menor RMSE y los mejores valores de AIC y BIC en comparación con los otros modelos considerados. Además, esta elección se alinea con la metodología de **Box & Jenkins**, 1976. Por lo tanto, se presenta a continuación la **figura 4** que muestra tanto los valores observados de la serie como las predicciones generadas por el modelo ARIMA (3, 0, 2).

En la **figura 4** se muestra la curva estimada de los valores predichos para el número mensual de manchas solares durante el período de 2019-2030. Para obtener estas predicciones se utilizó el modelo ARIMA (3, 0, 2) ajustado a los datos mensuales del número de manchas solares desde 1749 hasta 2018. Según los resultados obtenidos, se espera un máximo de 99 manchas solares en diciembre de 2024. Es importante destacar que estas predicciones cuentan con un nivel de confianza del 95%, lo que indica que hay una buena probabilidad de que los resultados sean precisos y confiables.



Figura 4. Predicción del número de manchas solares mensuales para el ciclo 25, obtenida mediante modelos ARIMA aplicados al período 2019-2030

Redes neuronales recurrentes LSTM

Las redes neuronales recurrentes (RNNs) son un tipo de modelo de aprendizaje profundo que se utiliza para analizar datos secuenciales, como el procesamiento del lenguaje natural o la predicción de series de tiempo. Sin embargo, la capacidad de las RNNs para manejar datos a largo plazo se ve comprometida por el problema del gradiente que desaparece, que ocurre cuando el gradiente se hace cada vez más pequeño a medida que se propaga hacia atrás en la red.

Para superar este problema, **Hochreiter & Schmidhuber**, 1997 propusieron la memoria a corto y largo plazo (LSTM), una variante de las RNNs que ha demostrado ser efectiva para el procesamiento de datos secuenciales a largo plazo. La arquitectura de LSTM se compone de celdas que contienen unidades de procesamiento y una memoria a largo plazo que puede ser controlada por tres puertas diferentes: entrada, salida y olvido **Goodfellow et al.**, 2016.

El modelo matemático de LSTM se define como una función no lineal que transforma la entrada actual, el estado anterior y la memoria a largo plazo en una salida y un estado actualizado **Hochreiter & Schmidhuber**, 1997. El cálculo de esta función implica la operación de multiplicación de matrices y la aplicación de funciones de activación, como la función sigmoide o la tangente hiperbólica.

Para el desarrollo del estudio, se emplearon redes neuronales LSTM. El procesamiento de los datos y el entrenamiento del modelo se realizaron utilizando diversas herramientas y bibliotecas en Python.

Se utilizó una unidad de procesamiento gráfico (GPU) Nvidia GeForce GTX 1080Ti, y se aprovechó la potencia de procesamiento de la GPU mediante la biblioteca de programación paralela CUDA de Nvidia. Asimismo, se utilizó la biblioteca de redes neuronales CudNN de Nvidia para acelerar el procesamiento de redes neuronales en la GPU, permitiendo así el procesamiento rápido y eficiente de los datos y el entrenamiento del modelo LSTM.

Para la visualización de los datos y los resultados de las predicciones, se importaron las bibliotecas NumPy, Pandas, TensorFlow, Keras y matplotlib.pyplot. El paquete pandas-datareader se empleó para descargar y cargar los datos de manchas solares, mientras que Pandas se utilizó para la limpieza y preparación de los mismos para su uso en el modelo LSTM. Por otro lado, Numpy se empleó para la manipulación de matrices y operaciones matemáticas, así como para la preparación de datos y la realización de cálculos en el modelo LSTM.

TensorFlow se utilizó para construir y entrenar modelos de aprendizaje profundo, haciendo uso de la GPU y las bibliotecas CUDA y CudNN para acelerar el entrenamiento del modelo. Para la construcción de modelos de redes neuronales en Keras, se empleó la sub-biblioteca tensorflow.keras.models, mientras que la subbiblioteca tensorflow.keras.layers se utilizó para definir las diferentes capas de redes neuronales en el modelo LSTM. Para la búsqueda de hiperparámetros y la optimización de modelos, se utilizó la herramienta Keras-tuner. Además, se empleó el módulo math de Python para funciones matemáticas básicas, y la biblioteca sklearn.metrics para evaluar el rendimiento del modelo LSTM en la predicción de manchas solares.

Descripción de los datos

En el preprocesamiento de los datos de las manchas solares, utilizaremos datos históricos del ciclo solar y diseñaremos una red neuronal recurrente LSTM capaz de aprender y modelar las relaciones temporales en los datos.

Para asegurar que la red neuronal aprenda de manera eficiente, normalizamos los datos utilizando la técnica de normalización Min-Max, la cual se define mediante la fórmula

$$X_{std} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

Este proceso escala los datos a un rango de valores entre 0 y 1, como se muestra en la **figura 5**, y es fundamental para llevar todas las entradas de la red a magnitudes similares y mejorar el desempeño de la red neuronal.

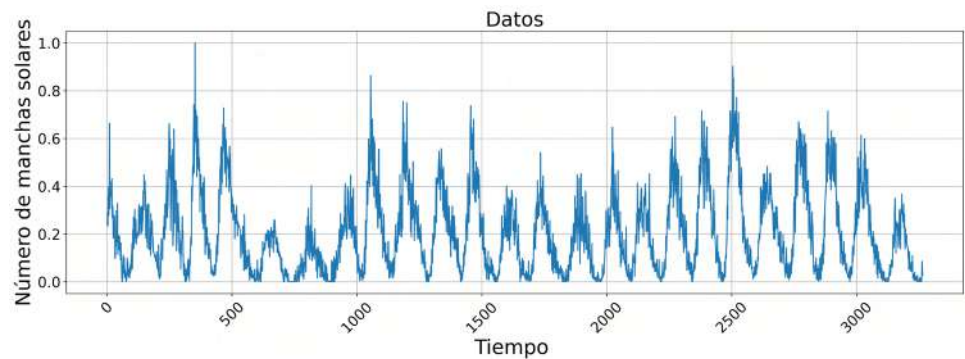


Figura 5. Serie de datos normalizados del número de manchas solares registradas en el sol desde 1749 hasta 2021

Para la construcción de la red neuronal LSTM, se dividió el conjunto de datos de manchas solares en dos grupos: el conjunto de entrenamiento y el conjunto de validación. El conjunto de entrenamiento se seleccionó de manera consecutiva y ordenada, representando el 80% de la serie temporal, y se utilizó para el diseño y construcción de la red neuronal.

Para evaluar la capacidad de generalización de la red, se reservó el 20% restante de los datos, constituyendo el conjunto de validación. Este conjunto de datos se utilizó para evaluar el desempeño de la red neuronal en la detección de patrones en la serie temporal que no se encontraban en el conjunto de entrenamiento **Benson et al., 2020**.

Para implementar nuestro modelo de predicción del ciclo solar 25, hemos utilizado la biblioteca Keras en Python "Keras, the Python deep learning API" <https://keras.io/api/>. En particular, hemos utilizado la función Sequential de Keras para construir nuestro modelo de red neuronal, y hemos incorporado capas LSTM para capturar las dependencias temporales en los datos de la serie de tiempo **Hochreiter & Schmidhuber, 1997**. Además, para convertir el problema de serie de tiempo en una tarea de regresión, hemos utilizado variables de rezago y sin rezago en nuestro modelo **Lütkepohl, 2005**. Al tomar en cuenta las variables de rezago y sin rezago, hemos transformado el problema de serie de tiempo en una tarea de regresión y ajustado los pesos de la red neuronal para predecir el número de manchas solares en el futuro. El entrenamiento de un modelo LSTM implica ajustar los parámetros del modelo utilizando datos de entrenamiento, con el objetivo de que el modelo pueda hacer predicciones precisas en nuevos datos. En este proceso, se utilizan diferentes arquitecturas de capas LSTM y una capa densa con diferentes números de neuronas. La optimización de los parámetros se realiza mediante el método de optimización Adam, que es un algoritmo de descenso de gradiente estocástico que actualiza los pesos de las capas de la red neuronal. La función de pérdida utilizada es el RMSE **Goodfellow et al., 2016**. Se utiliza el buscador automático de hiperparámetros Tuner para seleccionar los mejores hiperparámetros del modelo. Durante el proceso de entrenamiento, se evalúa la pérdida en el conjunto de prueba para comparar el desempeño de cada modelo. En nuestro caso, se determinó que el número de épocas para obtener los mejores resultados fue de 500 y el tamaño del lote fue de 120. Además el entrenamiento del modelo LSTM ha mostrado una mejora constante en la capacidad predictiva a medida que se han ajustado los parámetros durante las diferentes épocas de entrenamiento.

Para evaluar el desempeño del modelo, se utilizaron los datos de validación que no se utilizaron en el entrenamiento. El modelo alcanzó una precisión del 90, 5% en la predicción del ciclo solar 25.

Resultados del modelo LSTM

En esta sección se llevó a cabo la predicción del ciclo solar 25 utilizando el modelo de red neuronal LSTM previamente entrenado con los datos normalizados de manchas solares

desde 1749 hasta diciembre de 2018. La selección de hiperparámetros y la validación del modelo propuesto fueron realizadas previamente. Se predijo el comportamiento del ciclo solar 25 para los próximos 11 años, es decir, hasta diciembre de 2030.

En la **figura 6** se puede apreciar claramente la predicción realizada por el modelo.

La predicción del modelo LSTM sugiere que el ciclo solar 25 alcanzará su máximo de 182 manchas solares en marzo de 2025, lo que proporciona información valiosa para la investigación del clima espacial y la predicción de eventos solares.

Además, al comparar los resultados con el mejor modelo ARIMA con (RMSE=32,6), se encontró que nuestro modelo LSTM tuvo un rendimiento excepcional con un (RMSE=3,6) lo que indica una mejora significativa del 89% en la reducción del RMSE en la predicción. Por lo tanto, se puede afirmar que el modelo LSTM es significativamente más preciso en términos de predicción y puede ser una herramienta útil para pronosticar eventos en series de tiempo similares.

Según la **tabla 2**, se puede concluir que el modelo LSTM ha demostrado ser una técnica de predicción efectiva para las manchas solares. El RMSE de nuestro modelo LSTM fue de 3,6, que es significativamente más bajo que el mejor modelo ARIMA con un RMSE de 32,6. Además, los resultados de la predicción del modelo LSTM son comparables a los de otros autores en términos de RMSE y predicción. Por lo tanto, se puede afirmar que el modelo LSTM es una herramienta útil para pronosticar eventos en series de tiempo similares y es especialmente adecuado para la predicción del ciclo solar 25.

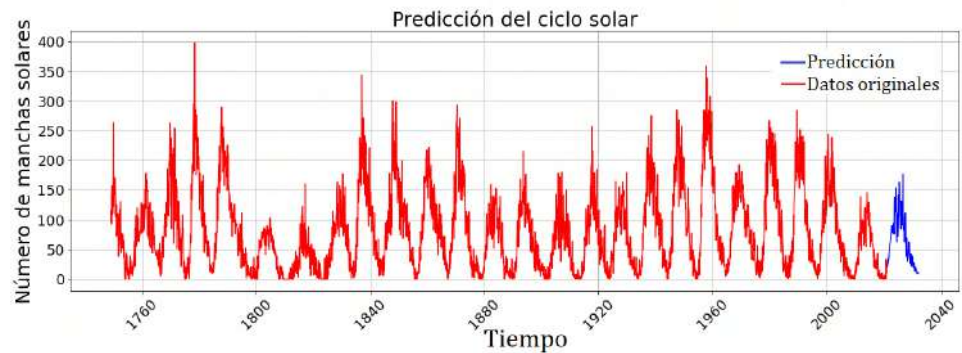


Figura 6. Predicción del ciclo solar 25, basada en datos desde 1749 hasta diciembre de 2018. Se ha pronosticado un período de 11 años hacia el futuro, hasta diciembre de 2030, y se estima que el máximo número de manchas solares será de 182 en marzo de 2025

Tabla 2. Predicciones del ciclo solar 25 utilizando modelos de aprendizaje profundo de diferentes autores

Modelo	RMSE	Predicción	Referencia
WaveNet + LSTM	4,42	106 ± 19,75	Benson <i>et al.</i> , 2020
LSTM	3,4	171,9 ± 3,4	Prasad <i>et al.</i> , 2022
LSTM	35,9	—	Pala & Atici, 2019
LSTM	6,12-2,45	114,3	Wang <i>et al.</i> , 2021
LSTM XGBoost-DL	25,7	133,47	Dang <i>et al.</i> , 2022

Conclusiones

El ciclo solar, caracterizado por la variación en el número de manchas solares, es un fenómeno que ha sido objeto de estudio durante siglos debido a su influencia en nuestro planeta. La capacidad de predecir el número de manchas solares es importante no solo para el estudio del Sol, sino también para las aplicaciones en la industria eléctrica, satelital y de comunicaciones.

Se llevó a cabo un estudio para predecir el número de manchas solares en el Ciclo Solar 25 utilizando dos modelos: un modelo de redes neuronales recurrentes LSTM y el modelo ARIMA. Los resultados mostraron que el modelo LSTM superó significativamente al modelo ARIMA en términos de precisión de predicción, con una mejora del 89% en la reducción del RMSE. El modelo LSTM demostró un rendimiento excepcional, con un RMSE de 3,6, mientras que el modelo ARIMA obtuvo un RMSE de 32,6.

La capacidad predictiva de los modelos se evaluó utilizando la métrica RMSE. Se observó que el modelo de aprendizaje profundo LSTM no tiende a alejarse del valor real a medida que se prolonga en el tiempo, mientras que el modelo estadístico ARIMA muestra una tendencia a alejarse de la serie original a medida que se prolonga en el tiempo, lo que sugiere que es menos adecuado para el pronóstico de la serie.

Finalmente, según el modelo LSTM, se prevé que el número máximo de manchas solares en el Ciclo Solar 25 ocurra en marzo de 2025, alcanzando un valor máximo de 182 manchas solares. En contraste, el modelo ARIMA predice que el máximo se alcanzará en diciembre de 2024, con un valor máximo de 99 manchas solares, este resultado tiene importantes implicaciones para la industria eléctrica, satelital y de comunicaciones que dependen de la actividad solar.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a los revisores anónimos por el tiempo, esfuerzo y conocimiento que han dedicado a la revisión del manuscrito. Sus comentarios y sugerencias han sido extremadamente útiles para mejorar la calidad del trabajo. También expresar el agradecimiento a Gonzalo Vargas por mostrarnos el camino en el apasionante mundo de las manchas solares.

Contribución de los autores

ST, OS e IE planearon y diseñaron el estudio y analizaron la información. Todos los autores participaron en el trabajo de elaboración, la escritura del manuscrito, su revisión y la aprobación de la versión final.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Referencias

- Abdel-Rahman, H. I., Marzouk, B. A.** (2018). Statistical method to predict the sunspots number. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 7(2), 175-179. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2018.08.001>
- Azcárate, T., Mendoza, B., Levi, J.** (2016). Influence of geomagnetic activity and atmospheric pressure on human arterial pressure during the solar cycle 24. *Advances in Space Research*, 58(10), 2116-2125.
- Benson, B., Pan, W. D., Prasad, A., Gary, G. A., Hu, Q.** (2020). Forecasting Solar Cycle 25 Using Deep Neural Networks. *Solar Physics*, 295(5), 65. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01634-y>
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M.** (1976). *Time series analysis: Forecasting and control*. Retrieved February 28, 2023, from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=375102>
- Cliver, E., Dietrich, W.** (2013). The 1859 space weather event revisited: Limits of extreme activity. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, 31-. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013053>

- Dang, Y., Chen, Z., Li, H., Shu, H.** (2022). A comparative study of non-deep learning, deep learning, and ensemble learning methods for sunspot number prediction. *Applied Artificial Intelligence*, 36(1), 2074129.
- Dani, T., Sulistiani, S.** (2019). Prediction of maximum amplitude of solar cycle 25 using machine learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 1231(1), 012022.
- Dickey, D. A., Fuller, W. A.** (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(366a), 427-431. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10482531>
- Eddy, J. A.** (1976). The maunder minimum. *Science*, 192(4245), 1189-1202. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.192.4245.1189>
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A.** (2016). *Deep learning*. MIT press.
- Gour, P. S., Singh, N. P., Soni, S., Saini, S. M.** (2021). Observation of coronal mass ejections in association with sun spot number and solar flares. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1120(1), 012020.
- Han, Z., Zhao, J., Leung, H., Ma, K. F., Wang, W.** (2019). A review of deep learning models for time series prediction. *IEEE Sensors Journal*, 21(6), 7833-7848.
- Hathaway, D. H.** (2015). The Solar Cycle [arXiv:1502.07020 [astro-ph]]. *Living Reviews in Solar Physics*, 12(1), 4. <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>
- Hathaway, D. H., Wilson, R. M., Reichmann, E. J.** (1999). A synthesis of solar cycle prediction techniques. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 104, 22375-22388. <https://doi.org/10.1029/1999JA900313>
- Hochreiter, S., Schmidhuber, J.** (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9, 1735-80. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Juckett, D. A., Rosenberg, B.** (1993). Correlation of human longevity oscillations with sunspot cycles. *Radiation Research*, 133(3), 312-320.
- Li, Q., Wan, M., Zeng, S.-G., Zheng, S., Deng, L.-H.** (2021). Predicting the 25th solar cycle using deep learning methods based on sunspot area data. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(7), 184.
- Lütkepohl, H.** (2005). *New Introduction to Multiple Time Series Analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-27752-1>
- Lybekk, B., Pedersen, A., Haaland, S., Svenes, K., Fazakerley, A. N., Masson, A., Taylor, M., Trotignon, J.-G.** (2012). Solar cycle variations of the cluster spacecraft potential and its use for electron density estimations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A1).
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L., Kulahci, M.** (2015). *Introduction to time series analysis and forecasting*. John Wiley & Sons.
- Moreno Cárdenas, F., Cristancho Sánchez, S., Vargas Domínguez, S.** (2016). The grand aurorae borealis seen in Colombia in 1859. *Advances in Space Research*, 57(1), 257-267. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.08.026>
- Pala, Z., Atici, R.** (2019). Forecasting Sunspot Time Series Using Deep Learning Methods. *Solar Physics*, 294(5), 50. <https://doi.org/10.1007/s11207-019-1434-6>
- Prasad, A., Roy, S., Sarkar, A., Panja, S. C., Patra, S. N.** (2022). Prediction of solar cycle 25 using deep learning based long short-term memory forecasting technique. *Advances in Space Research*, 69(1), 798-813.
- Pulkkinen, T.** (2007). Space Weather: Terrestrial Perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2007-1>
- Shumway, R., Stoffer, D.** (2011). Arima models', time series analysis and its applications.
- Solanki, S. K.** (2003). Sunspots: An overview. *Astronomy & Astrophysics Review*, 11.
- Usoskin, I.** (2017). A history of solar activity over millennia. *Living Review in Solar Physics*, 14, 3.
- Walterscheid, R.** (1989). Solar cycle effects on the upper atmosphere-implications for satellite drag. *Journal of spacecraft and rockets*, 26(6), 439-444.
- Wang, Q.-J., Li, J.-C., Guo, L.-Q.** (2021). Solar cycle prediction using a long short-term memory deep learning model [Publisher: National Astronomical Observatories, CAS and IOP Publishing Ltd.]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(1), 012. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/1/12>

Review article

Paleopalynology in Colombia: A review

Paleopalinología en Colombia: una revisión

Angelo Plata-Torres^{1,2}, Andrés Pardo-Trujillo², Clemencia Gómez-González³,
José Abel Flores¹

¹ Facultad de Ciencias, Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Salamanca, España

² Instituto de investigaciones en Estratigrafía – IIES, Departamento de Ciencias geológicas, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

³ Facultad de Ciencias, Departamento de Geología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Abstract

Palynology is an important tool for establishing age and interpreting paleoenvironments in both continental and marine deposits. This paper provides a summarized overview of the palynological information published for deposits in Colombia ranging from the Paleozoic to the Miocene-Pliocene. We found 111 publications in indexed journals contain palynological data from 511 sections or wells. Palynology of the Paleozoic in Colombia has been mainly studied in the Eastern Llanos; the Triassic-Jurassic is virtually unknown; there are studies on the Cretaceous in the Eastern Cordillera, the Upper Magdalena Valley, and Catatumbo; the Paleogene has been studied in sedimentary rocks of the Llanos foothills, the Eastern Cordillera, the Middle Magdalena Valley, Catatumbo, and in some isolated spots in La Guajira and the Caribbean while the Neogene has been studied in the Amazon, the Eastern Cordillera, and the Llanos foothills. Recent publications for the Caribbean and Pacific regions and a palynological zonation for the Llanos and its basins have been successfully used in other basins in the country. In recent years, the interest of the Colombian government in exploring new areas for hydrocarbon exploration in the Caribbean facilitated a partnership between the National Hydrocarbons Agency and the University of Caldas to conduct palynological studies in deposits ranging from the Late Cretaceous to the Quaternary. Here we present a summary of the main advances in Caribbean palynology.

Keywords: Palynology; Colombia; Colombian Caribbean; Paleozoic; Mesozoic; Cenozoic.

Resumen

La palinología es una herramienta importante para establecer la edad e interpretar los paleoambientes en depósitos tanto continentales como marinos. En esta revisión se presenta de manera resumida la información palinológica publicada sobre depósitos en Colombia que van desde el Paleozoico hasta el Mioceno-Plioceno. Encontramos 111 publicaciones en revistas indexadas que contienen datos palinológicos de 511 secciones o pozos. La palinología del Paleozoico en Colombia se ha estudiado principalmente en los Llanos Orientales; el Triásico-Jurásico es prácticamente desconocido; del Cretácico hay estudios en la cordillera Oriental, el Valle Superior del Magdalena y el Catatumbo; del Paleógeno, en rocas sedimentarias del Piedemonte Llanero, la cordillera Oriental, el Valle Medio del Magdalena y el Catatumbo; además, hay algunos trabajos puntuales en La Guajira y el Caribe, en tanto que el Neógeno cuenta con estudios en el Amazonas, la cordillera Oriental, y el Piedemonte Llanero. Se destaca el incremento de publicaciones recientes sobre el Caribe y el Pacífico. Actualmente está publicada una zonación palinológica de los Llanos Orientales y el piedemonte que se ha empleado con éxito en otras cuencas del país. En los últimos años, el interés del Estado colombiano por conocer nuevas áreas de exploración de hidrocarburos en el Caribe permitió una alianza entre la Agencia Nacional de Hidrocarburos y la Universidad de Caldas, en cuyo marco se han desarrollado estudios palinológicos en depósitos que van desde el Cretácico tardío al Cuaternario, algunos publicados recientemente. El resumen de los principales avances de la palinología en el Caribe colombiano se presenta en esta revisión.

Palabras clave: Palinología; Colombia; Caribe colombiano; Paleozoico; Mesozoico; Cenozoico.

Citation: Plata-Torres A, Pardo-Trujillo A, Gómez-González C, *et al.* Paleopalynology in Colombia: A review. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(183):412-438, abril-junio de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefn.1913>

Editor: Carlos Alberto Jaramillo Muñoz

***Corresponding autor:**

Angelo Plata-Torres;
angelo.plata@ucaldas.edu.co

Received: May 2, 2023

Accepted: May 23, 2023

Published on line: June 23, 2023



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

Introduction

Since the 1940s, paleopalynology, i.e., the study of non-soluble organic matter extracted from sedimentary rocks by chemical methods, has rapidly developed around the world given its biostratigraphic and paleoenvironmental potential, especially in the hydrocarbon industry. Many researchers have contributed to the development of the discipline, among them **Hyde & Williams** (1944), **Faegri & Iversen** (1989), **Traverse** (1988, 2007), **Tyson** (1995), and **Jansonius & McGregor** (1996).

In Colombia, the development of this discipline dates back to the 1950s when the initial geological mapping and stratigraphic work was led by government institutions such as the *Servicio Geológico Nacional* (now *Servicio Geológico Colombiano*). Later, oil and gas companies joined these efforts by investing capital, and, therefore, the advancement of paleopalynology in the country has been closely linked to this industry's interests. As a result, palynological studies in areas with low interest in hydrocarbon exploration have been scarce or absent. However, at least 40 Colombian palynologists, either from the industry or academy, have contributed to the country's paleopalynological knowledge and evolution, although much of the data generated for the industry has not been published because of confidentiality policies (**Pardo et al.**, 2022). To date, there are no paleopalynological studies compiled in the country enabling a general overview of their development and the identification of knowledge gaps that need to be filled. Such a compilation would facilitate the selection of new study areas and the evaluation of existing publications.

In this context, the present study has two main goals: to review and organize the publications on Colombian paleopalynology using as a framework the geological time and the Colombian sedimentary basins, and to summarize the palynological advances in the Caribbean area including the Sinú-San Jacinto and the Cesar-Ranchería Basins.

Method

We collected and reviewed the scientific articles published about Colombian paleo-palynology spanning from the 1950s to the present (**Figures 1-2, table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1913/3370>). The literature was organized in stratigraphic order from the oldest to the most recent age following the Paleozoic (lower-upper), Mesozoic (Triassic-Jurassic and Cretaceous), and Cenozoic (Paleogene and Neogene) eras (**Figures 3-6, table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1913/3370>). We also include a series of 11 plates with micrographs of palynomorphs from the Cretaceous to the Neogene (**Appendix 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1913/3372>) and maps showing the locations of published palynological studies. Using the map of the Colombian sedimentary basins (**Barrero et al.**, 2007), we grouped the basins into sedimentary regions as follows: 1) Pacific and Caribbean (including Guajira, Cesar-Ranchería, Lower Magdalena Valley, Sinú-San Jacinto, and Chocó and Tumaco basins); 2) Western Cordillera; 3) Cauca Valley (including Amagá and Cauca-Patía basins); 4) Central Cordillera; 5) Magdalena Valley (Middle and Upper); 6) Eastern Cordillera (including the Catatumbo basin); 7) Eastern Llanos (including Llanos foothills), and 8) Amazon (including Caguán-Putumayo and Amazon basins) (**Figures 1 a, b and 2**).

Results

The beginnings

In Colombia, the first palynological studies were led by Thomas van der Hammen, who studied sedimentary deposits in the Eastern Cordillera and the Magdalena and Cauca valleys between the 1950s and 1960s. His publications include the basic principles of palynological nomenclature (**van der Hammen**, 1954a), treatises on pollen and spore systematics with the description of morphotypes (**van der Hammen**, 1956a; 1956b; **van der Hammen & García-de Mutis**, 1966), and the recognition of upper Cretaceous and Tertiary palynofloras of Colombia (**van der Hammen**, 1954b; 1957a; 1961). His work laid the foundation for palynological studies in northern South America. However, some of his ideas and part of the proposed nomenclature are not in use or have been updated.

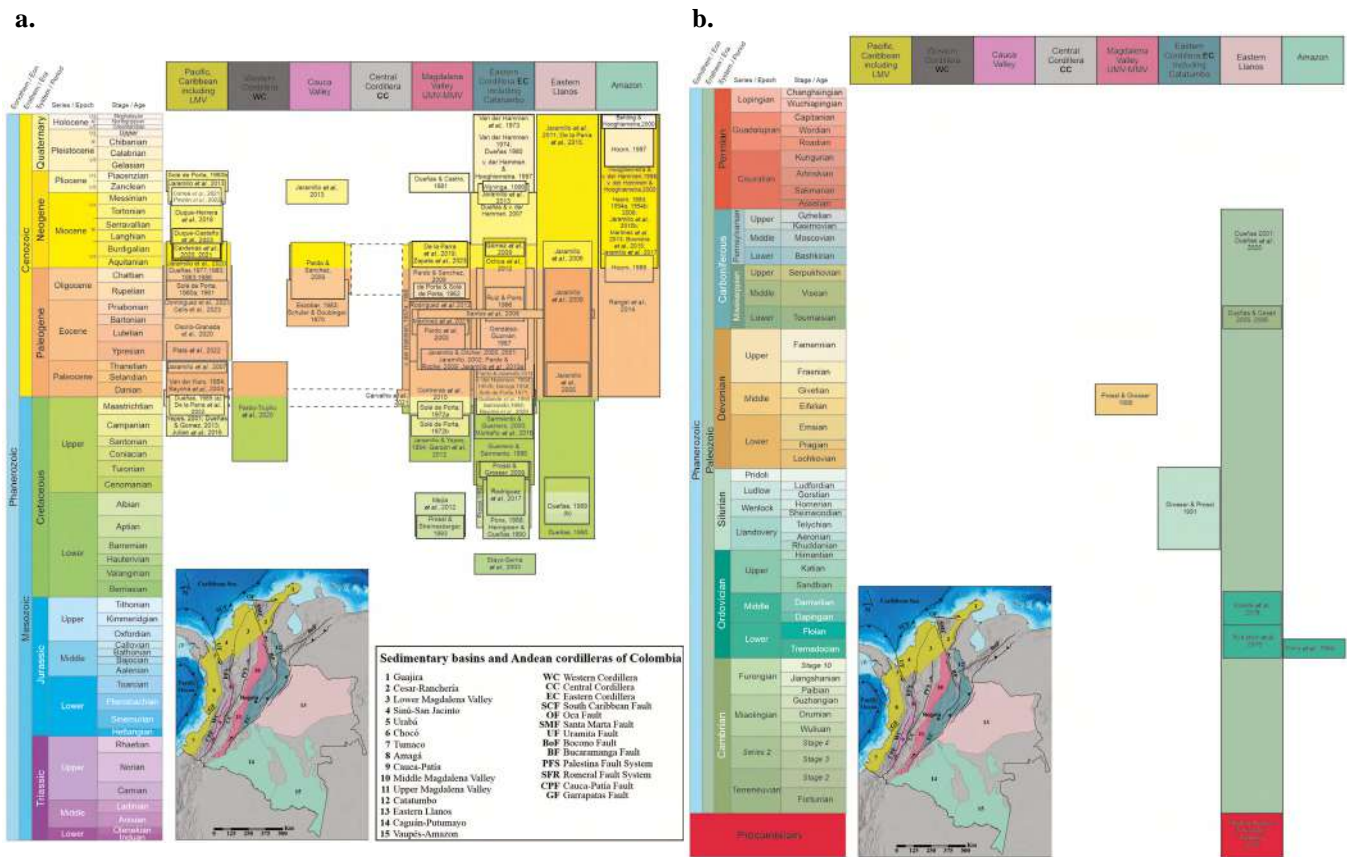


Figure 1. a. Temporal distribution of palynological studies published for the Cretaceous and Cenozoic in Colombia. The regions mentioned in the chart are in different colors on the basin map (modified from **Barrero et al., 2007**). For detailed references, see Table 1s. **b.** Temporal distribution of palynological studies published for the Precambrian and Cenozoic in Colombia. The regions mentioned in the chart are in different colors on the basin map (modified from **Barrero et al., 2007**). For detailed references, see Table 1s.

Palynological zonation

In the late 1950s, the first scheme of pollen and spores stratigraphic distribution in deposits from the Maastrichtian to the Pliocene in the Eastern Cordillera was proposed. Known as the PAF diagram, an abbreviation for palms (P), angiosperms (A), and ferns (F), it related the percentage variations among the different palynological groups to regional changes in flora and, therefore, allowed the subdivision of the sedimentary record into chronostratigraphic units (**van der Hammen, 1957a**) whose validity was questioned (**de Porta & Solé de Porta, 1962**) and is not currently used. Later, **Germeraad et al. (1968)** proposed a zonation for tropical areas encompassing the upper Cretaceous to the Quaternary using palynological data from South America (including Colombia), western Africa, and Borneo. On their part, **Regali et al. (1974)** presented a zonation calibrated with foraminifera and nannofossils spanning the Mesozoic and Cenozoic and based on the palynology of sedimentary basins from Brazil. In Colombia, some palynomorph assemblages are similar to those reported in this zonation. Later, a palynological zonation was proposed for northern South America spanning the Cretaceous and Cenozoic that included palynological data from Colombia (**Muller et al., 1987**). This zonation correlated with others previously proposed (e.g., **Germeraad et al., 1968; Regali et al., 1974**) including those proposed for Guyana by **van der Hammen & Wimstra (1964)** and **Wimstra (1971)** and another one for Africa. For the Miocene, detailed palynological zones have been proposed in Venezuela (**Lorente, 1986**) and the Amazon basin (**Hoorn, 1993**), which are also used in Colombia.

Phanerozoic Cenozoic Mesozoic	Series / Epoch Stage / Age	GERMERAAD ET AL., 1998			REGALI ET AL., 1974	LORENTE 1986	MULLER ET AL., 1987	HOORN 1993	JARAMILLO & RUEDA, 2004	JARAMILLO ET AL., 2011	
					BRASIL: From Paraná to Amapá	VENEZUELA	NORTH OF SOUTH AMERICA ZONES	AMAZON	COLOMBIA	COLOMBIA Eastern Llanos and Llanos Foothills	
		Atlantic Zones	Caribbean Zones	Pan-tropical							
Cenozoic	Quaternary	Holocene									
		Pleistocene									
	Neogene	Pliocene									
		Miocene									
		Oligocene	Chattian								
			Rupelian								
			Phanorian								
			Bartonian								
			Lutetian								
			Ypresian								
Thanetian											
Paleocene											
Mesozoic	Cretaceous	Maastrichtian									
		Upper									
	Lower	Santonian									
		Coniacian									
		Turonian									
		Cenomanian									
		Albian									
		Aptian									
		Barremian									
		Hauterivian									
Valanginian											
Berriasian											

Figure 2. Comparison of palynological zonation from the Cretaceous to the Quaternary proposed for northern South America including those published for Colombia (Jaramillo & Rueda, 2004; Jaramillo et al., 2011).

Cuartas et al. (2009) conducted an evaluation of palynological data from publications and the petroleum information bank (EPIS). They determined that the Eastern Llanos basin has the greatest palynological information followed in order by the Middle (VMM) and Upper Magdalena (VSM) valleys, the Eastern Cordillera, and the Catatumbo basins. Despite the existence of a greater volume of palynological data in the VMM, as of 2021, the number of published palynological works for the Eastern Cordillera has increased. Also, the publication of the first data for the Caribbean, Pacific, and western Colombian areas is notable (Figure 1 a-b). The extensive palynological data from several Colombian basins has allowed for a preliminary palynological zonation spanning from the Aptian to the middle Miocene (Jaramillo & Rueda, 2004) and one for the Cenozoic calibrated with isotopic data and planktonic foraminifera (Jaramillo et al., 2011). These zonation have been tested in various areas of the country with optimal results and have become fundamental tools for hydrocarbon exploration (Jaramillo & Rueda, 2004; Pardo et al., 2022, Plata-Torres et al., 2022). The division of the Oligocene into four palynological zones, for example, is a notable contribution of the zonation proposed for Colombia (Jaramillo & Rueda, 2004; Jaramillo et al., 2011) compared to those published for Northern South America (Figure 2).

Palynology in Colombia through time

Precambrian-Paleozoic

Published studies on the Paleozoic including palynology, lithostratigraphy, and geochemistry on sediments traditionally considered metamorphic have shown a potential for hydrocarbon generation that has recently sparked industry interest as an alternative to acquiring new reserves for the country (Dueñas-Jimenez et al., 2020).

Precambrian rocks are mostly igneous and metamorphic and are distributed mainly in the Orinoquia-Amazon, the Eastern Cordillera, and the Sierra Nevada de Santa Marta (Gómez-Tapias et al., 2015). In the Amazon region, some sedimentary deposits have been reported in the Tunuí Group (Renzone, 1989) and La Pedrera Formation (Galvis et

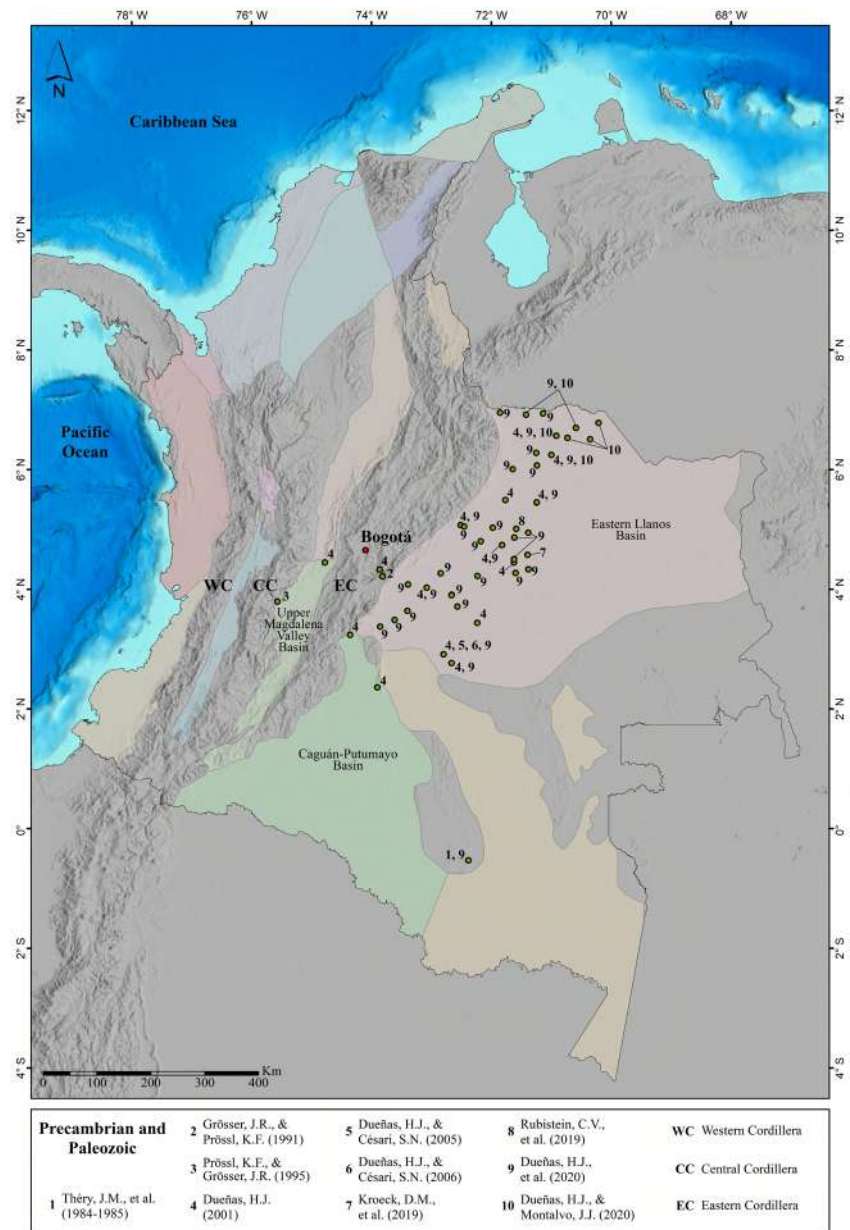


Figure 3. Map of sedimentary basins in Colombia indicating the locations where Precambrian and Paleozoic palynological publications have been made. For detailed references, see table 1s.

al., 1979), but there are no micropaleontological studies on these rocks. In contrast, an abundant and diverse association of Ediacaran acritarchs has been described for the so-called “Arauca Graben” in the Eastern Llanos (Arminio *et al.*, 2013; Dueñas-Jiménez & Montalvo-Jónsson, 2019).

The world’s palynological record of Cambrian to Devonian deposits is composed of a diverse association of acritarchs, chitinozoans, scolecodonts, algae, cyanobacteria, and spores. The first pollen grains were reported for the end of the Devonian through the Permian with acritarch, spore, and megaspore associations still dominant (Traverse, 1988). In Colombia, the palynomorph associations described for the Paleozoic deposits contain abundant and diverse acritarchs, spores, and some chitinozoans; however, pollen grains have not been reported.

The Paleozoic sedimentary deposits are mainly located in the Eastern region of Colombia (**Gómez-Tapias et al.**, 2015). Cambrian to Devonian deposits of shallow marine environments have been reported on igneous and metamorphic rocks of the Amazonian Craton in the Eastern Llanos and the Amazon (**Dueñas**, 2001). Cambrian and Silurian rocks in the low-grade metamorphosed Quetame and Floresta massifs are reported to the south of the Quetame-Mérida terrain extending from the northeast of the Eastern Cordillera to western Venezuela while sedimentary rocks accumulated in coastal, fluvial, and marine environments present a diverse macrofossil fauna and flora (**Moreno-Sánchez et al.**, 2020). To the south and west of the country, Paleozoic sedimentary deposits with a lower degree of metamorphism are found on a Precambrian Grenvillian metamorphic basement in the Eastern Cordillera and the Magdalena Valley (**Bayona et al.**, 2010; **Moreno-Sánchez et al.**, 2020).

The oldest Paleozoic deposits (Cambrian) studied with palynology (**Figures 1b and 3**) are found in the Eastern Llanos, on the Arauca sector, where a very diverse association of acritarchs from shallow marine environments is described (**Dueñas**, 2001, 2002; **Dueñas-Jiménez et al.**, 2020). Early Ordovician (Arenigian) acritarchs have been reported in the Araracuara Formation in the south of the Chiribiquete mountain range (**Théry et al.**, 1984); other palynological data from the Ordovician describing well-preserved associations of acritarchs and chitinozoans come from wells drilled in the Eastern Llanos (**Dueñas**, 2001; **Dueñas-Jiménez et al.**, 2020). Recent studies in this region indicate the presence of the Peri-Gondwana palynological province of the Ordovician (**Kroeck et al.**, 2019; **Rubinstein et al.**, 2019).

Silurian palynomorphs have also been found in the Eastern Llanos (**Dueñas-Jiménez et al.**, 2020) and on the eastern flank of the Eastern Cordillera in the Quetame-Mérida terrain (**Grösser & Prössl**, 1991). Palynological data from the Devonian and Devonian-Carboniferous have been reported in the Eastern Llanos (**Dueñas**, 2001; **Dueñas & Césari**, 2005, 2006; **Dueñas**, 2011; **Dueñas-Jiménez et al.**, 2020) and on the eastern flank of the Central Cordillera in shales of the Amoyá Formation (**Prössl & Grösser**, 1995). The Permian, mainly described in the Santander massif in the Eastern Cordillera, presents a diverse marine fauna, but no palynological studies have been published on these rocks.

Mesozoic

In the Permian-Triassic, the vegetation around the world was dominated by conifer or conifer-like gymnosperm. Palynologically, this separation between the Late Permian and the Early Triassic is not easy because at this time the pollen record was dominated by striate bisaccate pollen (**Traverse**, 1988). During the Triassic, the palynofloras experimented a high provincialism associated with latitude and by the Late Triassic and Early Jurassic, the palynoflora consisted mainly of non-striated bisaccate pollen grains. The palynoflora of the Jurassic shows a more cosmopolitan record (e.g. *Classopollis*) with latitude-associated variations in their abundance. The dinoflagellates record suggests a high provincialism at this time (**Traverse**, 1988).

During the late Paleozoic and early Mesozoic, compressive tectonics associated with the formation of Pangea have been recorded in Colombia. Later, its fragmentation during the Triassic resulted in the opening of the proto-Caribbean (**Spikings & Paul**, 2019). Extensive sedimentary deposits were accumulated during the Jurassic in shallow marine and continental environments associated with extensional basins in areas such as La Guajira, the Perijá and San Lucas Mountain ranges, the Eastern Cordillera, the Magdalena Valley and Putumayo extending to Ecuador (**Mojica & Kammer**, 1995; **Bayona et al.**, 2020). The dominant presence of red sandstones, conglomerates, and mudstones accumulated in oxidizing environments (e.g., Bocas, Jordán, and Girón units), hinders the preservation of organic matter microfossils and limits palynological information from the Triassic-Jurassic to very few locations (e.g., Bocas and Girón Group formations in Santander) (**Remy et al.**, 1975; **Pons**, 1983).

Cretaceous

During the Cretaceous, a major change in the composition of the world’s flora occurred due to the emergence and diversification of angiosperms. The oldest record of this group in both hemispheres is from 130 Ma, Barremian (**Jaramillo, 2019**). The paleobotanical records suggest that from their appearance and through the Cretaceous, angiosperms’ diversity and abundance progressively increased until they came to dominate terrestrial ecosystems surpassing other plant groups (e.g. peridophytes, cycadophytes, coniferales) in the Paleocene (**Jaramillo, 2023; Crane & Lidgard, 1989, 1990**).

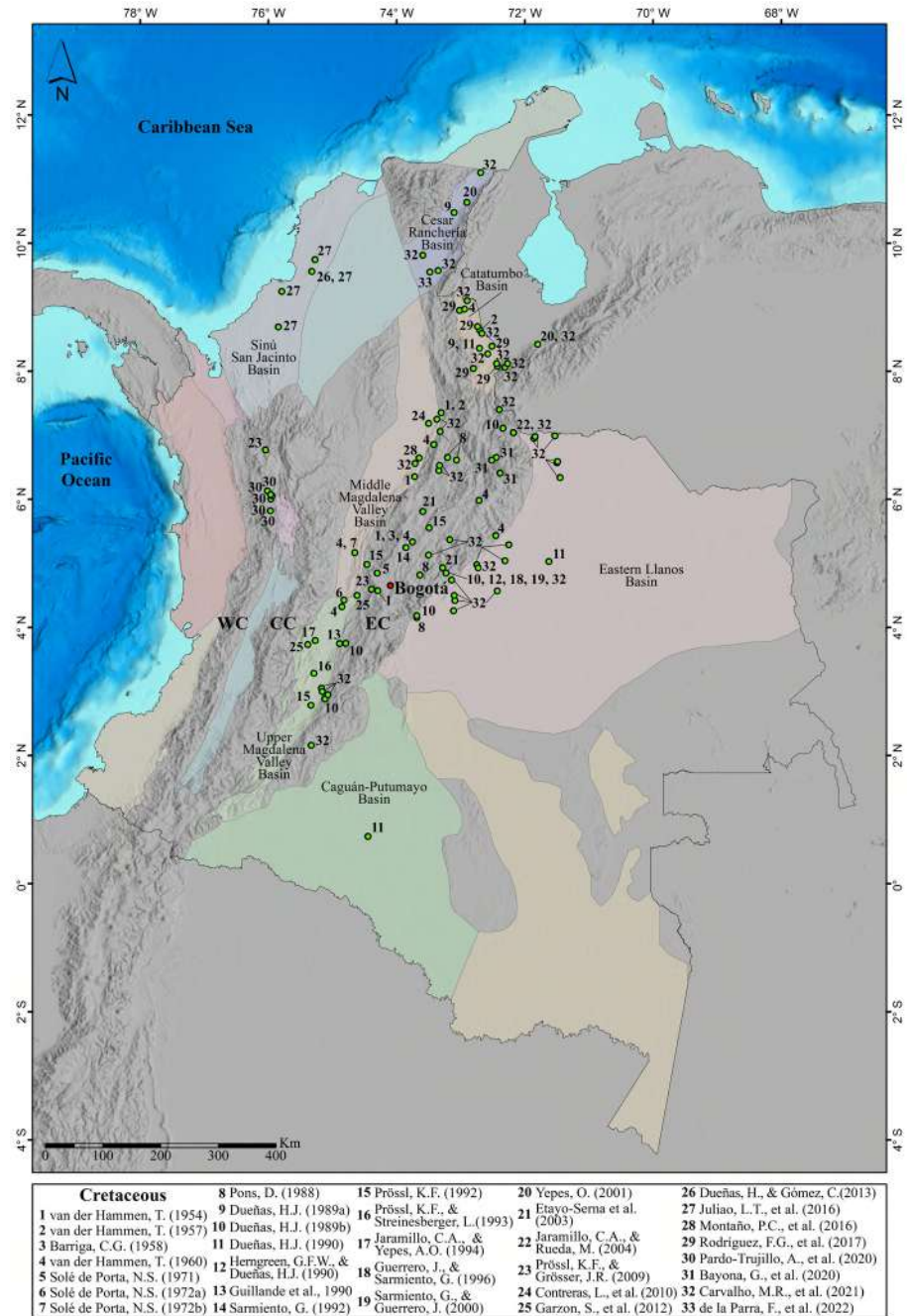


Figure 4. Map of sedimentary basins in Colombia indicating the locations where Cretaceous palynological publications have been made. For detailed references, see table 1s.

Rocks from the Cretaceous period in Colombia are exposed in the Western Cordillera, Central Cordillera, Magdalena Valley, Eastern Cordillera, some areas in the Caribbean (La Guajira and Sinú-San Jacinto basins), the Eastern Llanos, and the Amazon (**Barrero et al.**, 2007; **Gómez-Tapias et al.**, 2015). During the Early Cretaceous and until the Turonian, the sea progressively advanced and occupied the entire eastern region of Colombia (**Etayo-Serna et al.**, 1969; **Sarmiento-Rojas et al.**, 2006); its regression at the end of the Cretaceous generated extensive coastal and fluvial deposits (**Sarmiento**, 1992a) where the palynomorphs were well preserved. Systematic flora and microflora studies are limited, despite the dominance of ferns and gymnosperms on the mainland and a few angiosperms (**Jaramillo**, 2019). In contrast, the influence of the sea led to paleontological studies of marine macrofossils in areas of the current Magdalena Valley and Eastern Cordillera (**Etayo-Serna**, 1964; **Etayo-Serna**, 1979; **Gómez-Tapias et al.**, 2015; **Patarroyo**, 2020).

Publications on Cretaceous palynology mainly focus on the Eastern Cordillera, the Magdalena Valley, and the Eastern Llanos (**Figures 1a and 4**). Palynological studies on Lower Cretaceous rocks from the central zone of the Eastern Cordillera (Cundinamarca) show a high thermal alteration index as a result of deep burial and tectonics associated with the uplift of the Andes, which destroyed or hinder the recognition of palynological associations (**Fabré & Delaloye**, 1983; **Dueñas**, 1989, **Prössl**, 1992; **Prössl & Grösser**, 2009). Likewise, in the Barremian-Aptian deposits of the Villa de Leyva area (Eastern Cordillera), where fossil macroflora is reported, palynomorphs have not been recovered due to their high thermal maturity (**Prössl**, 1992). In contrast, the record of relatively well-preserved marine and continental palynomorphs dates from the Aptian and extends through the Upper Cretaceous (**Dueñas**, 1990; **Dueñas**, 1989a). A study of the Batá Formation on the eastern flank of the Eastern Cordillera over the Quetame massif contains a palynological association of the Valanginian-Hauterivian (**Etayo-Serna et al.**, 2003).

Palynological associations from the Aptian have been reported in sedimentary deposits of the Upper Magdalena Valley in the Yaví Formation (**Prössl & Vergara-Streinesberger**, 1993; **Vergara et al.**, 1995), and from the Aptian-Albian in the Alpujarra, Ocal, and Caballos formations (**Mejía-Velásquez et al.**, 2012). Studies from deltaic deposits in the Caballos (Upper Magdalena Valley) and Une Formations in the eastern sector of the Eastern Cordillera present palynology dating from the Albian to the Cenomanian (**Herngreen & Dueñas-Jiménez**, 1990). Despite the high thermal maturity observed in the palynomorphs, an Albian-Cenomanian age has been indicated for the Aguardiente and Capacho formations in the Catatumbo basin (**Rodríguez-Forero et al.**, 2017).

In the Upper Cretaceous of the Eastern Cordillera, a succession covering the Cenomanian to Paleocene interval has been described including, from bottom to top, the Une (upper part), Chipaque and San Antonio Sandstones, the Aguacaliente Shales, the San Luis de Gaceno Sandstones, and the Guaduas and Lower Socha formations. This succession exhibits a changing palynological spectrum between marine and terrestrial palynomorphs allowing the determination of relative sea-level changes (**Guerrero & Sarmiento**, 1996; **Sarmiento & Guerrero**, 2000). In the western part of the Eastern Cordillera, the palynology of a marine sequence from the early Maastrichtian age has been studied in the Guadalupe Formation, where the report of marine palynomorphs is scarce but that of fungi is abundant suggesting very humid environments and high temperatures (**Gillande et al.**, 1990). A high diversity of pollen and spores morphotypes has been described in Maastrichtian-Paleocene sedimentary deposits also in the Eastern Cordillera and in the Guadalupe and Guaduas formations (**Solé de Porta**, 1971; **Sarmiento**, 1992b). Recently, very early Maastrichtian to early Eocene deposits in the north of the Eastern Cordillera in the Cocuy region were dated using palynology (**Bayona et al.**, 2020).

In the Upper Magdalena Valley, Santonian-Maastrichtian dinoflagellates from the Olini Group have been studied (**Jaramillo & Yepes-Amézquita**, 1994; **Garzón et al.**, 2012), as well as terrestrial palynology from the Upper Cretaceous deposits of the Honda-Guaduas region (Cimarrona Formation) and Guataquí (**Solé de Porta**, 1972a; 1972b) in the Middle Magdalena Valley. Palynological associations of pollen, spores, and dinoflagellates from the

Maastrichtian have been described for the Molino Formation in the Cesar-Ranchería Basin and in the upper part of the Colón Formation in the Catatumbo Basin (**Dueñas-Jiménez**, 1989b). Additionally, dinoflagellates have been studied in the Colón Formation (Río Molino section) in northern Colombia and the Mito Juan Formation (Río Loro section) in western Venezuela from the Maastrichtian-Danian age (**Yepes**, 2001). Recently, the first continental record of the Colón Formation in the Cesar-Ranchería Basin was published including the palynology of the Cretaceous-Paleogene boundary (**de la Parra et al.**, 2022). Campanian-Maastrichtian marine and terrestrial palynomorphs accumulated in both shallow and deep marine environments have been reported in the Cansona Formation of the Colombian Caribbean (**Dueñas-Jiménez & Gómez-González**, 2013; **Juliao-Lemus et al.**, 2016).

The Quebradagrande complex, located on the western border of the Central Cordillera, contains organic mudstones that exhibit fossil plants with ages from the Hauterivian, possibly the oldest from the Cretaceous in Colombia (**Lemoigne**, 1984; **Maya & González**, 1995; **Jaramillo**, 2012; 2019). Efforts to recover palynomorphs from the Quebradagrande complex have been unsuccessful due to thermal alteration, which hinders their preservation (**Pardo et al.**, 2022). Similarly, the recovery of palynomorphs in Upper Cretaceous marine sediments from the Western Cordillera has been limited given the intense tectonic activity there, which results in a high degree of thermal alteration in the rocks (**Pardo-Trujillo et al.**, 2020).

Cenozoic

Significant eustatic changes and climatic variations occurred during the Cenozoic (**Zachos et al.**, 2001). In Colombia, the uplift of the Central and Eastern cordilleras (**Pindell & Kennan**, 2009; **Pardo-Trujillo et al.**, 2020) resulted in the development of mostly continental sedimentary deposits in the interior of the country drastically altering ecosystems. These events also contributed to the current configuration of tropical forests (**Jaramillo**, 2012).

Palynological studies in Colombia have revealed that at the end of the Cretaceous period, there was an extinction of at least 75% of plant species, which gave rise to new floras dominated mainly by tropical angiosperms during the Paleocene epoch (**van der Hammen**, 1958; **Jaramillo et al.**, 2006; **de la Parra**, 2009; **Jaramillo**, 2012, **Carvalho et al.**, 2021). From the Paleocene to the Eocene, the rate of new species appearance was higher than the extinction rate indicating an increase in diversity that continued until the middle Eocene (**Jaramillo et al.**, 2010). During the late Eocene-Oligocene, a drastic decrease in diversity was followed by a new increase during the Oligocene and early Miocene. This increase was not as high as the one observed during the early-middle Eocene but it did allow for the differentiation of tropical floras with specific composition and structure for the Paleocene, Eocene, and Oligocene-Miocene early forests (**Jaramillo et al.**, 2006; **Jaramillo et al.**, 2010).

The formation of new continental environments generated changes in the diversity, abundance, and replacement of floristic species. Such events are studied in palynostratigraphy and turned palynology in Colombia one of the most commonly used tools in Cenozoic hydrocarbon exploration (**Kuyl et al.**, 1955; **van der Hammen**, 1954a, 1954b, 1957b). Since its beginnings in the 1950s, this has led to the description and illustration of pollen and spores (**van der Hammen**, 1954a, 1954b, 1956a, 1956b, 1957b, 1961; **van der Hammen & García-de Mutis**, 1965; **Solé de Porta**, 1960a, 1961, 1963, 1970, 1971; **Kedves & Solé de Porta**, 1963), as well as the development of specific Colombian palynological zonations (**Jaramillo & Rueda**, 2004; **Jaramillo et al.**, 2011).

Paleogene: Paleocene-Eocene-Oligocene

The Paleogene period has a considerable amount of palynological data from regions in the Magdalena Valley, the Eastern Cordillera, and the Eastern Llanos, and to a lesser extent, the Caribbean (Cesar-Ranchería and Sinú San Jacinto basins) (**Figures 1a and 5**). In the western part of Colombia, published works are limited. There are no reports of Paleogene sedimentary deposits in the Central Cordillera. In the Western Cordillera, the Paleocene, sedimentary rocks occur in very few localities and have a high degree of thermal maturity that hinders the preservation of palynomorphs (**Pardo-Trujillo et al.**, 2020).

The available palynological information for the Paleogene mainly comes from continental deposits such as fluvial and lacustrine sediments, as well as from littoral environments in the northern part of the country including the Eastern Cordillera, the Magdalena Valley, and the Cesar-Ranchería basins. During this period, the coastline was located towards the Pacific, the Caribbean, the northeast of Colombia, and the west of Venezuela (**Moreno-Sánchez & Pardo-Trujillo, 2003**). At some point during the Eocene, the sea advanced into the continent and moved to the Eastern Llanos and the current location of the Eastern Cordillera (**Santos *et al.*, 2008; Pardo & Jaramillo, 2014**).

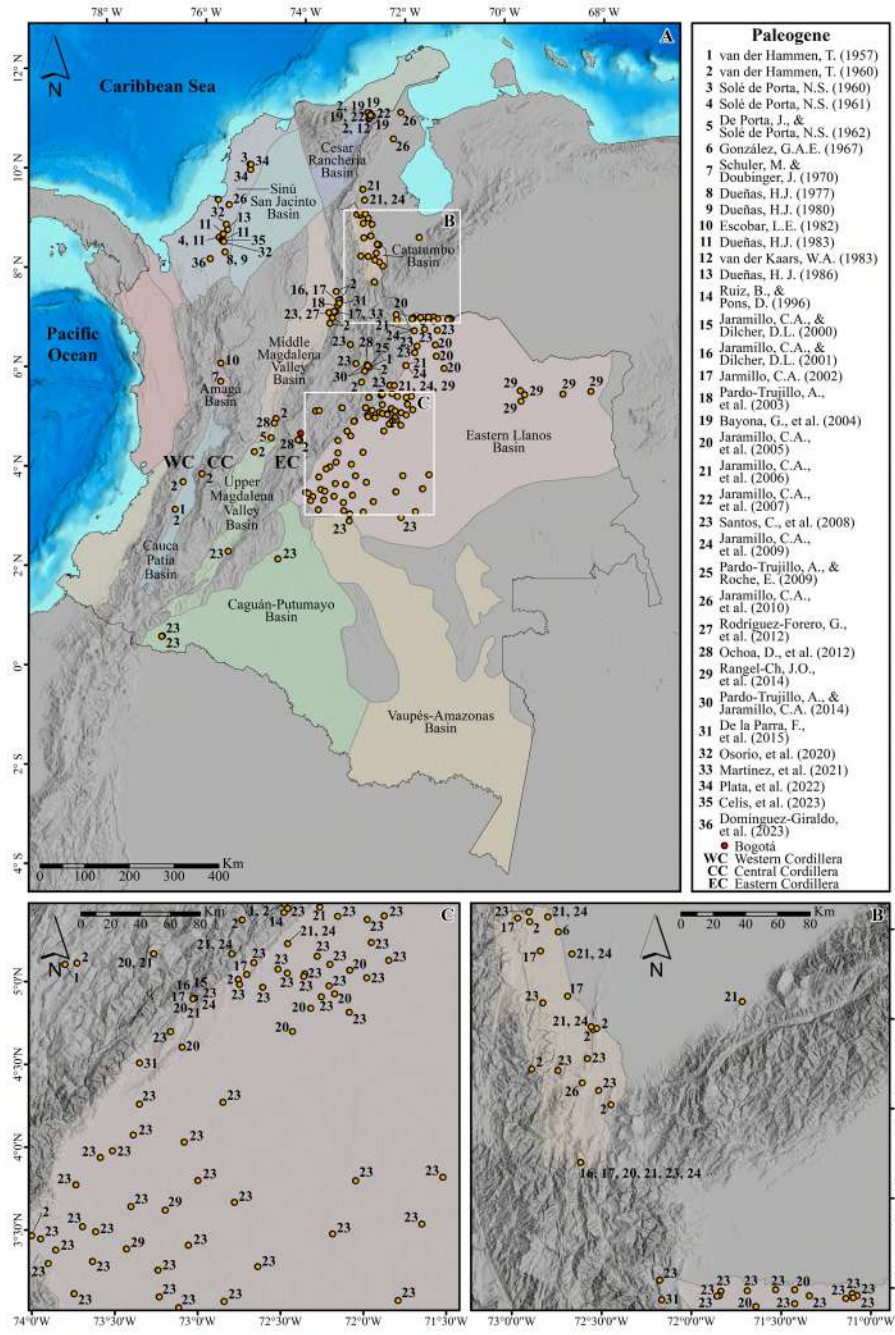


Figure 5. Map of sedimentary basins in Colombia indicating the locations where Paleogene palynological publications have been made. For detailed references, see table 1s.

An informal palynological scheme has been proposed for the Middle Magdalena Valley based on high-quality palynological data on the Cretaceous to the Middle Eocene obtained from multiple wells drilled for the industry (**Contreras *et al.*, 2010**). Additionally, detailed palynostratigraphic studies of the Paleocene-Eocene have been conducted including analyses of organic matter in sections of the Middle Magdalena Valley, the Eastern Cordillera, and the western part of Venezuela (**Jaramillo & Dilcher, 2001**; **Pardo-Trujillo *et al.*, 2003**; **Pardo-Trujillo & Roche, 2009**). Studies have also been conducted in the Nuevo Mundo syncline for the Eocene Esmeraldas Formation (**Rodríguez-Forero *et al.*, 2012**) and in two sections on the eastern flank of the Nuevo Mundo syncline where the macro and microflora of the Esmeraldas Formation and the lower part of the Mugrosa Formation have been studied (**Martínez *et al.*, 2021**).

Palynological research on the Paleocene-Eocene in the central area of Colombia covering sections of the Middle Magdalena Valley, the Eastern Cordillera, Catatumbo, and the Eastern Llanos has revealed diversity variations and allowed for the description of a large number of new pollen and spore species (**Jaramillo & Dilcher, 2000; 2001**; **Jaramillo, 2002**; **Jaramillo *et al.*, 2010**). Sedimentary deposits in the Eastern Cordillera have been extensively studied with palynology in the Cretaceous-Paleogene transition in the Sabana de Bogotá, El Cocuy, and the Llanos foothills (**Solé de Porta, 1971**; **Sarmiento, 1992b**; **Guerrero & Sarmiento, 1996**; **Bayona *et al.*, 2020**).

The Early to Middle Eocene palynology of the Catatumbo basin has shown changes in palynological associations possibly linked to relative variations in sea level (**González-Guzmán, 1967**) and similar to findings reported for the late Eocene in the Eastern Llanos, the Eastern Cordillera, and the Putumayo basins, where changes in the content of marine and terrestrial palynomorphs have been associated with marine incursions (**Santos *et al.*, 2008**). The reworked palynomorphs found in the Eastern Llanos and the Eastern Cordillera have been used to understand tectonic activity during the Cenozoic in Colombia (**de la Parra *et al.*, 2015**). Palynological associations and sedimentary environments of the Usme, Concentración, and Santa Teresa formations in the Eastern Cordillera, which span in the range of Late Eocene-Early Miocene, were studied to understand changes in sedimentary deposits as a result of Andean orogeny centered on the deformation of the Eastern Cordillera (**Ochoa *et al.*, 2012**). Previous studies on the Cenozoic zonation (**Jaramillo *et al.*, 2011**) describing part of the biostratigraphic palynology in the Eastern Llanos and the Llanos foothills were conducted on the Late Paleocene-Early Eocene of the Los Cuervos Formation (**Jaramillo *et al.*, 2005**) and the Eocene in the Mirador formation (**Jaramillo *et al.*, 2009**).

During the Paleocene, sedimentary deposits in the Colombian Caribbean describe palynological associations of coastal environments of tidal plains in the Cerrejón Formation (Cesar-Ranchería basin), in the Guajira sector (**van der Kaars, 1983**; **Bayona *et al.*, 2004**; **Jaramillo *et al.*, 2007**). Recently, a detailed palynological assemblage of the Early Eocene (Ypresian) was described from two core wells drilled in the San Cayetano Formation in the Sinú-San Jacinto Basin (**Plata-Torres *et al.*, 2022**). For the Oligocene-Early Miocene of the Planeta Rica sector in the Ciénaga de Oro Formation, in the San Jerónimo and San Jacinto anticlines in the Caribbean, coastal environments characterized by mangroves with variations in the coastline have been described (**Solé de Porta, 1960a; 1961**; **Dueñas, 1977; 1980a**, **Dueñas-Jiménez, 1983; 1986**). In the Cauca Valley basin, palynology of the Amagá Formation has been described in the department of Antioquia, suggesting a middle Eocene-Oligocene age (**Schuler & Doubinger, 1970**; **Escobar, 1982-1983**).

Neogene: Miocene-Pliocene

The Neogene period (Miocene-Pliocene) was a time of significant changes in the configuration of terrestrial and marine ecosystems in South America, driven by a series of global events. The closure of the Central American Seaway (CAS) brought important changes in oceanic circulation and the formation of a new system of currents known as the heat conveyor belt, which had important consequences for global climate patterns. At the

same time, the great American biotic interchange occurred, resulting in the exchange of flora and fauna between North and South America. The Neogene also saw the record of the largest amount of Antarctic ice, which had a significant impact on global sea level and oceanic circulation. Finally, the uplift of the Andes had a profound effect on the climate of the region, with modifications in the location and intensity of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and the formation of distinct ecological zones along the elevation gradient of the mountain range.

The study of these events has allowed an increase in the number of publications in geosciences since the 1980s aimed to understand the history of the Neogene (e.g. **O'Dea et al.**, 2016; **Bacon et al.**, 2015; **Cione et al.**, 2015; **Montes et al.**, 2015; **Woodburne**, 2010; **Lessios**, 2008; **Schmidt**, 2007; **Webb**, 2006; **Bacon et al.**, 2015; **Coates et al.**, 2004, 1992; **Coates and Obando**, 1996; **Duque Caro**, 1990 a, b; **Keigwin et al.**, 1982). From a botanical point of view, plant fossils from this period are related to current plant communities through comparative taxonomy. Therefore, the study of Neogene pollen spectra is mainly used in research on paleoclimatic and paleoecological reconstructions, in many cases associated with the configuration of the Andes and the global events mentioned above.

During the Miocene-Pliocene in Colombia, the uplift of the Andes formed a natural phytogeographic barrier that gave rise to the tropical forests of Chocó, the Magdalena Valley, and the Amazon, each with its own floristic characteristics, suggesting that the high diversity recorded in the Colombian tropics is the result of a Neogene inheritance rather than Quaternary processes (**Hooghiemstra & van der Hammen**, 1998). Neogene sedimentary deposits are found in all the country's basins, however, most of the palynological publications for this period are from the Eastern Llanos, the Eastern Cordillera, and the Orinoquia (**Figures 1a and 6**).

Palynological studies have been conducted in the Colombian Amazon region, particularly in the area between Araracuara and Isla Cristina, where Late Oligocene-Early Miocene floodplain deposits have been described (**Hoorn**, 1988). Additionally, near Araracuara in the Caquetá River basin, Early-Middle Miocene fluvial deposits have pollen and spore assemblages characteristic of tropical forests with swamp and riparian vegetation (**Hoorn**, 1994a). Sedimentological and palynological studies of Middle-Late Miocene fluvial-lacustrine deposits in the Upper Amazon region suggest that the origin of the Amazon River system is a consequence of the uplift of the Eastern Cordillera (**Hoorn**, 1994b; **Hoorn et al.**, 1994). Palynological data from the Miocene in the Amazonian region of Perú, Brazil, and Colombia report mangrove vegetation associated with marine incursions due to eustatic changes, subsidence in the periphery of the Guyana Shield, and rapid subsidence in the sub-Andean zone (**Hoorn**, 1993; **Hoorn**, 2006; **Bonstra et al.**, 2015). In the lower Apaporis River deposits, the presence of mangrove vegetation and dinoflagellates, which fluctuated with palm vegetation during the Late Middle-Late Miocene, constitute palynological evidence of marine incursions (**Hoorn**, 2006). In contrast, dinoflagellate and foraminiferal studies of Lower-Middle Miocene deposits suggest changes in salinity in the northeast Amazon region, indicating that marginal marine conditions extended at least 2000 km inland from the Caribbean. Later, during the Pliocene-Pleistocene, a drop in sea level and a change in the tectonic regime ended the marine incursions in the Amazon basin (**Bonstra et al.**, 2015). The duration of marine incursions in the Llanos and Amazon/Solimões basins to the northwest of the Amazon suggests two short-lived marine flooding events: one in the Early Miocene and one in the Middle Miocene (**Jaramillo et al.**, 2017), rather than a single event during the entire Miocene as previously suggested by some authors (**Webb**, 1995; **Räsänen**, 1995).

Miocene palynology in the Eastern Llanos and the Llanos foothills has been presented in zonations and diversity models published by **Jaramillo & Rueda** (2004), **Jaramillo et al.** (2006), **Jaramillo et al.** (2011), and **de la Parra et al.** (2015). However, it has been observed that palynological reports of marine dinoflagellates in this area of the country often show heterochrony with their global distribution due to local marine conditions (**Pinzón et al.**, 2022; **Cárdenas et al.**, 2020).

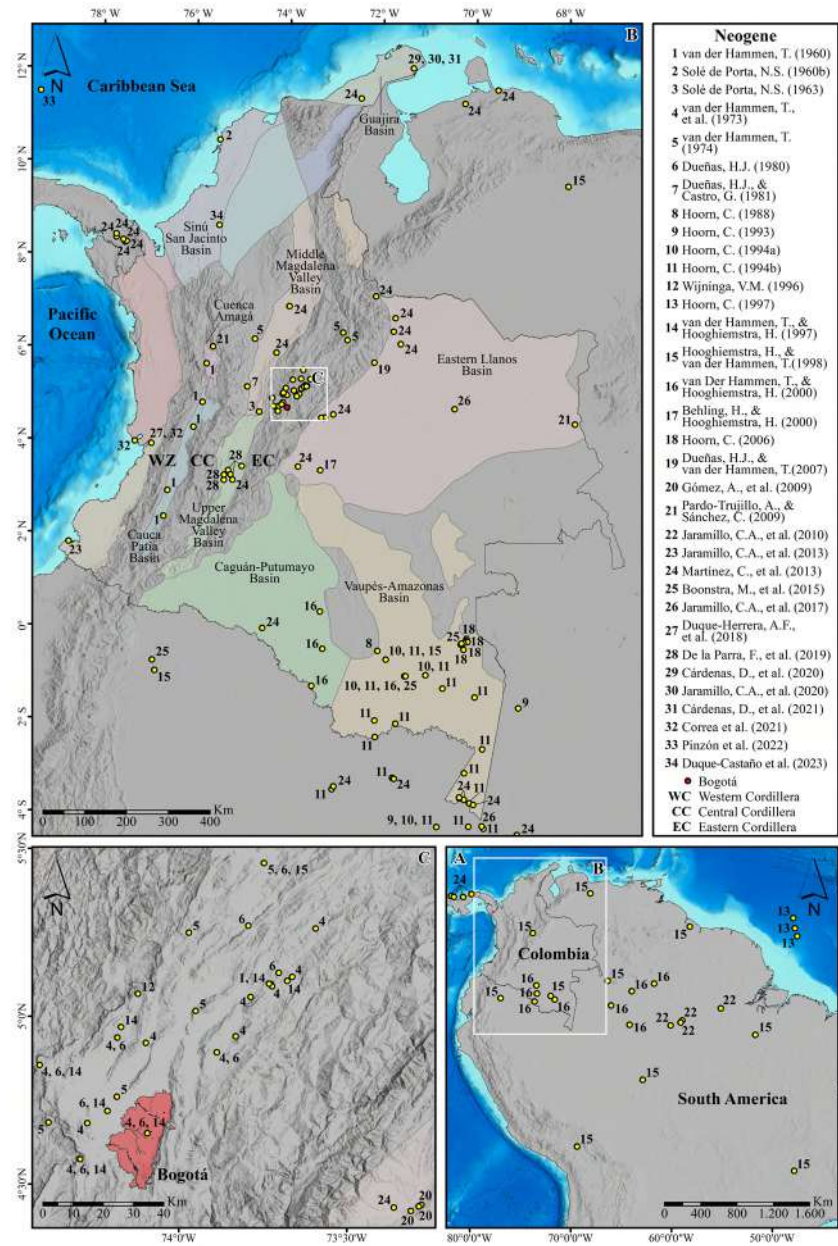


Figure 6. Map of sedimentary basins in Colombia indicating the locations where Neogene palynological publications have been made. For detailed references, see table 1s.

In the Llanos foothills, north of Yopal, the palynological content has been studied from Early Miocene marine sediments in the lower Diablo Formation previously considered to be from the Oligocene (**van der Hammen, 1960**) and the Middle to Late Miocene San Fernando Formation (**Dueñas-Jiménez & van der Hammen, 2007**). In this study, vegetation changes related to fluctuations between marine-influenced lacustrine and fluvial environments were interpreted (**Rangel *et al.*, 2014**). Multi-tool studies using mollusks and palynology have interpreted lakes of up to 10 km extent with marine incursions for the eastern edge of the Eastern Cordillera in the Early Miocene Carbonera C2 Formation (**Gómez *et al.*, 2009**).

In general, the Neogene period, and especially the Pliocene-Quaternary deposits, have been extensively studied in the Eastern Cordillera with palynological research in the Tilatá, Subachoque, and Sabana formations in the Sabana de Bogotá, where the end of the

uplift of the Eastern Cordillera has been described, as well as the enrichment of the local flora with the arrival and establishment of Holartic and Antarctic floristic immigrants in the Colombian Andes (**van der Hammen & González**, 1960; **van der Hammen**, 1957a, 1961, 1966; **van der Hammen et al.**, 1973). These pioneering works by van der Hammen were later summarized in a monograph (**Dueñas**, 1980b). In the following years, important paleobotanical research (macro and microflora) continued in localities near the Sabana de Bogotá and its surroundings (**van der Hammen**, 1974; **Hooghiemstra**, 1984; **van der Hammen & Cleef**, 1986; **Hooghiemstra**, 1989; **Wijninga & Kuhry**, 1990, 1993; **Hooghiemstra & Cleef**, 1995; **Wijninga**, 1996a, b, c, d; **Torres**, 2006), which allowed to understand the evolution of the Andean forest and its relationship with the Andean orogeny (**Hooghiemstra et al.**, 2006).

For the Pliocene and Quaternary in the eastern zone of Colombia, chronostratigraphic units have been established based on pollen and spore content including Tequendamian, Facatativan, Sisganian, Chocontanian, Engativan, Funzanian, Fuchanian, Cotanian, Subanian, Bacatanian, and Fuquenian (**van der Hammen & Hooghiemstra**, 1997). These authors also made significant contributions to the phytogeographic knowledge by proposing a hypothesis of the establishment and development of the diverse Neotropical forests during the Neogene as a response to changes in drainage patterns and the isolation of new dynamic ecotones (e.g. Amazon, Magdalena Valley, and Chocó), originated with the uplift of the Andes. As in the Orinoquian-Amazonian region, marine fluctuations would be responsible for an ecosystemic pressure that would be crucial in evolutionary processes reflected in the richness and decrease of species. The authors also affirmed that during the Quaternary, the extinction of plant species was a common phenomenon since the current species diversity appears to be lower than that observed in the palynological diversity diagrams of the Miocene-Pliocene. Besides, according to the authors, during the last glacial period in the Quaternary, the Amazon basin in different sectors and times maintained its rainforest vegetation cover, or it was replaced by savannas, depending on the climatic conditions (**Hooghiemstra & van der Hammen**, 1998).

Miocene palynology in the Magdalena Valley has been conducted in the La Cira Formation, municipality of Jerusalén-Cundinamarca (**Solé de Porta**, 1963), and in the Barzalosa Formation, where extensive lacustrine systems during the Early Miocene have been described and correlated along the Middle and Upper Magdalena valleys (**Zapata et al.**, 2023; **de la Parra et al.**, 2019). In the Falan region, department of Tolima, palynological associations related to altitudinal changes during the Pliocene have been studied in the Las Palmas Member of the Mesa Formation (**Dueñas & Castro**, 1981). The palynology of Cerro La Popa in Cartagena presents two different floristic assemblages associated with altitudinal changes, where the presence of *Alnus* could indicate sedimentary deposits from the Upper Pliocene to Pleistocene age (**Solé de Porta**, 1960b).

Recently, studies have been conducted on the palynology of the Miocene in western Colombia including the Pacific and the Caribbean. In the Patía sub-basin sector of the Cauca Valley, the sedimentology and palynology of the Burdigalian-Early Langhian Morales Formation have been described (**Gallego-Ríos et al.**, 2020). In the Pacific, at least three sedimentary cycles of transgression-regression have been described using dinoflagellates from the Buenaventura 1-ST-P well (**Duque-Herrera et al.**, 2018), while in the Ladrilleros Juanchaco sector, an increase in primary productivity during the Serravalian-Tortonian was demonstrated by dinoflagellate (**Correa et al.**, 2021) and other microfossils studies (**Vallejo et al.**, 2016; **Plata et al.**, 2018). Towards the Caribbean sector, in the Cocinetas Basin on the Guajira Peninsula, heterochrony has been recognized in relation to high latitude data in Lower Miocene dinoflagellates leading to the proposal of a dinoflagellate biostratigraphy for the Late Chattian-Early Burdigalian, as well as the description of new species of acritarchs and dinoflagellates (**Cardenas et al.**, 2020; **Cárdenas et al.**, 2021). Also, in the Cocinetas Basin, an integrated study was conducted to understand changes in the vegetation from the Late Oligocene to the Early Miocene, where an age model of marine micropaleontology including dinoflagellates was presented (**Jaramillo**

et al., 2020). Integrated palynological studies with calcareous microfossils in the DSDP 502A in the Colombian Caribbean during the Late Miocene-Pliocene show synchrony in some dinoflagellates and highlight the importance of including terrestrial palynomorphs in the study of deep-sea sediments (Pinzón *et al.*, 2022). In the Sinú-San Jacinto Basin, sedimentary deposits spanning de Ciénaga de Oro (CDO) and Porquero formations were studied from a core using integrated micropaleontological tools; due to the environments there, only palynomorphs were recovered to CDO; in contrast, for the Porquero formation, the recovery of marine calcareous microfossils allowed to calibrate some palynomorph ages (Duque-Castaño *et al.*, 2023).

Additionally, palynological publications reviewed the taxonomy, phylogeny, stratigraphic distribution, and biogeography of some microfossils with current representatives within the Araucariaceae, Chloranthaceae, Fabaceae, and Palmae families, such as *Cyclusphaera* sp., *Clavainaperturites microclavatus*, *Striatopollis catatumbus*, and *Mauritia* sp., respectively. The aim was to understand their origin and radiation using modern optic techniques of taxonomic identification and advanced computer programming (Software R) (Rull, 1998; Pardo-Trujillo & Sánchez, 2009; Jaramillo *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2013; Romero *et al.*, 2020; Bogotá *et al.*, 2021).

Overview of palynological advances in the Colombian Caribbean

Currently, the Colombian Caribbean is considered a frontier basin due to its high number of oil and gas seeps, which suggests a high potential for hydrocarbon exploration (Barrero *et al.*, 2007). However, palynological studies in this sector are scarce (Figure 1). In recent years, the National Hydrocarbons Agency (ANH) has conducted studies including regional seismic lines, core drilling, geological mapping, and different types of sample analyses. In this context, the University of Caldas has carried out micropaleontological studies including the palynology of drill cores covering the interval from the Maastrichtian to the Pliocene (Figure 7). In the Cesar-Ranchería Basin, wells ANH-La Loma 1, ANH-La Estación-1, ANH-Carretalito-1, ANH-Cañaboba-1, ANH-La Loma 2 have been studied and in the Sinú-San Jacinto Basin, wells ANH-La Estrella-1X, ANH-Piedras Blancas-1X, ANH-San Cayetano-1, ANH-La X-1A, ANH-Mohambo-1X, ANH-San Antero-1X, ANH-Nueva Esperanza-1X, ANH-Tierra Alta-2X-P, ANH-San Jacinto-1, ANH-La Cantera-1, ANH-Costa Azul-1, P18, ANH-San Antonio-1X, and ANH-Los Pájaros-1X.

Palynology data from the San Cayetano, Chengue, San Jacinto, Ciénaga de Oro, and Porquero formations spanning Early Eocene (Ypresian) to Early Miocene have been published recently by Osorio-Granada *et al.* (2020), Plata-Torres *et al.* (2022), Castaño-Duque *et al.* (2023), Domínguez-Giraldo *et al.* (2023) and Celis *et al.* (2023).

Based on the Llanos and the Llanos Foothills zonation (Jaramillo *et al.*, 2011), a preliminary overview of the palynology of the Caribbean (Figure 7) (Table 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1913/3371>; Appendix 1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1913/3372>) showed that the Maastrichtian-Paleocene boundary has been documented in the ANH-La Loma-1 well. The middle and late Paleocene and the Paleocene-Eocene boundary have been recognized in the ANH-La Estación-1, ANH-Carretalito-1, ANH-Cañaboba-1, and ANH-La Loma-2 wells, respectively, all located in the Cesar-Ranchería Basin. In the latter, reworked Cretaceous palynomorphs were observed. There is no clear evidence of Paleocene deposits from the palynological data in the Sinú-San Jacinto Basin. A discordant Maastrichtian-Paleocene(?) with Eocene deposits was observed in the ANH-La Estrella-1X well. Early Eocene deposits were examined in ANH-Piedras Blancas-1X, ANH-San Cayetano-1, ANH-La X-1A, ANH-Mohambo-1X, and ANH-San Antero-1X wells. Middle-Late Eocene palynomorph associations were observed in the ANH-La Estrella-1X, ANH-San Jacinto-1, ANH-La Cantera-1, and ANH-Tierra alta-2X-P wells. The Oligocene was reported at the top of the ANH-La Estrella-1X and ANH-San Jacinto-1, and at the base of ANH-La Cantera-1, ANH-Costa Azul-1, ANH-Nueva Esperanza-1X, ANH-Tierra alta-2X-P, P18, and ANH-San Antonio-1X, at the top of which Miocene deposits were identified. The

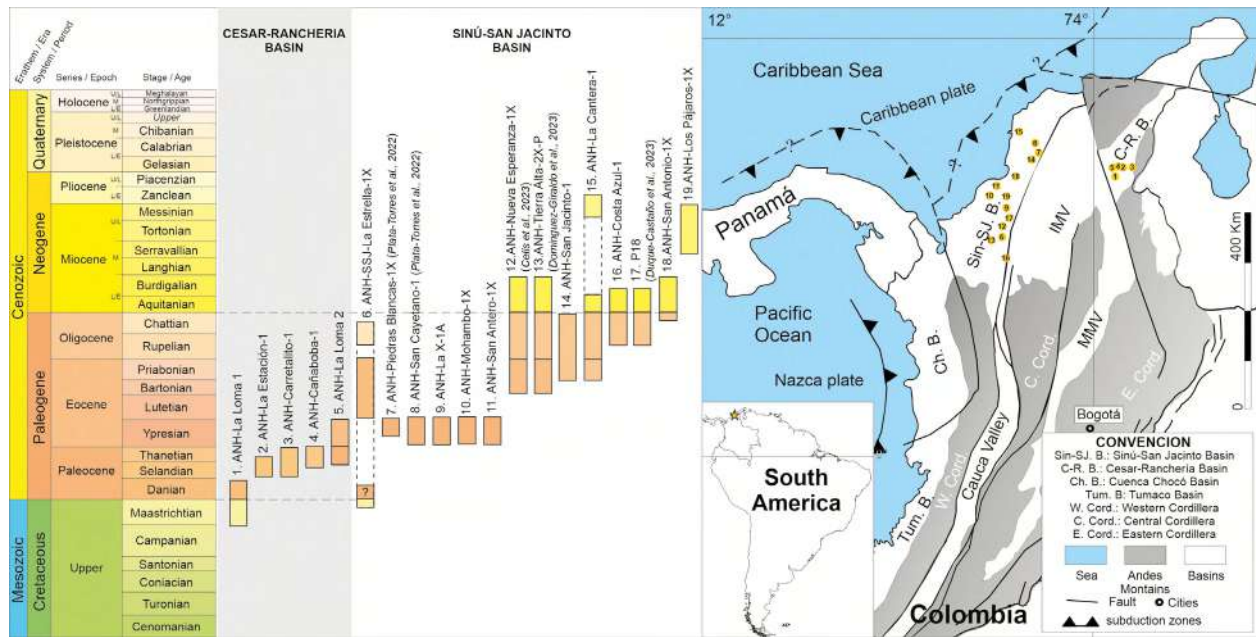


Figure 7. Localization of 19 exploratory wells studied in Colombia and distributed through time. Some of their palynology has been published.

Miocene-Pliocene was recovered in the ANH-Los Pájaros-1X well, where the reworked Maastrichtian palynomorphs were reported (**Table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1913/3371>; **Appendix 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1913/3372>).

Palynological highlights for the Caribbean include: 1) Biostratigraphic range extension to the Ypresian (Early Eocene) of some palynomorphs described in the Oligocene (e.g. *Grimsdalea minor*) by **Dueñas-Jiménez** (1986) and from the Miocene (*Grimsdalea magnaclavata*) by **Germeraad et al.** (1968); 2) global marine events reported during the Early Eocene were observed in the Caribbean (e.g. *Adnatosphaeridium multispinosum* Acme); 3) diachronism of marine palynomorph events reported to the Llanos and the Llanos foothills (**Jaramillo et al.**, 2011) while in the Caribbean the marine events are more consistent with global reports than with those proposed in the zonation; 4) the palynology of the Early Eocene from the Caribbean is similar to that reported in the Catatumbo basin, with a high diversity of palmae and bombacoideae types (**González-Guzmán**, 1967); 5) discordances: deposits from the Maastrichtian discordant with the Eocene (agree with **Duque-Caro**, 1971), probably discordances into Eocene-Oligocene boundaries, however more research is needed regarding these epochs; 6) reworked palynomorphs from the Cretaceous in the Miocene deposits and Oligocene reworked in Early Miocene deposits in the Sinú-San Jacinto Basin, as well as Cretaceous reworked palynomorphs in Late Paleocene deposits in the Cesar-Ranchería Basin; 7) the applicability of the Llanos and the Llanos foothills zonation (**Jaramillo et al.**, 2011) in the Caribbean Basin is good, but some minor variations and the occurrence of new species could be improved.

Final reflections and conclusions

Palynology in Colombia has been mainly focused on the needs of the hydrocarbon sector, geological mapping, stratigraphy, and vegetation evolution. The Paleozoic, with 10 publications and 63 localities, has been studied mainly in wells and sections in the eastern Llanos and the Amazon basin. The Cretaceous, with 32 published papers, covers 70 localities distributed in the Eastern Cordillera, the UMV, the Cesar-Ranchería, Catatumbo, and the Colombian Caribbean basins. The Paleogene has 35 publications about a large number of

localities (210) among the wells and sections distributed in most of the sedimentary basins of the country, but no publications in the southern region and the Colombian Pacific. Like the Paleogene, the Neogene also has 34 publications and 168 localities, with publications in the Amazon region and the first reports of palynomorphs in the Pacific standing out.

In the last decade, the publication of the first palynological zonation for the Cenozoic in Colombia and the progress made in western Colombian (e.g., Cauca Valley and Pacific basins) has been outstanding. In frontier basins such as the Caribbean, the role of the ANH and the recent collaboration of the University of Caldas, has allowed for a complete compilation of the palynological record of the Sinú-San Jacinto and Cesar-Ranchería basins through the drilling of exploratory wells and some of the results have been published and disseminated in different academic scenarios. However, much remains to be explored, especially in regions of the country where access is limited due to public security issues and geographic challenges. These sectors include some areas of western Colombia and the Caribbean.

Colombia continues training palynologists while the development of new artificial intelligence technologies opens for palynology new research pathways that will allow the exploration of Neotropical diversity through database management and help from the oil and gas industries. Additionally, increased knowledge of climate change issues promotes the development of strategies for CO₂ capture through the integration of palynology with fields such as stratigraphy and structural geology.

Supplementary material

Tabla 1S. References used in the maps (Figures 3-6) and localities of palynological studies from the Paleozoic to Neogene. See the table 1S in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1913/3370>

Tabla 2S. Palynomorph distribution chart of Colombian Caribbean. New data. See the table 2S in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1913/3371>

Appendix 1. Palynomorphs recovered in Colombia spanning the Cretaceous to the Neogene. See the Appendix in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1913/3372>

Acknowledgments

We thank the *Agencia Nacional de Hidrocarburos* (ANH) for allowing us to use the data generated during 2016 and 2018 in the projects 1300916 and FP44842-494-2017, which involve the ANH, *Minciencias*, and the *Universidad de Caldas* through its *Vicerrectoría de Investigaciones y Posgrados*, and the palynological and stratigraphy teams (*Instituto de Investigaciones en Estratigrafía-IIES, Universidad de Caldas*) for the information provided. Thanks to Juan Pablo Betancourt for his invaluable help in elaborating on the maps and to Mauricio Reyes for the preparation of the palynological slides.

Authors' contributions

A.PI-T.: Conceptualization, investigation, methodology, writing of the original draft, visualization, review, and editing; A.P-T.: Supervision, conceptualization, writing - review & editing; C.G-G.: Review & editing; J-A.F.: Supervision, review & editing.

Conflicts of interest

The authors declare that they do not have any conflict of interest about the content of this work or its financial support.

References

Arminio, J. F., Yoris, F., Quijada, C., Lugo, J. M., Shaw, D., Keegan, J. B., Marshall, J. E. A. (2013). Evidence for Precambrian stratigraphy in graben basins below the Eastern Llanos Foreland, Colombia. In: Conference and Exhibition. American Association Petroleum Geologists International. Cartagena.

- Bacon, C. D., Silvestro, D., Jaramillo, C., Smith, B. T., Chakrabarty, P., Antonelli, A.** (2015). Biological evidence supports an early and complex emergence of the Isthmus of Panama. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 6110-6115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423853112>
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. A., Martínez, J. F.** (2007). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. Bogotá: Agencia Nacional de Hidrocarburos.
- Bayona, G., Baquero, M., Ramírez, C., Tabares, M., Salazar, A. M., Nova, G., Duarte, E., Pardo, A., Plata, A., Jaramillo, C., Rodríguez, G., Caballero, V., Cardona, A., Montes, C., Gómez, S., Cárdenas-Rozo, A.** (2020). Unraveling the widening of the earliest Andean northern orogen: Maastrichtian to early Eocene intra-basinal deformation in the northern Eastern Cordillera of Colombia. *Basin Research*, 1-37. <https://doi.org/10.1111/bre.12496.Q1>
- Bayona, G., Jaramillo, C., Rueda, M., Pardo, A., Christie, A., Hernández, G.** (2004). Important Paleotectonic and chronostratigraphic considerations of the Late Paleocene in the northernmost Andes as constrained by Paleocene rocks in the Cerrejón coal mine, Guajira, Colombia. En: Tercera Convención Técnica. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo. Bogotá.
- Bayona, G., Jiménez, G., Silva, C., Cardona, A., Montes, C., Roncancio, J., Cordani, U.** (2010). Paleomagnetic data and K-Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta Massif: A preliminary interpretation for block rotation and translations. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(4), 817-831. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.10.005>
- Bogotá-Ángel, G., Huang, H., Jardine, P.E., Chazot, N., Salamanca, S., Banks, H., Pardo-Trujillo, A., Plata, A., Dueñas, H., Star, W., Langelaan, R., Eisawi, A., Umeji, O.P., Euenwemba, L.O., Parmar, S., Rocha da Silveira, R., Lim, J.Y., Prasad, V., Morley, R.J., Bacon, C.D., Hoorn, C.** (2021). Climate and Geological Change as Drivers of Mauritiinae Palm Biogeography. *Journal of Biogeography*, 48(5), 1001-1022. <https://doi.org/10.1111/jbi.14098>
- Boonstra, M., Ramos, M. I. F., Lammertsma, E. I., Antoine, P. O., Hoorn, C.** (2015). Marine connections of Amazonia: Evidence from foraminifera and dinoflagellate cysts (early to middle Miocene, Colombia/Perú). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 417, 176-194. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.10.032>
- Cárdenas, D., Oboh-Ikuenobe, F., Jaramillo, C.** (2021). New acritarch and peridinioid dinoflagellate cyst species from the Oligocene–Miocene of Colombia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2021.104427>
- Cárdenas, D., Jaramillo, C., Oboh-Ikuenobe, F.** (2020). Early Miocene marine palynology of the Colombian Caribbean Margin: Biostratigraphic and paleoceanographic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 558. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109955>
- Carvalho, M. R., Jaramillo, C., de la Parra, F., Caballero-Rodríguez, D., Herrera, F., Wing, S., Turner, B. L., D'Apolito, C., Romero-Báez, M., Narváez, P., Martínez, C., Gutierrez, M., Labandeira, C., Bayona, G., Rueda, M., Paez-Reyes, M., Cárdenas, D., Duque, Á., Crowley, J. L., Santos, C., Silvestro, D.** (2021). Extinction at the end-Cretaceous and the origin of modern Neotropical rainforests. *Science*, 372(6537), 63-68.
- Celis, S.A., Rodríguez-Tovar, F. J., Pardo-Trujillo, A., Giraldo-Villegas, C.A., Gallego, F., Plata, A., Trejos-Tamayo, R., Vallejo-Hincapie, F., Cardona, F.J.** (2023). Deciphering influencing processes in a tropical delta system (middle-late Eocene? To Early Miocene, Colombian Caribbean): signals from a well-core integrative sedimentological, ichnological, and micropaleontological analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, in press.
- Cione, A. L., Gasparini, G. M., Soibelzon, E., Soibelzon, L. H., and Tonni, E. P.** (2015). The great American biotic interchange: a South American perspective (p. 97). Dordrecht: Springer.
- Coates, A.G., Jackson, J.B.C., Collins, L.S., Cronin, T.H., Dowsett, H.J. Bybell, L.M., Jung, P., Obando, J.A.** (1992). Closure of the Isthmus of Panama: the near-shore marine record of Costa Rica and western Panama. *Geological Society of America Bulletin*, 104(7), 814-828.
- Coates, A. G., Collins, L. S., Aubry, M. P., Berggren, W. A.** (2004). The geology of the Darien, Panama, and the late Miocene-Pliocene collision of the Panama arc with northwestern South America. *GSA Bulletin*, 116(11-12), 1327-1344. <https://doi.org/10.1130/B25275.1>
- Coates, A., Obando, J.** (1996). The geologic evolution of the Central. Evolution and environment in tropical America, 21.

- Contreras, L., Rodríguez, G., Rueda, M., Bedoya, G., Santos, C., de la Parra, F.** (2010). Palynological events from Maastrichtian to Eocene in the middle Magdalena Valley basin, Colombia. En: Annual Convention and Exhibition. American Association Petroleum Geologists. New Orleans.
- Correa, E., Helenes, J., Pardo-Trujillo, A.** (2021). Middle Miocene dinoflagellate cyst assemblages and changes in marine productivity in western Colombia. *Marine Micropaleontology*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2021.102024>
- Cuartas, C., Jaramillo, C., Arjona, A., Pardo, A., da Silva, S., de la Parra, F., Romero, M., Mejía, P., Páez, M.** (2009). Análisis de la información palinoestratigráfica del Banco de Información Petrolera - BIP y de otras fuentes: Una estrategia para revisar el pasado y planear el futuro exploratorio del país. En: X Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Sub andinas. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo. Cartagena.
- de la Parra, F.** (2009). Palynological changes across the Cretaceous-Tertiary boundary in Colombia, South America. [Tesis maestría inédita]. University of Florida, Gainesville.
- de la Parra, F., Mora, A., Rueda, M. and Quintero, I.** (2015). Temporal and spatial distribution of tectonic events as deduced from reworked palynomorphs in the eastern Northern Andes. *AAPG Bulletin*, 99, 1455-1472. <https://doi.org/10.1306/02241511153>
- de la Parra, F., Pinzon, D., Rodríguez, G., Bedoya, O., Benson, R.** (2019). Lacustrine systems in the early Miocene of Northern South America evidence from the Upper Magdalena Valley, Colombia. *Palaios*, 34(10), 490-505. <https://doi.org/10.2110/palo.2019.025>
- de la Parra, F., Jaramillo, C., Kaskes, P., Goderis, S., Claeys, P., Villasante-Marcos, V., Bayona, G., Hatsukawa, Y., Caballero, D.** (2022). Unraveling the record of a tropical continental Cretaceous-Paleogene boundary in northern Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 114, 103717.
- de Porta, J., Solé de Porta, N.** (1962). Discusión sobre las edades de las formaciones Hoyón, Gualanday y La Cira en la región de Honda -San Juan de Río seco. *Boletín de Geología*, 9, 69-85.
- Domínguez-Giraldo, V., Arias-Díaz, A., Vallejo-Hincapié, F., Plata-Torres, A., Gallego, N. F., Pardo-Trujillo, A.** (2023). Middle-late Eocene to Early Miocene micropaleontology of the ANH-TIERRALTA-2-X-P well: biostratigraphic implications for southwestern deposits of the Sinú-San Jacinto Belt (Colombian Caribbean). *Journal of South American Earth Sciences*, in press.
- Dueñas, H. J.** (1977). Estudio palinológico del pozo Q-E-22 Oligoceno superior a Mioceno inferior, Planeta Rica, Norte de Colombia. *Boletín Geológico Servicio Geológico Nacional*, 22(3), 95-115.
- Dueñas, H. J.** (1980a). Palynology of Oligocene-Miocene strata of borehole Q-E22, Planeta Rica, northern Colombia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 30, 313-328.
- Dueñas, H. J.** (1980b). Palinología de los sedimentos Pliocénicos y Cuaternarios de la Sabana de Bogotá. *Boletín IG-USP*, 11, 31-189.
- Dueñas, H. J.** (1990). Los dinoflagelados, una nueva herramienta para el control biostratigráfico de sedimentos del Cretácico medio y tardío. *Revista de la academia colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales*, 17(66), 433-440.
- Dueñas, H.** (2001). Paleozoic palynological assemblages from the Llanos Orientales Basin, Colombia. 34 Annual Meeting of the American Association of Stratigraphic Palynologists. Proceedings, 16 p. San Antonio, USA.
- Dueñas, H.** (2002). Asociaciones palinológicas y posibilidades de hidrocarburos en el Paleozoico de la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia. Segunda Convención Técnica Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo. Geología y Petróleo en Colombia. Memoirs, p. 15-17. Bogotá.
- Dueñas, H. J.** (2011). The Paleozoic of the Llanos Orientales basin, Colombia: Integration of biostratigraphic data. *Bioss Limited 780*, unpublished report, 1-260.
- Dueñas, H. J., Castro, G.** (1981). Asociación palinológica de la Formación Mesa en la región de Falán. Tolima. Colombia. *Geología Norandina*, 3, 28-36.
- Dueñas, H. J., Césari, S. N.** (2005). Systematic study of Early Carboniferous palynological assemblages from Llanos Orientales basin, Colombia. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 7(2), 139-152.
- Dueñas, H. J., Césari, S. N.** (2006). Palynological evidence of Early Carboniferous sedimentation in the Llanos Orientales basin, Colombia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 138, 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2005.10.002>

- Dueñas, H. J.** (1989a). Presencia del género *Afropollis* en Colombia. *Boletim IG-USP*, 7, 155-161.
- Dueñas-Jiménez, H. J.** (1989b). Asociaciones palinológicas de las Formaciones Colón y Molino Nor-Oriente Colombiano. *Boletim IG-USP*, 7, 173-181.
- Dueñas-Jiménez, H. J.** (1983). Fluctuaciones del nivel del mar durante el depósito de los sedimentos basales de la Formación Ciénaga de Oro. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 15(58), 67-76.
- Dueñas-Jiménez, H. J.** (1986). Geología y palinología de la Formación Ciénaga de Oro (región Caribe Colombiana). *Publicaciones geológicas especiales del Ingeominas*, 18, 1-51.
- Dueñas-Jiménez, H. J., Gómez-González, C.** (2013). Bioestratigrafía de la Formación Cansona en la quebrada Peñitas, cinturón de San Jacinto. Implicaciones paleogeográficas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37, 527-539.
- Dueñas-Jiménez, H. J., Montalvo-Jónsson, J.** (2019). Precambrian records of the Llanos Orientales basin, Colombia. En: J. Gómez y D. Mateus-Zabala (Eds.), *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic-Paleozoic* (pp. 127-149). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.05>
- Dueñas-Jiménez, H. J., van der Hammen, T.** (2007). Significado geológico y asociaciones palinológicas de las formaciones Diablo Inferior (Mioceno Tardío) y San Fernando Superior (Mioceno Medio), Piedemonte cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. *Revista de la academia colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 31, 481-498.
- Dueñas-Jiménez, H. J., Corredor-Bohórquez, V. E., Montalvo-Jónsson, J.** (2020). Paleontology of the Paleozoic rocks of the Llanos Orientales basin, Colombia. En: J. Gómez, y D. Mateus-Zabala (Eds.), *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic- Paleozoic* (pp. 199-216). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.07>
- Duque-Castaño, M., Trejos-Tamayo, R., Osorio-Tabares, L. C., Angulo-Pardo, E., Vallejo, F., Plata, A., Pardo-Trujillo, A.** (2023). Lower to Middle Miocene multiproxy biostratigraphy of the P-18 core-stratigraphic well in Sinú-San Jacinto Basin, Caribbean region of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104228>.
- Duque-Caro, H.** (1990a). Neogene stratigraphy, paleoceanography and paleobiogeography in northwest South America and the evolution of the Panama Seaway. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 77(3-4), 203-234.
- Duque-Caro, H.** (1990b). The Choco Block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(1), 71-84.
- Duque-Caro, H.** (1971). Ciclos tectónicos y sedimentarios en el Norte de Colombia y sus relaciones con la paleoecología. *Boletín Geológico*, 19(3), 1-23.
- Duque-Herrera, A. F., Helenes, J., Pardo-Trujillo, A., Flores-Villarejo, J. A., Sierro-Sánchez, F. J.** (2018). Miocene biostratigraphy and paleoecology from dinoflagellates, benthic foraminifera and calcareous nannofossils on the Colombian Pacific coast. *Marine Micropaleontology*, 141, 42-54.
- Escobar, L. E.** (1982-1983). Estudio palinológico de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 7(8), 117-129.
- Etayo-Serna, F.** (1964). Posición de las faunas en los depósitos Cretácicos Colombianos y su valor en la subdivisión cronológica de los mismos. *Boletín de Geología*, 16(17), 5-142.
- Etayo-Serna, F.** (1979). Zonation of the Cretaceous of central Colombia by ammonites. *Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas*, 2, 1-186.
- Etayo-Serna, F., Renzoni, G. Barrero, D.** (1969). Contornos sucesivos del mar Cretáceo en Colombia. En: Primer congreso colombiano de Geología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Etayo-Serna, F., Solé de Porta, N., de Porta, J., Gaona, T.** (2003). The Batá Formation of Colombia is truly Cretaceous, not Jurassic. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(3), 113-117. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(03\)00048-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(03)00048-8)
- Fabré, A., Delaloye, M.** (1983). Intrusiones básicas Cretácicas en las sedimentitas de la parte central de la Cordillera Oriental. *Geología Norandina*, 6, 19-28.
- Faegri, K., Iversen, J.** (1989). *Textbook of Pollen Analysis*. New York: Academic Press.
- Gallego-Ríos, A. F., Pardo-Trujillo, A., López-Plazas, G. A.** (2020). The Morales Formation (New Unit): Record of fluvial-lacustrine environments and the beginning of the Miocene explosive volcanism in the Patía Sub-basin (SW of Colombia). En: J. Gómez y D. Mateus-Zabala

- (Eds.), *The Geology of Colombia*, vol. 3 Paleogene-Neogene (pp. 495-539). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019>
- Galvis, J., Huguet, A., Ruge, P.** (1979). Geología de la amazonía colombiana. *Boletín Geológico Ingeominas*, 22(3), 4-86.
- Garzón, S., Warny, S., Bart, P. J.** (2012). A palynological and sequence-stratigraphic study of Santonian-Maastrichtian strata from the Upper Magdalena Valley basin in central Colombia. *Palynology*, 36, 112-133. <https://doi.org/10.1080/01916122.2012.675147>
- Germeraad, J. H., Hopping, C. A., Muller, J.** (1968). Palynology of Tertiary sediments from tropical areas. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 6, 189-348. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(68\)90051-1](https://doi.org/10.1016/0034-6667(68)90051-1)
- Gómez, A. A., Jaramillo, C., Parra, M., Mora, A.** (2009). Huesser horizon: A lake and a marine incursion in northwestern South America during the early Miocene. *Palaios*, 24, 136-147. <http://dx.doi.org/10.2110/palo.2007.p07-074r>
- Gómez-Tapias, J., Nivia, A., Montes, N. E., Almanza, M. F., Alcárcel, F. A., Madrid, C. A.** (2015). Mapa Geológico de Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales.
- González-Guzmán, A. E.** (1967). A palynological study on the upper los Cuervos and Mirador formations (lower and middle Eocene: Tibú area, Colombia). Amsterdam: Leiden, Brill.
- Grösser, J. R., Prössl, F. K.** (1991). First evidence of the Silurian in Colombia: Palynostratigraphic data from the Quetame Massif, Cordillera Oriental. *Journal of South American Earth Sciences*, 4, 231-238. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(91\)90033-H](https://doi.org/10.1016/0895-9811(91)90033-H)
- Guerrero, J., Sarmiento, G.** (1996). Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en exploración petrolera. *Geología Colombiana*, 20, 3-66.
- Guillande, R., Pons, D., Bourgois, J.** (1990). Découverte d'une microflore continentale du Maestrichtien inférieur dans la Cordillère orientale de Colombie: Conséquences géodynamiques. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 310, II, 947-954.
- Herngreen, G. F. W., Dueñas-Jiménez, H. J.** (1990). Dating of the Cretaceous Une Formation, Colombia and the relationship with the Albian-Cenomanian African-South American microfloral province. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 66, 345-359. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(90\)90046-L](https://doi.org/10.1016/0034-6667(90)90046-L)
- Hooghiemstra, H.** (1984). Vegetational and climatic history of the High Plain of Bogotá, Colombia: A continuous record of 3.5 million years. *Dissertationes Botanicae*. Amsterdam: Lubrecht & Cramer Ltd.
- Hooghiemstra, H.** (1989). Quaternary and upper Pliocene glaciations and forest development in the tropical Andes: Evidence from a long high-resolution pollen record from the sedimentary basin of Bogota, Colombia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 72, 11-26. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(89\)90129-6](https://doi.org/10.1016/0031-0182(89)90129-6)
- Hooghiemstra, H., Wijninga, V. M., Cleef, A. M.** (2006). The paleobotanical record of Colombia: implications for biogeography and Biodiversity1. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 93(2), 297-325.
- Hooghiemstra, H., Cleef, A. M.** (1995). Pleistocene climatic change and environmental and generic dynamics in the north Andean montane forest and paramo. In: Balslev, H., Churchill, S. P., Forero E., and Luteyn J. L. (Eds.), *Biodiversity and conservation of Neotropical montane forests* (pp. 35-49). Nueva York: The New York Botanical Garden.
- Hooghiemstra, H., van der Hammen, T.** (1998). Neogene and Quaternary development of the neotropical rain forest: The forest refugia hypothesis, and a literature overview. *Earth Science Reviews*, 44, 147-183. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(98\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(98)00027-0)
- Hoorn, C.** (1988). Nota preliminar sobre la edad de los sedimentos terciarios de la zona de Araracuara (Amazonas). *Boletín Geológico INGEOMINAS*, 29(2), 85-95.
- Hoorn, C.** (1993). Marine incursions and the influence of Andean tectonics on the Miocene depositional history of northwestern Amazonia: Results of a palynostratigraphic study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 105, 267-309. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(93\)90087-Y](https://doi.org/10.1016/0031-0182(93)90087-Y)
- Hoorn, C.** (1994a). Fluvial palaeoenvironments in the intracratonic Amazonas basin (early Miocene-early middle Miocene, Colombia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 109, 1-54. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(94\)90117-1](https://doi.org/10.1016/0031-0182(94)90117-1)

- Hoorn, C.** (1994b). An environmental reconstruction of the palaeo-Amazon River system (middle-late Miocene, NW Amazonia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 112, 187-238. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0031-0182(94)90074-4)
- Hoorn, C.** (2006). Mangrove forests and marine incursions in Neogene Amazonia (lower Apaporis River, Colombia). *Palaios*, 21, 197-209. <http://dx.doi.org/10.2110/palo.2005.p05-131>
- Hoorn, C., Guerrero, J., Sarmiento, G. A., Lorente, M. A.** (1994). Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Geology*, 23(3), 237-240. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0237:ATAACF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0237:ATAACF>2.3.CO;2)
- Hyde, H. A., Williams, D. A.** (1944). The Right Word. *Pollen Analysis Circular*, 8, 1-6.
- Jansonius J, McGregor DC.** (eds) (1996). Palynology: principles and applications, vol 1-3. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, Dallas.
- Jaramillo, C. A.** (2002). Response of tropical vegetation to Paleogene warming. *Paleobiology*, 28, 222-243. [https://doi.org/10.1666/00948373\(2002\)028<0222:ROTVTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1666/00948373(2002)028<0222:ROTVTP>2.0.CO;2)
- Jaramillo, C. A.** (2012). Historia geológica del bosque húmedo neotropical. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(138), 57-77.
- Jaramillo, C. A.** (2019). 140 million years of tropical biome evolution. En: J. Gómez y A. O. Pinilla-Pachón (Eds.), *The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic* (pp. 1-52). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.06>
- Jaramillo, C.** (2023). The evolution of extant South American tropical biomes. *New Phytologist*.
- Jaramillo, C. A., Dilcher, D. L.** (2000). Microfloral diversity patterns of the late Paleocene–Eocene interval in Colombia, northern South America. *Geology*, 28, 815-818. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<815:MDPOTL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<815:MDPOTL>2.0.CO;2)
- Jaramillo, C. A., Dilcher, D. L.** (2001). Middle Paleogene palynology of Central Colombia, South America: A study of pollen and spores from tropical latitudes. *Palaeontographica*, 258, 87-213. <https://doi.org/10.1127/palb/258/2001/87>
- Jaramillo, C. A., Rueda, M.** (2004). Impact of biostratigraphy on oil exploration. En: Tercera Convención Técnica. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo. Bogotá.
- Jaramillo, C. A., Yepes-Amezquita, O.** (1994). Palinoestratigrafía del grupo Olini (Coniciano-Campaniano), Valle Superior del Magdalena, Colombia. In: F. Etayo (Ed.), *Estudios Geológicos del Valle Superior del Magdalena* (pp. 1-18). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Jaramillo, C. A., Muñoz, F., Cogollo, M., de la Parra, F.** (2005). Quantitative biostratigraphy for the Cuervos Formation (Paleocene) of the Llanos foothills, Colombia: Improving palynological resolution for oil exploration. En: A. J. Powell y J. B. Riding (Eds.), *Recent Developments in Applied Biostratigraphy* (pp. 145-159). UK: The Micropalaeontological Society, Special Publications.
- Jaramillo, C. A., Rueda, M. J., Mora, G.** (2006). Cenozoic plant diversity in the Neotropics. *Science*, 311, 1893-1896. <https://doi.org/10.1126/science.1121380>
- Jaramillo, C. A., Bayona, G., Pardo-Trujillo, A., Rueda, M., Torres, V., Harrington, G. J., Mora, G.** (2007). The palynology of the Cerrejón formation (upper Paleocene) of northern Colombia. *Palynology*, 31, 153-189. <https://doi.org/10.1080/01916122.2007.9989641>
- Jaramillo, C. A., Rueda, M., Bayona, G., Santos, C., Flórez P. and Parra F.** (2009). Biostratigraphy breaking paradigms: Dating the Mirador formation in the Llanos basin of Colombia. *Geologic Problem Solving with Microfossils. SEPM Special Publication*, 93, 29-40. <http://dx.doi.org/10.2110/sepm.sp.093.029>
- Jaramillo, C. A., Ochoa, D., Contreras, L., Pagani, M., Carvajal-Ortiz, H., Pratt, L. M., Krishnan, S., Cardona, A., Romero, M., Quiroz, L., Rodríguez, G., Rueda, M., de la Parra, F., Morón, S., Green, W., Bayona, G., Montes, C., Quintero, O., Ramírez, R., Mora, G., Schouten, S., Bermudez, H., Navarrete R., Parra, F., Alvarán, M., Osorno, J., Crowley, J. L., Valencia, V. and Vervoort, J.** (2010). Effects of Rapid Global Warming at the Paleocene-Eocene Boundary on Neotropical Vegetation. *Science*, 330, 957-960. <https://doi.org/10.1126/science.1193833>
- Jaramillo, C. A., Rueda, M. J., Torres, V.** (2011). A palynological zonation for the Cenozoic of the Llanos and Llanos Foothills of Colombia. *Palynology*, 35, 46-84. <https://doi.org/10.1080/01916122.2010.515069>
- Jaramillo, C., Zavada, M., Ortiz, J., Pardo, A., Ochoa, D.** (2013). The biogeography of the araucarian dispersed pollen *Cyclusphaera*. *International Journal of Plant Sciences*, 174(3), 489-498.

- Jaramillo, C. A., Romero, I., D'Apolito, C., Bayona, G., Duarte, E., Lowye, S., Escobar, J., Luque, J., Carrillo-Briceño, J. D., Zapata, V., Mora, A., Schouten, S., Zavada, M., Harrington, G., Ortiz, J., Wesselingh, F. P.** (2017). Miocene flooding events of western Amazonia. *Science Advances*, 3, 160-169. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601693>
- Jaramillo, C., Sepulchre, P., Cardenas, D., Correa-Metrio, A., Moreno, J. E., Trejos, R., Vallejo, D., Hoyos, N., Martínez, C., Carvalho, D., Escobar, J., Oboh-Ikuenobe, F., Prámparo, M.B., Pinzón, D.** (2020). Drastic vegetation change in the Guajira Peninsula (Colombia) during the Neogene. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35(11), e2020PA003933.
- Juliao-Lemus, T., Carvalho, M. A., Torres, D., Plata, A., Parra, C.** (2016). Paleoenvironmental reconstruction based on palynofacies analyses of the Cansona Formation (Late Cretaceous), Sinú-San Jacinto basin northwest, Colombia. *Journal of South American Earth Science*, 69, 103-118. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.03.009>
- Kedves, M., Solé de Porta, N.** (1963). Comparación de las esporas del género *Cicatricosisporites* R. Poto y Gell 193 de Hungría y Colombia. Algunos Problemas referente a su significado estratigráfico. *Boletín de Geología*, 12, 51-76.
- Keigwin, L.** (1982). Isotopic paleoceanography of the Caribbean and East Pacific: role of Panama uplift in late Neogene time. *Science*, 217, 350-353
- Kroeck, D., Pardo-Trujillo, A., Plata-Torres, A., Romero-Baéz, M., Servais, T.** (2019). Peri-Gondwanan acritarchs from the Ordovician of the Llanos Orientales basin, Colombia. *Palynology*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/01916122.2019.1624279>
- Kuyl, O. S., Müller, J., Waterbolk H. T.** (1955). The application of palynology to oil geology, with especial reference to Western Venezuela. *Geologie en Mijnbouw*, 3, 49-76.
- Lemoigne, Y.** (1984). Données nouvelles sur la paléoflore de Colombie. *Geobios*, 17, 667-690.
- Lessios, H. A.** (2008). The great American schism: divergence of marine organisms after the rise of the Central American Isthmus. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39, 63-91.
- Lorente, M. A.** (1986). Palynology and palynofacies of the upper Tertiary in Venezuela. Berlin: J. Cramer.
- Martínez, C., Madriñán, S., Zavada, M., Jaramillo, C. A.** (2013). Tracing the fossil pollen record of *Hedyosmum* (Chloranthaceae), an old lineage with recent Neotropical diversification. *Grana*, 52(3), 161-180. <https://doi.org/10.1080/00173134.2012.760646>
- Martínez, C., Jaramillo, C., Martínez-Murcia, J., Crepet, W., Cárdenas, A., Escobar, J., Moreno, F., Pardo-Trujillo, A., Caballero-Rodríguez, D.** (2021). Paleoclimatic and paleoecological reconstruction of a middle to late Eocene South American tropical dry forest. *Global and Planetary Change*, 205, 103617. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103617>
- Maya, M., González, H.** (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico Ingeominas*, 35, 43-57.
- Mejía-Velásquez, P., Dilcher, D., Jaramillo, C., Fortini, L., Manchester, R. S.** (2012). Palynological composition of a Lower Cretaceous South American tropical sequence: Climatic implications and diversity comparisons with other latitudes. *American Journal of Botany*, 99(11), 1819-1827. <https://doi.org/10.3732/ajb.1200135>
- Mojica, J., Kammer, A.** (1995). Eventos Jurásicos en Colombia. *Geología Colombiana*, 19, 165-172.
- Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J. C., Valencia, V., Ayala, C., Pérez-Angel, L. C., Rodríguez-Parra, L. A., Ramirez, V., Niño, H.** (2015). Middle Miocene closure of the Central American Seaway. *Science*, 348, 226-229. <https://doi.org/10.1126/science.aaa2815>
- Moreno-Sánchez, M., Pardo-Trujillo, A.** (2003). Stratigraphical and sedimentological constrains on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean Plate In: C. Bartolini, R. T. Buffler y J. F. Blickwede (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics* (pp. 891-924). Tulsa: American Association of Petroleum Geologist.
- Moreno-Sánchez, M., Gómez-Cruz, A. and Buitrago-Hincapié, J.** (2020). Paleozoic of Colombian Andes: New paleontological data and regional stratigraphic review. In: J. Gómez y A. O. Pinilla-Pachón (Eds.), *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic* (pp. 35-37). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.09>
- Muller, J., di Giacomo, E., van Erve, A. W.** (1987). A palynological zonation for the Cretaceous, Tertiary, and Quaternary of Northern South America. *AASP Contribution Series*, 19, 7-76.

- O’Dea, A., Lessios, H. A., Coates, A. G., Eytan, R. I., Restrepo-Moreno, S. A., Cione, A. L., Collins, L. S., De Queiroz, A., Farris, D. W., Norris, R. D., Stallard, R. F., Woodburne, M. O., Aguilera, O., Aubry, M. P., Berggren, W. A., Budd, A. F., Cozzuol, M. A., Coppard S. E., Duque-Caro, H., Finnegan, S., ... and Jackson, J. B. (2016). Formation of the Isthmus of Panama. *Science advances*, 2(8), doi:10.1126/sciadv.1600883.
- Ochoa, D., Hoorn, C., Jaramillo, C., Bayona, G., Parra, M., de la Parra, F. (2012). The final phase of tropical lowland conditions in the axial zone of the Eastern Cordillera of Colombia: Evidence from three palynological records. *Journal of South American Earth Sciences*, 39, 157-169. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.04.010>
- Osorio-Granada, E., Pardo-Trujillo, A., Restrepo-Moreno, S.A., Gallego, F., Muñoz, J., Plata, A., Trejos-Tamayo, R., Vallejo, F., Barbosa-Espitia, A., Cardona-Sánchez, F.J., Foster, D.A., Kamenov, G. (2020). Provenance of Eocene–Oligocene sediments in the San Jacinto Fold Belt: Paleogeographic and geodynamic implications for the northern Andes and the southern Caribbean. *Geosphere*, 16(1), 210–228, <https://doi.org/10.1130/GES02059.1>.
- Pardo-Trujillo, A., Jaramillo, C. A., Oboh-Ikuenobe, F. E. (2003). Paleogene palynostratigraphy of the Eastern Middle Magdalena Valley, Colombia. *Palynology*, 27, 155-178. <https://doi.org/10.2113/27.1.155>
- Pardo-Trujillo, A., Plata, A., Gómez-González, C. (2022). Palinología colombiana, métodos, aplicaciones y estado del conocimiento. Manizales: Centro editorial Universidad de Caldas
- Pardo-Trujillo, A., Roche, E. (2009). Paleocene-Eocene palynology and palynofacies from north-eastern Colombia and western Venezuela. Manizales: Centro Editorial Universidad De Caldas.
- Pardo-Trujillo, A., Cardona, A., Giraldo, A. S., León, S., Vallejo, D. F., Trejos-Tamayo, R., Plata, A., Ceballos, J., Echeverri, S., Barbosa-Espitia, A., Slatery, J., Salazar-Ríos, A., Botello, G. E., Celis, S. A., Osorio-Granada, E., Giraldo-Villegas C. A. (2020). Sedimentary record of the Cretaceous Paleocene arc continent collision in the northwestern Colombian Andes: Insights from stratigraphic and provenance constraints. *Sedimentary Geology*, 401, 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105627>
- Pardo, A., Jaramillo, C. (2014). Palinología y paleoambientes de los depósitos Paleógenos del sector central de la Cordillera Oriental Colombiana: 35 Millones de años de historia de la vegetación neotropical. Colombia Diversidad Biótica XI. Universidad Nacional de Colombia.
- Pardo-Trujillo, A. and Sánchez, C. A. (2009). Cyclospora en el Cenozoico de Colombia y su supuesto origen marino. *Caldasia*, 31, 105-121.
- Patarroyo, P. (2020). Barremian deposits of Colombia: A special emphasis on marine successions. In: J. Gómez y A. O. Pinilla-Pachón (Eds.), *The Geology of Colombia*, vol. 2, Mesozoic (pp. 36-37). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.12>
- Pindell, J. L., Kennan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: An update. In: K. H. James, M. A. Lorente and J. L. Pindell (Eds.), *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate* (pp. 1-55). London: The Geological Society of London, special publications. <https://doi.org/10.1144/SP328.1>
- Pinzón, D., Rodríguez, G., Rincón-Martínez, D., Prámparo, M. B., Guerin, G. R., Restrepo, S., Pérez-Panera J.P., De la Parra, F., Vargas, M.C., Vento, B., Martínez, J. (2022). Late Neogene chronostratigraphy and integrated paleoecological trends in the southwestern Caribbean Sea. *Marine Micropaleontology*, 172, 102106.
- Plata, A., Bárcena, M. Á., Vallejo, D. F., Trejos, R., Pardo-Trujillo, A., Flores, J. A., Sierro, F. J. (2018). First record of middle Miocene marine diatoms from the Colombian Pacific (NW South America) and their paleoceanographic significance. *Marine Micropaleontology*, 140, 17-32.
- Plata-Torres, A., Pardo-Trujillo, A., Vallejo-Hincapié, F., Trejos-Tamayo, R., Flores, J. A. (2022). Early Eocene (Ypresian) palynology of marine sediments from the Colombian Caribbean. *Journal of South American Earth Sciences*, 121, 104146.
- Pons, D. (1983). Études paléobotanique et palynologique de la Formation de Girón (Jurassique moyen–Crétacé Inférieur) dans la région de Lebrija, département de Santander, Colombie. *Comptes Rendus, Congrès Sociétés Savantes*, 1(107), 53-78.
- Prössl, K. F. (1992). Preliminary results of palynological investigations on the Cretaceous of Colombia, South America. *Review of Paleobotany and Palynology*, 71, 255-268. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(92\)90166-E](https://doi.org/10.1016/0034-6667(92)90166-E)
- Prössl, K. F., Grösser, J. R. (1995). The age of the Formación Amoyá, Upper Magdalena Valley: Another piece in the Paleozoic stratigraphic puzzle of Colombia. *Newsletters on Stratigraphy*, 32, 91-101.

- Prössl, K. F., Grösser, J. R.** (2009). Pyritized microfossils in palynological slides from the Late Cretaceous of Colombia. *Journal of Micropalaeontology*, 28, 45-52. <https://doi.org/10.1144/jm.28.1.45>
- Prössl, K. F., Vergara Streinesberger, L. V.** (1993). The Yavi Formation (Lower Cretaceous), Upper Magdalena Valley, Colombia: An integrated sedimentological and palynological study. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 188(2), 213-240.
- Rangel-Ch., J. O., Berrío, J. C., Jaramillo, J. A.** (2014). Cambios en los ambientes de la Orinoquía de Colombia desde el Paleoceno superior hasta el presente: Una aproximación inicial (compilación) sobre la reconstrucción de las formaciones vegetales y los paleoambientes según la zonación asociadas con sistemas fluvioacústres. In: J. O. Rangel-Ch. (Ed.), Colombia Diversidad Biótica XIV: La región de la Orinoquia de Colombia (pp. 31-70). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Räsänen, M. E., Linna, A. M., José C. R. Santos, Negri, F. R.** (1995). Late Miocene Tidal Deposits in the Amazonian Foreland Basin. *Science*, 269(5222), 386-390. <http://www.jstor.org/stable/2888281>
- Regali, M. S. P., Uesugui, N., Santos, A. S.** (1974). Palinología dos sedimentos Meso-Cenozoicos do Brasil (II). *Boletim Técnico da Petrobras*, 17(4), 263-301.
- Remy, W., Remy, R., Pfefferkorn, H. W., Volkheimer, W., Rabe, E.** (1975). Neueinstufung der Bocas-Folge (Bucaramanga, Kolumbien) in den unteren Jura anhand einer Phleboteris branneri und Classopollis Flora. *Argumenta Paleobotanica*, 4, 55-77.
- Renzoni, G.** (1989). Comparación entre las secuencias metasedimentarias de la Serranía de Naquén y de la Serra da Jacobina. *Boletín Geológico Ingeominas*, 30(2), 25-42.
- Rodríguez-Forero, G., Oboh-Ikuenobe, F. E., Jaramillo-Munoz, C., Rueda-Serrano, M. J., Cadena-Rueda, E.** (2012). Palynology of the Eocene Esmeraldas Formation, Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. *Palynology*, 36(Suppl_1), 96-111.
- Rodríguez-Forero G., de la Parra-Bonilla, F., Vargas-Fúquene, M. C., Bedoya-Martínez, O. G.** (2017). Palynology of the Aguardiente and Lower Capacho-Formations, Catatumbo basin Colombia. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 7(1), 31- 42. <https://doi.org/10.29047/01225383.63>
- Romero, I. C., Kong, S., Fowlkes, C. C., Jaramillo, C., Urban, M. A., Oboh- Ikuenobe, F., D'Apolito, C., Punyasena, S. W.** (2020). Improving the taxonomy of fossil pollen using convolutional neural networks and superresolution microscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(45), 28496-28505.
- Rubinstein, C. V., Vargas, M. C., de la Parra, F., Hughes, G. M. G., Solano C.** (2019). Lower Ordovician (late Tremadocian?- Floian) palynomorphs from the Llanos basin, Colombia: Biostratigraphic and paleogeographic significance. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 268, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2019.06.008>
- Ruiz, O., Pons, D.** (1996, agosto). Una asociación microfiorística del Eoceno-Oligoceno en el Piedemonte llanero, Casanare, Colombia Geología Regional. En: VII Congreso Colombiano de Geología. Sociedad Colombiana de Geología. Bogotá.
- Santos, C., Jaramillo, C., Bayona, G., Rueda, M., Torres, V.** (2008). Late Eocene marine incursion in north-western South America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 264, 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.04.010>
- Sarmiento, G.** (1992a). Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas. *Boletín Geológico Ingeominas*, 32(1-3), 1-44.
- Sarmiento Pérez, G.** (1992b). Palinología de la Formación Guaduas. Estratigráfica y sistemática. *Boletín Geológico Ingeominas*, 32(1-3), 45-126.
- Sarmiento, G., Guerrero, J.** (2000). Palinología del Santoniano tardío al Maastrichtiano del Piedemonte Llanero Colombiano. Correlación con el paleocinturón tropical. *Geología Colombiana*, 25, 111-147.
- Sarmiento-Rojas, L. F., Van Wess, J. D., Cloetingh, S.** (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21, 383-411. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003>
- Schmidt, D. N.** (2007). The closure history of the Central American seaway: evidence from isotopes and fossils to models and molecules, En: The Micropalaeontological Society, special publications. Deep-Time Perspectives on Climate Change: Marrying the Signal from Computer Models and Biological Proxies, M. Williams, A. M. Haywood, F. J. Gregory, D. N. Schmidt
- Schuler, M., Doubinger, J.** (1970). Observations Palynologiques dans le Bassin D'Amaga (Colombie). *Pollen et Spores*, 12(3), 429-450.
- Solé de Porta, N.** (1960a). Contribución a la Palinología del Terciario del Norte de Colombia. *Boletín Geológico Servicio Geológico Nacional*, 8(1-3), 75-94.

- Solé de Porta, N.** (1960b). Observaciones palinológicas sobre el Plioceno de Cartagena (Colombia). *Boletín de Geología*, 4, 45-50.
- Solé de Porta, N.** (1961). Contribución al estudio palinológico del Terciario de Colombia. *Boletín de Geología*, 7, 55-81.
- Solé de Porta, N.** (1963). Asociación espora-polínica hallada en una serie perteneciente a la Formación La Cira del Valle del Magdalena (Colombia). *Boletín Geológico Servicio Geológico Nacional*, 11(1-3), 5-16.
- Solé de Porta, N.** (1970). Tres nuevas especies de Cicatricosisporites en el Cretácico de Colombia. *Geología Colombiana*, 7, 105-109. Recuperado a partir de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/30386>
- Solé de Porta, N.** (1971). Algunos géneros nuevos de polen procedentes de la Formación Guaduas (Maastrichtiense-Paleoceno) de Colombia. *Studia Geologica Salmanticensis*, 2, 133-143.
- Solé de Porta, N.** (1972a). Contribución a la palinología del nivel de lutitas y arenas (Campaniense) en Guataquí (Valle del Magdalena, Colombia). *Revista Española de Micropaleontología*, IV(2), 225-250.
- Solé de Porta, N.** (1972b). Palinología de la Formación Cimarrona (Maastrichtiense) en el Valle Medio del Magdalena, Colombia. *Studia Geologica* (4), 103-142, Salamanca.
- Spikings, R., Paul, A.** (2019). The Permian-Triassic history of magmatic rocks of the northern Andes (Colombia and Ecuador): Supercontinent assembly and disassembly. En: J. Gómez y A. O. Pinilla-Pachón (Eds.), *The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic* (pp. 36-43). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.01>
- Théry, J. M., Peniguel, G., Haye, G.** (1984). Descubrimiento de acritarcos del Arenigiano cerca a Araracuara (Caquetá, Colombia). Ensayo de reinterpretación de esta región de la Saliente del Vaupés. *Geología Norandina*, 9, 3-18.
- Torres, V.** (2006). Pliocene-Pleistocene Evolution of Flora, Vegetation and Climate: A Palynological and Sedimentological Study of a 586-m core from the Bogota basin, Colombia. [Tesis doctoral]. University of Amsterdam, Amsterdam.
- Traverse, A.** (1988). *Paleopalynology*. Boston: Unwin Hyman.
- Traverse, A.** (2007). *Paleopalynology*. Dordrecht: Springer.
- Tyson, R. V.** (1995). *Sedimentary organic matter; organic facies and palynofacies*. London: Chapman and Hall.
- Vallejo, D. F., Flores, J. A., Plata, A., Trejos, R., Pardo, A., Sierro, F. J., Barcena, M. Á.** (2016). Low-Latitude Miocene Calcareous and Siliceous Microfossil Biostratigraphy from NW South America: Ladrilleros-Juanchaco Section, Colombian Pacific. *Ameghiniana*, 53(6), 629-644.
- van der Hammen, T.** (1954a). Principios de la nomenclatura palinológica sistemática. *Boletín Geológico Servicio Geológico Nacional*, 2(2), 3-24.
- van der Hammen, T.** (1954b). El desarrollo de la flora colombiana en los periodos geológicos: I, Maestrichtiano hasta el Terciario más inferior. *Boletín Geológico Servicio Geológico Nacional*, 2, 49-106.
- van der Hammen, T.** (1956a). Descripción de algunos géneros y especies de polen y esporas fósiles. *Boletín Geológico*, 4(2-3), 103-109. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol4.2-3.1956.201>
- van der Hammen, T.** (1956). Nomenclatura palinológica sistemática. *Boletín Geológico*, 4(2-3), 23-62. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol4.2-3.1956.184>
- van der Hammen, T.** (1957a). Climatic periodicity and evolution of South American Maestrichtian and Tertiary floras: A study based on pollen analysis in Colombia. *Boletín Geológico Servicio Geológico Nacional*, 5, 49-91.
- van der Hammen, T.** (1957b). Estratigrafía palinológica de la Sabana de Bogota (Cordillera Oriental de Colombia). *Boletín Geológico Servicio Geológico Nacional*, 5, 189-203.
- van der Hammen, T.** (1958). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y tectono-génesis de los Andes Colombianos. *Boletín Geológico Servicio Geológico Nacional*, 6(1-3), 60-116.
- van der Hammen, T.** (1960). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectogénesis de los Andes Colombianos. **Servicio Geológico Nacional**, Informe 1279, 73-128.
- van der Hammen, T.** (1961). Upper Cretaceous and Tertiary climatic periodicities and their causes. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 95, 440-448. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1961.tb50049.x>
- van der Hammen, T.** (1966). The Pliocene and Quaternary of the Sabana Formation. *Geol. Mijnbouw*, 45,102-109.
- van der Hammen, T.** (1974). The Pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America. *Journal of Biogeography*, 1(1), 3-26. <https://doi.org/10.2307/3038066>

- van der Hammen, T., Wimstra, T. A.** (1964). A palynological study on the Tertiary and Upper Cretaceous of Brithis Guiana. *Leidse Geologische mededelingen*, 30, 183-241.
- van der Hammen, T., Werner, J. H., van Dommelen, H.** (1973). Palynological record of the upheaval of the northern Andes: A study of the Pliocene and lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its high-Andean biota. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 16(1-2), 1-122. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(73\)90031-6](https://doi.org/10.1016/0034-6667(73)90031-6)
- van der Hammen, T., Cleef, A. M.** (1986). Development of the high Andean paramo flora and vegetation. En: F. Vuilleumier y M. Monasterio (Eds.), High altitude tropical biogeography (pp. 153-201). Oxford: Oxford University Press
- van der Hammen, T., García de Mutis, G.** (1965) The Paleocene Pollen Flora of Colombia. *Leidse Geologische Mededelingen*, 35, 105-116.
- van der Hammen, T., González, E.** (1960). Upper Pleistocene and Holocene climate and vegetation of the 'Sabana de Bogotá (Colombia, South America). *Leidse Geologische Mededelingen*, 25(1), 261-315.
- van der Hammen T. and Hooghiemstra H.** (1997). Chronostratigraphy and correlation of the Pliocene and Quaternary of Colombia. *Quaternary International*, 40, 81-91. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(96\)00064-X](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(96)00064-X)
- van der Kaars, W. A.** (1983). A palynological-Paleoecological study of the lower Tertiary coal-bed sequence from el Cerrejón (Colombia). *Geología Norandina*, 8, 33-48.
- Vergara, L., Guerrero, J., Patarroyo, P., Sarmiento, G.** (1995): Comentarios acerca de la Nomenclatura Estratigráfica del Cretácico Inferior del Valle Superior del Magdalena. *Geología Colombiana*, 19, 21-32, Santa fe de Bogotá
- Webb S. D.** (1995). Biological implications of the middle Miocene Amazon seaway. *Science* 269, 361-362.
- Webb, S. D.** (2006). The great american biotic interchange: patterns and processes I. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 93(2), 245-257.
- Wijninga, V. M., Kuhry, P.** (1990). A Pliocene flora from the Subachoque Valley (Cordillera Oriental, Colombia). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 62, 249-290. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(90\)90091-V](https://doi.org/10.1016/0034-6667(90)90091-V)
- Wijninga, V. M., Kuhry, P.** (1993). Late Pliocene paleoecology of the Guasca Valley Cordillera Oriental, Colombia). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 78, 69-127. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(93\)90018-P](https://doi.org/10.1016/0034-6667(93)90018-P)
- Wijninga, V. M.** (1996a). Neogene ecology of the Salto de Tequendama site (2475 m alt., Cordillera Oriental, Colombia): The paleobotanical record of montane and lowland forests. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 92, 97-156. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(94\)00100-6](https://doi.org/10.1016/0034-6667(94)00100-6)
- Wijninga, V. M.** (1996b). A Pliocene Podocarpus forest mire from the area of the High Plain of Bogotá (cordillera Oriental, Colombia). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 92(1-2), 157-205. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(95\)00101-8](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00101-8)
- Wijninga, V. M.** (1996c). Palynology and paleobotany of the Early Pliocene section Rio Frio 17 (Cordillera Oriental, Colombia): Biostratigraphical and chronostratigraphical implications. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 92(3-4), 329-350. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(95\)00102-6](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00102-6)
- Wijninga, V. M.** (1996d). Paleobotany and Palynology of Neogene Sediments from the High Plain of Bogotá (Colombia): Evolution of the Andean Flora from a Paleocological Perspective. [Tesis doctoral inédita]. University of Amsterdam, Amsterdam.
- Wimstra, T. A.** (1971), The palynology of the Guiana Coastal Basin. Published PhD Dissertation Univ. of Amsterdam, pp. 9-62.
- Woodburne, M. O.** (2010). The Great American Biotic Interchange: Dispersals, tectonics, climate, sea level and holding pens. *Journal of Mammalian Evolution*, 17(4), 245-264. <https://doi.org/10.1007/s10914-010-9144-8>
- Yepes, O.** (2001). Maastrichtian-Danian dinoflagellate cyst biostratigraphy and biogeography from two equatorial sections in Colombia and Venezuela. *Palynology*, 25(1), 217-249. <https://doi.org/10.1080/01916122.2001.9989561>
- Zachos, J. C., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K.** (2001). Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292(5517), 686-693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>
- Zapata, S., Calderon-Diaz, L., Jaramillo, C., Oboh-Ikuenobe, F., Piedrahita, J. C., Rodríguez-Cuevas, M., Cardona, A., Sobel, E. R., Parra, M., Valencia, V., Patiño, A., Jaramillo-Rios, J. S., Flores, M., Glodny, J.** (2023). Drainage and sedimentary response of the Northern Andes and the Pebas system to Miocene strike-slip tectonics: A source to sink study of the Magdalena Basin. *Basin Research*, 1- 44. <https://doi.org/10.1111/bre.12769>

Ensayo/Assay

Secuenciación de genomas utilizando lectura de cadenas largas

Genome sequencing using long-read sequencing

El año pasado la secuenciación de cadenas largas “Long-read sequencing” (LRS), fue declarada como la metodología mas importante en su campo (Marx, 2023; “Method of the Year 2022: long-read sequencing,” 2023) Esta tecnología hace parte de la 3ra generación de secuenciación de ácidos nucleicos y ha sido de gran importancia en la generación del genoma humano completo de telómero a telómero (T2T) (Gómez Gutiérrez, 2022). La secuenciación de ácidos nucleicos comenzó el siglo pasado en la década de los 70, cuando Frederick Sanger desarrollo la técnica de secuenciación genética, y Walter Gilbert y Allan Maxam desarrollaron una técnica química (Mukherjee, 2016). La automatización de la secuenciación de cadenas terminales de Sanger permitió completar el proyecto del genoma humano, que tuvo un costo de 3 billones de dólares y tardó 10 años. A partir del 2005 emergen tecnologías de secuenciación de última generación (NGS), entre las cuales se desarrollaron el secuenciador 454 de Life Sciences® por pirosecuenciación y la que imperó en su momento con base en los secuenciadores Illumina®, que lograron reducir el costo de la secuenciación a 1000 dólares por genoma. La característica principal de las NGS es el alto rendimiento, al utilizar la amplificación clonal del ADN por medio de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), la cual permite obtener cada fragmento del genoma secuenciado más de 50 veces. Sin embargo, la desventaja de estas tecnologías conocidas como de segunda generación es que generaban lecturas cortas entre 250 y 800 pares de bases, las cuales demandan un alto procesamiento computacional para su ensamblaje y no logran obtener la secuencia contigua de cromosomas completos (Figura 1).

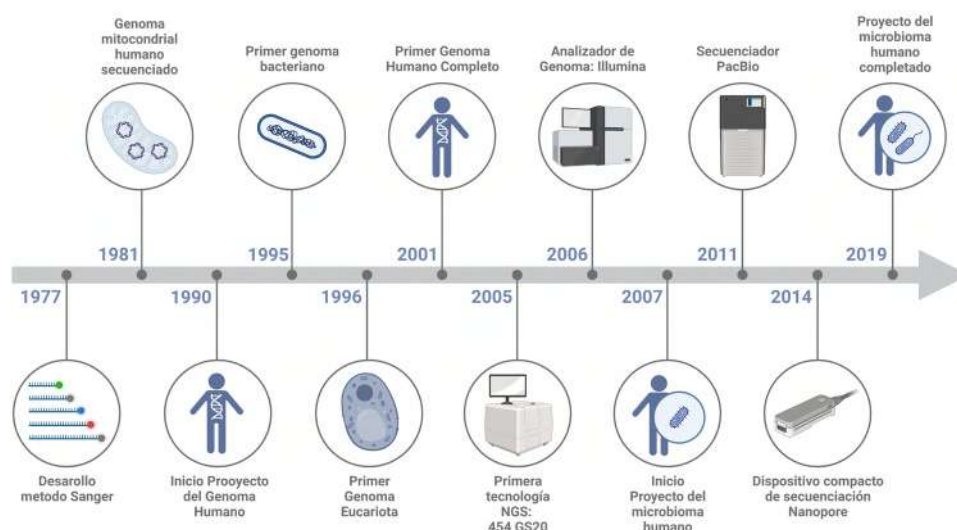


Figura 1. Historia de la secuenciación del ADN. Línea de tiempo con los principales eventos históricos acerca de las tecnologías de secuenciación. (Realizada por OMG usando <https://app.biorender.com>).

Los métodos de secuencia de tercera generación están enfocados en secuenciar cadenas largas tanto de ADN como de ARN; al momento hay 2 compañías: una es Pacific Biosciences (PacBio®), su tecnología se conoce como SMRT (Single Molecule Real-Time), en la que se emplea una plantilla de ADN circular de doble cadena con un adaptador de cadena sencilla en ambos extremos llamado “campana SMRT”, luego se agrega ADN polimerasa y una vez se ensambla se colocan en una célula de lectura y a medida que la polimerasa genera la nueva cadena y se agregan los nucleótidos marcados con diferentes fluorocromos, se hace una detección del proceso por rayos láser y esta se graba. Este proceso se repite miles de veces determinando la secuencia con una precisión del 99,9%. El método SMRT es capaz de leer en promedio fragmentos de 2 a 20 Gb (gigabases). Dependiendo de la plataforma empleada se puede obtener un cubrimiento de 25 a 40 veces mayor (Marx, 2023), (Figura 2).

La segunda compañía es Oxford Nanopore Technologies (ONT®), cuya tecnología de secuenciación emplea moléculas de ADN lineal en vez de las circulares usadas por PacBio. El sistema de ONT inicia la secuenciación uniendo la doble cadena de ADN a un adaptador que es precargado con una proteína motora; esta mezcla se carga en una célula de flujo que tiene miles de nanoporos insertados en una membrana sintética. La proteína motora desenrolla la doble cadena de ADN y junto con una corriente eléctrica empuja el ADN cargado negativamente a través del poro a un paso controlado. A medida que el ADN pasa por el poro causa una disrupción en la corriente que es analizada en tiempo real para determinar la secuencia de las bases. ONT lee fragmentos de 1 a 6 Gb con una precisión del 99%. Para lecturas ultra-largas puede llegar hasta 1 a 2 Mb (Marx, 2023) (Figura 2).

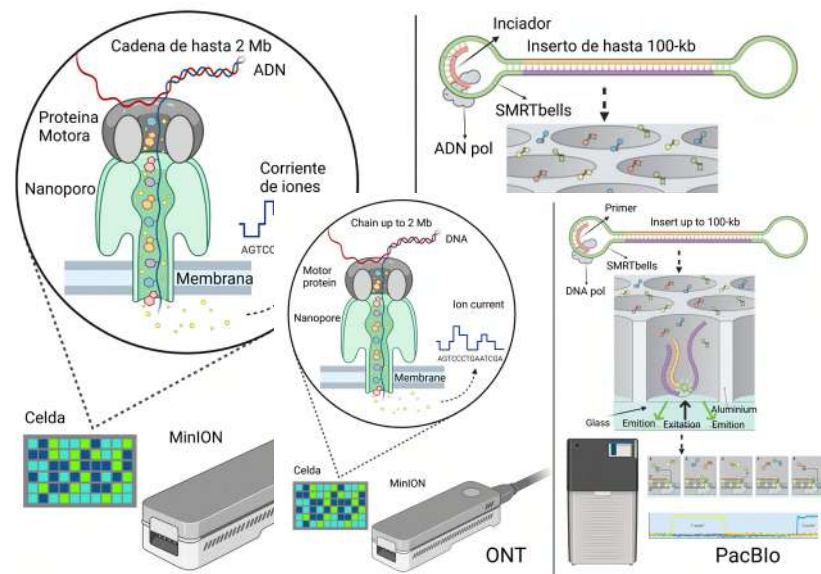


Figura 2. Tecnologías de secuenciación genómica basadas en lecturas de cadena larga. En el panel izquierdo, se muestra el esquema de la tecnología de nanoporos utilizando el MinION de ONT como ejemplo. Esta técnica utiliza una plantilla de ADN lineal cargada en una proteína motora y un nanoporo molecular. A medida que el ADN se desenrolla y es conducido a través del nanoporo, los cambios característicos en la corriente de iones permiten determinar la secuencia de las bases residentes en la cadena de ADN utilizando un algoritmo entrenado en la identificación de las bases. En el panel derecho se muestra el esquema de secuenciación SMRT, utilizando la plataforma PacBio como ejemplo. Esta técnica utiliza plantillas en forma de campanas SMRT, que se secuencian como moléculas individuales dentro de una matriz que cada uno contiene una ADN polimerasa con su iniciador. Un láser excita a cada nucleótido marcado con un fluorocromo específico durante su incorporación por la ADN polimerasa y cada señal de fluorescencia es captada y transformada en secuencia por un algoritmo para cada nucleótido. (Realizada por OMG usando <https://app.biorender.com>)

Uno de los factores más importantes en la obtención de LRS, es la preparación de los ácidos nucleicos, que deben ser de alto peso molecular. También, la secuenciación es basada directamente en la cadena de ADN nativo obtenido del organismo sin requerir amplificación por PCR, lo que puede eliminar la tasa de error de la polimerasa, en el cálculo de la incertidumbre del proceso de secuenciación.

LRS ha encontrado muchas aplicaciones en todas las áreas de la genómica, entre ellas la posibilidad de leer genomas de eucariotas de telómero a telómero (T2T) (**Gómez Gutiérrez, 2022**), lo que permite el análisis de muchas regiones de estos genómicas antes desconocidas, debido a su contenido en secuencias altamente repetitivas, localizadas en regiones centroméricas y teloméricas. Además, permite el estudio preciso y detallado de variantes cromosómicas producidas por rearrreglos, por variaciones en el número de copias (CNVs) de genes o por aneuploidías (**Nurk et al., 2022; Warburton & Sebra, 2023**).

La aplicación mas novedosa corresponde al estudio de la regulación de la expresión genética, debido a la forma de lectura de ONT y SMRT permite detectar modificaciones en el ADN y ARN, tales como la metilación 5 metilcitosina (5mC) y N6-metiladenosina entre otros. Como la secuenciación es del ADN nativo obtenido del organismo, y no de un clon obtenido por PCR, este proceso ha permitido obtener patrones de metilación de genomas (epigenómica) sin ningún tratamiento adicional del ADN. Por ejemplo, las plataformas detectan diferencias entre la citosina y 5-metilcitosina, a través de un cambio en la corriente en ONT o cambio en la intensidad de la señal en SMRT, luego con algoritmos desarrollados para la búsqueda de estos patrones de modificación en secuencias se logran obtener epigenomas. Esto permitirá un amplio estudio de la epigenética y epigenotranscriptómica, para entender mejor las bases de la regulación genética (**Warburton & Sebra, 2023**).

Finalmente, esta tecnología se está aplicando al estudio de la metagenómica, y el estudio de los microbiomas, al igual de la generación de una metacodificación de los organismos existentes que permita la realización de un árbol de la vida más completo y confiable (**Hoang et al., 2021**). La gran versatilidad de la LRS y sus múltiples aplicaciones, claramente nos permiten entender por qué esta metodología fue seleccionada como la tecnología del año 2022 (“**Method of the Year 2022: long-read sequencing,**” 2023).

Last year, Long-read sequencing (LRS) was declared the most important methodology in its field. (**Marx, 2023; “Method of the Year 2022: long-read sequencing,” 2023**). This technology is part of the 3rd generation of nucleic acid sequencing and has been of great importance in the generation of the complete human genome from telomere to telomere (T2T) (**Gómez Gutiérrez, 2022**). Nucleic acid sequencing began last century in the 1970s, when Frederick Sanger developed the genetic sequencing technique and Walter Gilbert and Allan Maxam developed a chemical technique for the sequencing of nucleic acids. (**Mukherjee, 2016**). The automation of Sanger end chain-termination sequencing enabled the completion of the human genome project, which cost \$3 billion and took 10 years. From in 2005 onwards, next generation sequencing technologies (NGS) emerged, among which the Life Sciences 454 sequencer® by pyrosequencing; and the one that prevailed at the time based on Illumina sequencer®, which managed to reduce the cost of sequencing to \$1000 per genome, were developed. The main characteristic of the NGS is its high yield, as it uses clonal amplification of the DNA by polymerase chain reaction (PCR), which makes it possible to obtain each fragment of the sequenced genome more than 50 times. However, the disadvantage of these technologies known as second generation is that they generate short reads between 250 and 800 base pairs, which require high computational processing for their assembly and do not obtain the contiguous sequence of complete chromosomes. (**Figure 1**).

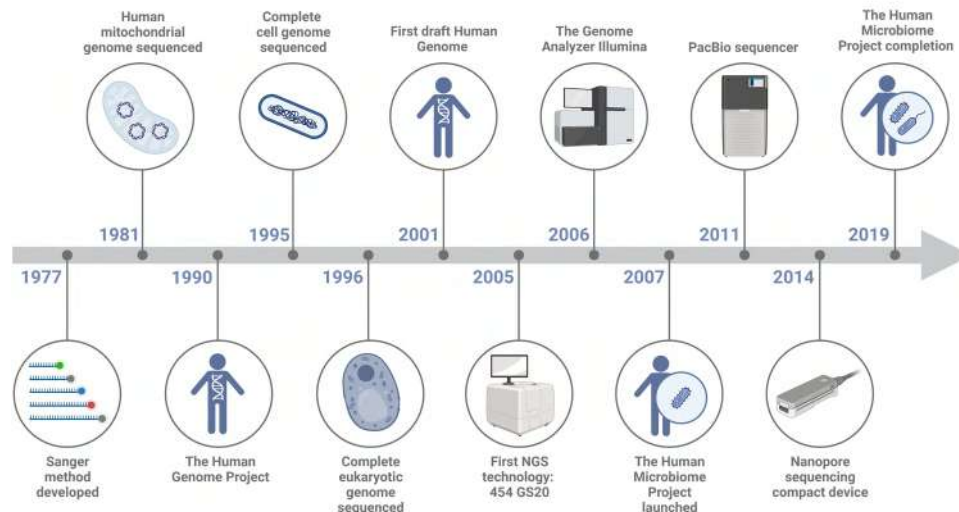


Figure 1. History of DNA sequencing. Timeline with major historical events about sequencing technologies. (Made by OMG using <https://app.biorender.com>).

Third generation sequencing methods are focused on sequencing long strands of both DNA and RNA; at the moment there are 2 companies; one is Pacific Biosciences (PacBio®), their technology is known as SMRT (Single Molecule Real-Time), in which a double-stranded circular DNA template is used with a single-stranded adapter at both ends called an SMRT bell, then DNA polymerase is added and once it is assembled, it is placed in a reading cell and as the polymerase generates the new strand, the nucleotides labeled with different fluorochromes are added, the process is detected by a laser beams and recorded. This process is repeated thousands of times determining the sequence with an accuracy of 99.9%. The SMRT method is capable of reading on average fragments of 2 to 20 Gb (gigabases). Depending on the platform used, a coverage of 25 to 40 times higher can be obtained (Marx, 2023)2023, (Figure 2).

The second company is Oxford Nanopore Technologies (ONT®), whose sequencing technology employs linear DNA molecules instead of the circular ones used by PacBio. ONT's system initiates sequencing by attaching double-stranded DNA to an adapter that is preloaded with a motor protein, this mixture is loaded into a flow cell that has thousands of nanopores embedded in a synthetic membrane. The motor protein unwinds the double-stranded DNA and together with an electrical current pushes the negatively charged DNA through the pore at a controlled rate. As the DNA passes through the pore it causes a disruption in the current that is analyzed in real time to determine the sequence of the bases. ONT reads fragments from 1 to 6 Gb with 99% accuracy. For ultra-long reads it can go up to 1 to 2 Mb (Marx, 2023) (Figure 2).

One of the most important factors in obtaining LRS is the preparation of nucleic acids, which must be of high molecular weight. Also, sequencing is based directly on the native DNA strand obtained from the organism without requiring PCR amplification, which can eliminate the polymerase error rate in calculating the uncertainty of the sequencing process.

LRS has found many applications in all areas of genomics, among them the possibility of reading eukaryotic genomes from telomere to telomere (T2T) (Gómez Gutiérrez, 2022). This allows the analysis of many previously unknown regions of these genomes, due to their content in highly repetitive sequence, located in centromeric and telomeric regions. In addition, it allows the precise and detailed study of chromosomal variants produced by rearrangements and variations in the number of copies (CNVs) of genes or aneuploidies (Nurk *et al.*, 2022; Warburton & Sebra, 2023).

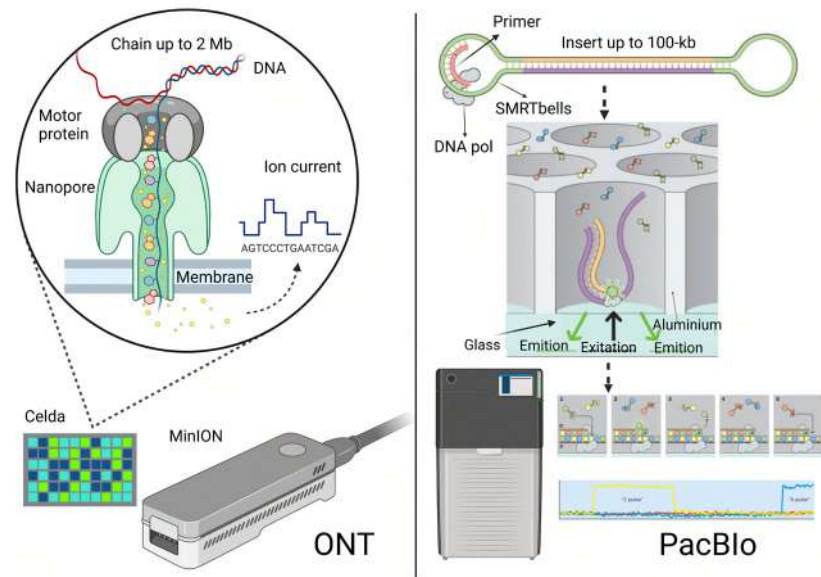


Figure 2. Genomic sequencing technologies based on long-chain reads. In the left panel, the schematic of nanopore technology is shown using ONT MiniION as an example. This technique uses a linear DNA template loaded onto a motor protein and a molecular nanopore. As the DNA unwinds and is driven through the nanopore, characteristic changes in the ion current allow the sequence of resident bases on the DNA strand to be determined using a trained base caller algorithm. The right panel shows the SMRT sequencing scheme, using the PacBio platform as an example. This technique uses dumbbell-shaped templates “SMRTbells”, which are sequenced as individual molecules within an array that each contain a DNA polymerase with its primer. A laser excites each nucleotide labeled with a specific fluorochrome during its incorporation by the DNA polymerase and each fluorescence signal is captured and transformed into sequence by an algorithm for each nucleotide. (Done by OMG using <https://app.biorender.com>)

The most ground-breaking application corresponds to the study of the regulation of gene expression, due to the way ONT and SMRT are read, which allows the detection of modifications in DNA and RNA, such as methylation of 5-methylcytosine (5mC) and N6-methyladenosine, among others. As the sequencing uses the native DNA obtained from the organism, and not from cloned fragments obtained by PCR, this process has made it possible to obtain genome methylation patterns (epigenomics) without any additional DNA treatment. For example, the platforms detect differences between cytosine and 5mC, through a change in current in ONT or change in signal intensity in SMRT, then with algorithms developed to search for these patterns of modification in sequences, epigenomes can be obtained. This will allow a broad study of epigenetics and epigeno transcriptomics to better understand the basis of gene regulation (Warburton & Sebra, 2023)2023.

Finally, this technology is being applied to the study of metagenomics, and the study of microbiomes, as well as the generation of a meta-coding of existing organisms that allows the construction of a more complete and reliable tree of life (Hoang *et al.*, 2021). The great versatility of the LRS and its multiple applications clearly allow us to understand why this methodology was selected as the technology of the year 2022 (“Method of the Year 2022: long-read sequencing,” 2023).

© Juan Guillermo McEwen^{1,2,*}, © Oscar Mauricio Gómez^{1,3}

¹ Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB), Medellín, Colombia.

² Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

³ Escuela de Microbiología, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Referencias

- Gómez-Gutiérrez, A.** (2022). El genoma humano: llenando los vacíos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(179), 577-579. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1712>
- Hoang, M.T.V., Irinyi, L., Hu, Y., Schwessinger, B., Meyer, W.** (2021). Long-Reads-Based Metagenomics in Clinical Diagnosis With a Special Focus on Fungal Infections. *Frontiers in Microbiology*, 12, 708550. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.708550>
- Marx, V.** (2023). Method of the year: long-read sequencing. *Nature Methods*, 20(1), 6-11. <https://doi.org/10.1038/s41592-022-01730-w>
- Method of the Year 2022: long-read sequencing.** (2023). *Nature Methods*, 20(1), 1. <https://doi.org/10.1038/s41592-022-01759-x>
- Mukherjee, S.** (2016). The Gene: An Intimate History. *Scribner*. <https://books.google.com.co/books?id=S4nHjgEACAAJ>
- Nurk, S., Koren, S., Rhie, A., Rautiainen, M., Bzikadze, A. V., Mikheenko, A., Vollger, M. R., Altemose, N., Uralsky, L., Gershman, A., Aganezov, S., Hoyt, S.J., Diekhans, M., Logsdon, G. A., Alonge, M., Antonarakis, S. E., Borchers, M., Bouffard, G. G., Brooks, S.Y., . . . Phillippy, A. M.** (2022). The complete sequence of a human genome. *Science*, 376(6588), 44-53. <https://doi.org/10.1126/science.abj6987>
- Warburton, P.E., Sebra, R.P.** (2023). Long-Read DNA Sequencing: Recent Advances and Remaining Challenges. *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, 24. <https://doi.org/10.1146/annurev-genom-101722-103045>

Ensayo

El Grupo de Astrofísica Solar (GoSA) del Observatorio Astronómico Nacional de Colombia: 10 años indagando sobre la ciencia del Sol

The Group of Solar Astrophysics (GoSA) of the National Astronomical Observatory of Colombia: 10 years exploring the science of the Sun

Resumen

El Grupo de Astrofísica Solar (GoSA) del Observatorio Astronómico Nacional de Colombia es un grupo de investigación que se dedica al estudio de la astrofísica solar. El grupo cumplió su décimo aniversario en el 2022, período durante el cual ha contribuido significativamente a la investigación en astrofísica solar, la formación de estudiantes y la apropiación social de la ciencia en Colombia. Esta reseña abarca desde los aspectos relacionados con la investigación en la física del Sol, resaltando los principales logros del GoSA desde su conformación, hasta las perspectivas en los proyectos futuros para seguir profundizando en el entendimiento del Sol y los desafíos de este campo de investigación.

Palabras clave: Astrofísica; Sol; Física solar; Heliofísica; Colombia.

Abstract

The Group of Solar Astrophysics (GoSA) of the National Astronomical Observatory of Colombia is a research group dedicated to the study of solar astrophysics. The group celebrated its tenth anniversary in 2022. During these years, it has made significant contributions to solar astrophysics research, student education and training, and the social appropriation of science in Colombia. This review covers aspects related to its research in solar physics highlighting its main achievements since its creation and the perspectives for future projects to further deepen our understanding of the Sun and the challenges within this field of research.

Keywords: Astrophysics; Sun; Solar physics; Heliophysics, Colombia.

El estudio de Sol

La astrofísica solar, o heliofísica, es un campo de la astrofísica que se centra en el estudio de la estrella central de nuestro sistema solar, el Sol. La investigación en este campo es de gran relevancia para la comprensión de la física de las estrellas, de otros plasmas, y del impacto del Sol en la vida de nuestro planeta. Uno de los mayores logros de la investigación en astrofísica solar ha sido el desarrollo de los medios que han permitido a los científicos observar y medir los procesos físicos en las diferentes capas de la atmósfera solar con una precisión sin precedentes. El uso de técnicas como la espectroscopía, la heliosismología y la observación (remota e *in situ*) de la atmósfera solar ha permitido importantes avances en la comprensión de la física del Sol. Esto se ha conseguido mediante la medición de sus propiedades físicas, por ejemplo, la temperatura, la densidad, la velocidad y el campo magnético en diferentes regiones y bajo diferentes dinámicas y escalas. Además, se han podido observar y estudiar eventos de actividad solar asociados con la generación de manchas solares, erupciones y eyecciones de masa coronal, lo que ha permitido ampliar el conocimiento de nuestra estrella.

La comprensión de la física del Sol es fundamental para entender el impacto de esta estrella en nuestra sociedad. Los fenómenos de actividad solar pueden causar problemas en las comunicaciones, los sistemas eléctricos y la navegación, por lo que es importante

desarrollar técnicas para predecir estos eventos y mitigar sus efectos. El estudio de la física del Sol también es importante para entender mejor su comportamiento y su impacto en el clima terrestre.

Antecedentes

En la historia de Colombia la investigación relacionada con el Sol se remonta a observaciones solares y de tránsitos en el siglo XX (Arias de Greiff, 1993). El Observatorio Astronómico de Santafé de Bogotá (actualmente Observatorio Astronómico Nacional de Colombia, OAN), fue fundado en 1803 por José Celestino Mutis, y en él se hicieron mediciones del movimiento aparente del Sol. Francisco José de Caldas, primer director del Observatorio, registró el paso del Sol por el meridiano del observador desde el salón principal de la edificación que lo albergaba, siguiendo su reflejo en el suelo tras entrar por una pequeña rendija situada en la terraza. Esta era una visión utilitarista de la astronomía para fines relacionados con la geografía (Portilla, 2020).

En la segunda mitad del siglo XX comenzaron a hacerse con mayor regularidad observaciones solares y de tránsitos y eclipses. Los detalles específicos de algunas de estas observaciones se publicaron en los Anales del Observatorio Astronómico Nacional de Bogotá, cuyo primer número apareció en 1882, y en la prensa escrita de la época, como se destaca en un reciente trabajo de investigación (Moreno-Cárdenas *et al.*, 2022) y en las referencias que allí se mencionan. Se destaca la observación hecha por el astrónomo José María González Benito de una gran región activa en el Sol en agosto de 1893, durante el ciclo solar número 13, y que fue publicada en *L'Astronomie*, de la Sociedad Astronómica de Francia, una de las publicaciones más importantes de astronomía de la época. Durante el siglo XX se realizaron observaciones solares y se siguieron registrando eclipses de Sol, pero gran parte de las investigaciones se centraron en la meteorología y la radiación solar, especialmente a partir de la fundación del Observatorio Nacional de San Bartolomé en 1922, el cual sirvió como centro del Servicio Meteorológico de la República. Un anteojo acimutal de Zeiss se destinó para la observación visual de las manchas del Sol y se dio especial énfasis a los estudios de radiación solar en el país (Sarasola, 1923). Esta institución fue predecesora del Instituto Geofísico de los Andes Colombianos, que tuvo un destacado reconocimiento internacional, especialmente hacia mediados del siglo XX a raíz de la celebración mundial del Año Geofísico Internacional (1957 – 1958).

Hacia finales del siglo XX y comienzos del nuevo milenio creció el interés de varias universidades y grupos de diversas partes del país por profundizar en los estudios relacionadas con el Sol (Higuera, 2017). En ese contexto, se dedicaron esfuerzos valiosos al desarrollo de esta línea de investigación y a la formación de nuevas generaciones de estudiantes en el campo de la física del Sol. Ejemplos de estos esfuerzos se encuentran en la Universidad de los Andes, en donde, bajo el liderazgo del profesor Benjamín Oostra, se han materializado varios espectrógrafos en el óptico para la determinación por el efecto Zeeman del campo magnético en manchas solares y una radioantena que por muchos años ha tomado radioespectrogramas en la banda de los cientos de MHz. Otro ejemplo de la observación en la longitud de ondas de radio de fenómenos causados por el Sol, lo ha liderado la Universidad Tecnológica de Pereira con su radiotelescopio compacto, usado en el monitoreo del clima espacial. Otros esfuerzos incluyen el desarrollo de simulaciones de magnetohidrodinámica (*magnetohydrodynamics*, MHD) en la Universidad Industrial de Santander, o el análisis del viento solar en nuestro vecindario planetario en la Universidad de Antioquia. Estos son algunos de los ejemplos de proyectos destacados en el campo del estudio del Sol en Colombia.

Reconociendo el valor que todos y cada uno de estos esfuerzos ha tenido para el desarrollo de la astrofísica en nuestro país, nuestra reseña se centra en los aportes del grupo de investigación en astrofísica solar del Observatorio Astronómico Nacional, que se destaca como el más consolidado en Colombia, como lo demuestra el notable reconocimiento internacional de varias de sus líneas de investigación en heliofísica.

Creación del Grupo de Astrofísica Solar (GoSA)

El Grupo de Astrofísica Solar (GoSA) es un grupo de investigación vinculado al OAN, en particular al Grupo de Astronomía, Astrofísica y Cosmología, clasificado en la máxima categoría por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias). El GoSA se formalizó entre el 2011 y el 2012, por lo que ya cumplió su primera década dedicado al desarrollo continuo de proyectos de investigación. El interés por crear el grupo surgió hacia el 2010, con los primeros trabajos en el campo del estudio del Sol, interés que se había potenciado con la visita a Bogotá en el 2009 del investigador español Bruno Sánchez Andrade-Nuño, uno de los doce científicos invitados a la Cátedra Mutis “Astronomía para todos: retos modernos de una ciencia milenaria”, y cuyo tema de investigación era el estudio de las capas altas de la atmósfera solar.

En el 2012, la Universidad Nacional de Colombia organizó una escuela internacional de verano dedicada a la astrofísica solar y a las tendencias y técnicas modernas en este campo (*Solar Astrophysics: Modern Trends and Techniques*). En ella participaron como ponentes 16 investigadores (cuatro nacionales y 12 internacionales) que disertaron sobre los siguientes temas: el Sol como estrella de secuencia principal, la instrumentación solar, el Sol en calma, las manchas solares, la corona solar, el Sol activo y las fulguraciones. Cerca de 30 estudiantes participaron en la escuela y un buen número de ellos decidieron incursionar en la física solar y desarrollar proyectos de investigación en esta área. Fue en ese momento que se estructuró el GoSA a través de seminarios semanales y un plan de trabajo que incluía colaboraciones internacionales, publicaciones y proyectos de investigación asociados con trabajos de grado, principalmente de la carrera de Física de la Universidad Nacional de Colombia, y a tesis de Maestría en Ciencias - Astronomía.

Desentrañando la física del Sol a través de la investigación

El GoSA se dedica a la investigación en astrofísica solar, es decir, el estudio del Sol y su influencia en el sistema solar y en la Tierra. Entre los temas de su interés se destaca el estudio de la dinámica de la superficie solar, incluyendo las manchas, los poros solares y las pequeñas estructuras magnéticas, así como la estructura y la dinámica del campo magnético en la atmósfera solar y los fenómenos explosivos de actividad solar. Las líneas principales de trabajo del GoSA se enumeran y detallan brevemente a continuación.

- Observación solar en el óptico en alta resolución: movimientos propios y dinámica de la superficie solar, puntos magnéticos brillantes (*magnetic bright points*, MBP), manchas solares y fulguraciones solares en luz blanca. Técnicas de espectropolarimetría y heliosismología.
- Observación solar en radio: análisis de espectrogramas para profundizar en fenómenos de actividad solar.
- Observación solar en rayos-X: uso de los rayos X como una técnica diagnóstica para la caracterización del transporte de partículas energizadas en la corona solar.
- Modelación: simulaciones de dinámicas físicas en el Sol, incluido el interior solar (termodinámica), las ondas magneto-acústicas, la interacción del plasma y el campo magnético.
- Instrumentación: diseño y construcción de radiotelescopios, radiointerferómetros y sus sistemas de control, entre los que se destaca el primer radiointerferómetro solar colombiano (Guevara-Gómez, 2016).
- Clima espacial y condiciones de atmósferas planetarias: estudio de la influencia del Sol en las condiciones de atmósferas planetarias y las propiedades relacionadas con las condiciones para la habitabilidad del planeta.
- Inteligencia artificial en física solar: es la línea de trabajo más reciente del grupo y busca profundizar en el uso de métodos numéricos y macrodatos (*big data*) en el análisis de datos solares.

El GoSA utiliza diversas aproximaciones observacionales y teóricas para investigar la dinámica solar, los campos magnéticos y los mecanismos de transferencia de energía. Se emplean instrumentos y técnicas de última generación para observar las erupciones

solares, las eyecciones de masa coronal y otros fenómenos de actividad solar en múltiples escalas espaciales y temporales, con el objetivo de desentrañar la física fundamental detrás de los procesos que ocurren en el Sol. Los datos observacionales utilizados para las investigaciones del GoSA provienen de telescopios solares terrestres (Swedish Solar Tower, GREGOR, Big Bear Solar Observatory) y espaciales (SOHO, Solar Dynamics Observatory, Hinode, IRIS) (Vargas-Domínguez, 2015).

Con sus líneas de investigación, el GoSA busca contribuir al campo más amplio de la astrofísica solar y proporcionar conocimientos valiosos sobre el impacto del Sol en nuestro sistema solar y la Tierra. Sus hallazgos tienen implicaciones en la predicción del clima espacial, lo cual es crucial para la seguridad de satélites, naves espaciales y redes eléctricas en nuestro planeta (Erdélyi *et al.*, 2022).

Una década de logros

A lo largo de sus diez años de vida, el GoSA ha vinculado a 54 personas (51 estudiantes y tres profesores) y ha alcanzado logros importantes en sus tres áreas de trabajo: investigación, formación y divulgación del conocimiento.

Investigación

Desde su conformación, el GoSA se ha consolidado como un grupo líder en el estudio de la astrofísica solar en Latinoamérica y ha alcanzado un destacado reconocimiento internacional. El grupo ha establecido colaboraciones con un gran número de grupos de investigación en el mundo (Figura 1), lo que ha permitido la participación de sus miembros en proyectos internacionales de gran envergadura. Asimismo, el grupo ha organizado y participado en numerosas conferencias, simposios y talleres internacionales, lo que ha conllevado la difusión de sus estudios y la colaboración con investigadores de gran trayectoria en su campo.

En Colombia, el GoSA ha sido pionero en la investigación moderna en astrofísica solar y ha contribuido significativamente al desarrollo de esta área de investigación en el país. El grupo ha tenido destacada participación en varias ediciones del Congreso Colombiano de Astronomía (CoCoA), contribuyendo con el mayor número de trabajos presentados en las dos últimas ediciones del congreso más importante de investigación en Astronomía y astrofísica de Colombia (Medellín 2019, Tunja 2022). En la última versión del CoCoA, en septiembre del 2022, las contribuciones del GoSA representaron el 18 % del total de 147 trabajos presentados por grupos de investigación e investigadores del país.

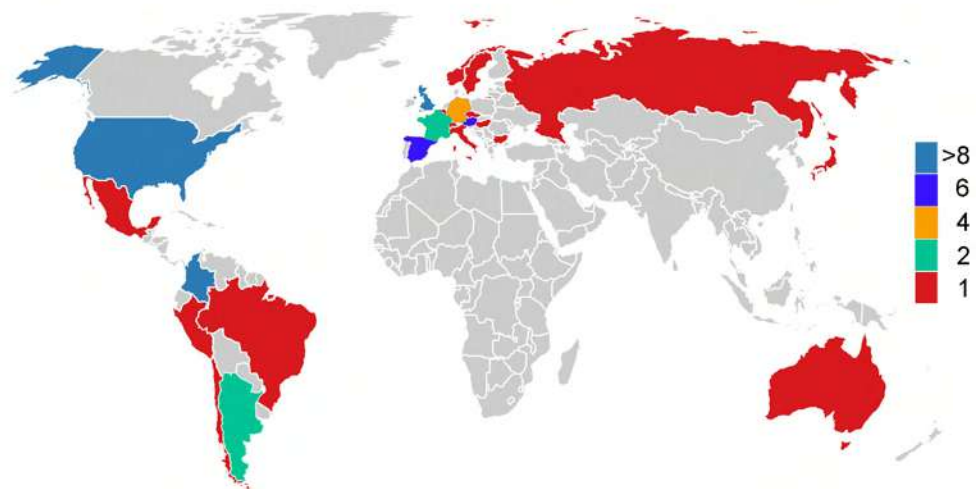


Figura 1. Países con los cuales el GoSA ha establecido colaboraciones con investigadores e instituciones, a través de las cuales se han generado productos académicos. La escala de colores indica el correspondiente número de colaboraciones

Desde su conformación, el GoSA ha difundido un número relevante de productos académicos (**Figura 2**). Se destacan sus más de sesenta publicaciones científicas en artículos y memorias de congresos, incluyendo trabajos en las revistas internacionales más destacadas en investigación en Astronomía y astrofísica (Astrophysical Journal, Astronomy and Astrophysics, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Solar Physics, Advances in Space Research, entre otras), lo que demuestra el notable nivel de investigación alcanzado por el grupo. Los resultados de estas investigaciones se han presentado en los principales eventos internacionales en este campo, con un promedio de cerca de 18 contribuciones anuales durante los últimos diez años (**Figura 2**).

El GoSA ha tenido un papel importante en el establecimiento de redes de investigación en la comunidad de astrofísica solar. En el 2016, el grupo organizó el primer Simposio de la Unión Astronómica Internacional en Colombia, que contó con la participación de 150 investigadores y estudiantes de 30 países. El evento académico, que se convocó bajo el nombre de *Fine Structure and Dynamics of the Solar Atmosphere* (Vargas-Domínguez *et al.*, 2017) ha sido uno de los referentes más importantes para dar a conocer el trabajo del GoSA en la comunidad de investigación mundial, y un punto de inflexión en el fortalecimiento de sus diversas líneas de investigación.

En el 2016 el GoSA tuvo una destacada participación en la XV Reunión Latinoamericana de la Unión Astronómica Internacional (LARIM) realizada por primera vez en Colombia, en Cartagena de Indias, y que constituye el evento más relevante en investigación en Astronomía y astrofísica en la región. La LARIM representó otro de los escenarios internacionales que más visibilizaron el trabajo del GoSA en la comunidad astronómica de la región.

Formación

Además de su labor de investigación, el GoSA también tiene una presencia relevante en la formación de estudiantes. Los miembros del grupo han participado en la enseñanza de cursos y seminarios en universidades en Colombia y en otros países. La creación de dos asignaturas de posgrado en la Universidad Nacional de Colombia: Fundamentos de Astrofísica Solar (2015) y *Solar Astrophysics: Techniques and Data Analysis* (2019), representa la formalización de los únicos cursos especializados en investigación en astrofísica solar en el país.

La formación de estudiantes se refleja igualmente en los trabajos de grado y las tesis de Maestría, las cuales han fortalecido diversas líneas de investigación del GoSA mediante proyectos que han culminado exitosamente. Los 29 trabajos de pregrado y 17 tesis de

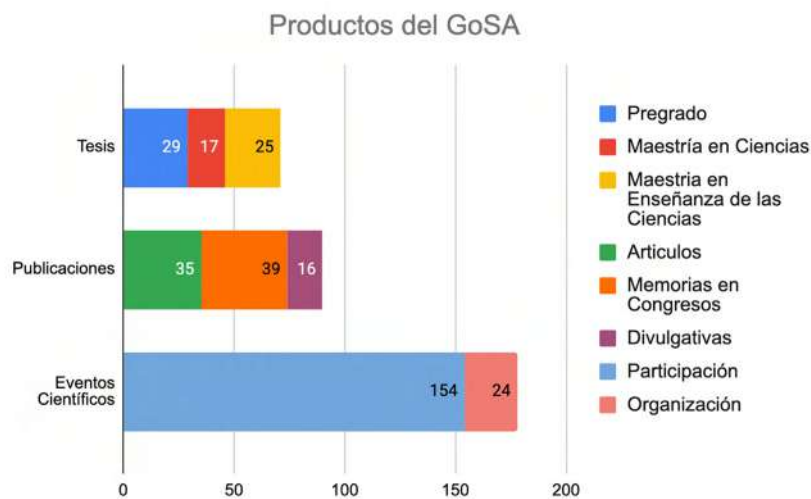


Figura 2. Productos del Grupo de Astrofísica Solar del Observatorio Astronómico Nacional de Colombia, Universidad Nacional de Colombia

Maestría en Ciencias – Astronomía liderados por el grupo (**Figura 2**), son muestra del importante trabajo realizado. Además, se han dirigido 25 tesis de Maestría en Enseñanza de las Ciencias como apoyo en la formación de maestros en temas de Astronomía y con implicaciones en la educación de la primera y la segunda infancia en Colombia.

En noviembre del 2012, y como parte la conmemoración del décimo aniversario del GoSA, se realizó de manera híbrida la Escuela de Magnetismo Solar y Estelar, que contó con la participación de tres expertos internacionales en las investigaciones relacionadas con el campo magnético del Sol y otras estrellas. Durante tres semanas, 27 estudiantes se capacitaron en las técnicas modernas y el análisis de datos en esta línea de investigación, una de las de mayor proyección en la actualidad.

Divulgación y apropiación social de la ciencia

Además de sus investigaciones científicas, el GoSA participa activamente en actividades de divulgación y extensión en Colombia y en la región. El grupo ha organizado y participado en numerosas conferencias y talleres en escuelas y universidades, así como en eventos públicos y festivales de ciencia, que suman cerca de 400 contribuciones. Además, el grupo tiene presencia en escenarios de divulgación, incluyendo los medios de comunicación, donde comparte sus propias investigaciones y otras relacionadas con la astronomía y las ciencias del espacio, divulgándolas entre un público amplio y diverso. A través de las temáticas involucradas en el estudio del Sol, se han apoyado procesos de formación en grupos escolares y semilleros de astronomía (**Cárdenas-Avenidaño et al.**, 2019). El GoSA participa activamente en la difusión del conocimiento científico en nuestro país y cuenta con artículos en revistas de divulgación, contenidos transmedia y libros para público infantil (**Figura 2**).

Desafíos y futuro de la investigación en astrofísica solar

La astrofísica solar es un campo de investigación en constante evolución, y se espera que en el futuro se produzcan importantes avances en nuestra comprensión del Sol y su influencia en el sistema solar y en la Tierra. Hay, sin embargo, varios desafíos que deben ser superados para alcanzar estos objetivos. Uno de los desafíos más importantes en la investigación en astrofísica solar es la complejidad de los fenómenos que se estudian. El Sol es un objeto altamente dinámico y complejo, y muchos de los procesos que tienen lugar en su interior y en su atmósfera son difíciles de comprender. Entre estos se encuentran los procesos que dan lugar al calentamiento extremo de la corona solar (de hasta millones de grados) y, por otra parte, la predicción de la actividad solar relacionada con fenómenos explosivos como las fulguraciones.

Por ello, es necesario un enfoque interdisciplinario que combine la física, la química y la computación para comprender estos procesos y hacer predicciones precisas sobre su comportamiento. Otro desafío de la investigación en astrofísica solar es la necesidad de desarrollar modelos y teorías que puedan explicar los fenómenos observados. Esto requiere una comprensión profunda de la física que gobierna el Sol y su atmósfera, así como la capacidad de simular y analizar estos modelos con herramientas computacionales avanzadas. La integración de modelos teóricos y observaciones es una de las principales fuentes de progreso en la investigación en este campo.

A pesar de los desafíos, el futuro de la investigación en astrofísica solar es muy prometedor. Se espera que el refinamiento y aplicación de nuevas técnicas de observación, como la espectropolarimetría de última generación, permitan obtener datos de mayor calidad y precisión. Además, se están desarrollando nuevos telescopios y misiones que permitirán estudiar el Sol con mayor detalle y en diferentes longitudes de onda, en lo que se ha denominado la física solar multimensajera.

Otro aspecto importante del futuro de la astrofísica en general es la colaboración internacional. La investigación en astrofísica solar es un campo altamente interdisciplinario, que requiere la colaboración de investigadores de diferentes países y disciplinas. En particular en el área de clima espacial confluyen múltiples aspectos del estudio del Sol,



Figura 3. Logo del GoSA

la Tierra y el medio interplanetario. Otro tema importante para el futuro de la astrofísica solar relacionado con el clima espacial es la aplicación de la investigación a problemas del mundo real. El estudio del Sol y su influencia en el sistema solar y en la Tierra es relevante para una amplia gama de disciplinas, desde la meteorología hasta la física de materiales y la biología. La aplicación de los resultados de la investigación en astrofísica solar a estos problemas puede tener importantes consecuencias para la sociedad.

En el contexto de los múltiples interrogantes y las perspectivas del área, el GoSA, que durante la última década se ha consolidado como un referente de la investigación en el panorama de la astrofísica nacional, y cuyo logo (**Figura 3**) ya es reconocido en la comunidad, tiene ante sí grandes desafíos en los próximos años. Por una parte, seguir realizando contribuciones significativas a nuestra comprensión del Sol y promoviendo colaboraciones internacionales para el fortalecimiento de la formación e investigación en este campo de la astrofísica. La futura misión espacial *The solar Polarization and Directivity X-Ray Experiment* (PADRE) (**Martínez-Oliveros et al.**, 2021), la cual cuenta con la participación de miembros del GoSA, y la propuesta *Dynamics of the solar corona in the era of data-intensive observations*, presentada en conjunto con instituciones europeas y americanas y recientemente ganadora de la *Horizon - Marie Skłodowska-Curie Actions - 2022* (SE-01-01) de la Comisión Europea, aseguran un futuro promisorio para el grupo. Por otra parte, el GoSA seguirá haciendo esfuerzos para inspirar a las futuras generaciones de científicos a explorar las maravillas del astro más importante para la humanidad, y aportar a la consolidación de la cultura científica en Colombia, vital para el desarrollo de nuestra sociedad.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que han apoyado al GoSA durante estos 10 años de arduo trabajo. Su contribución ha sido invaluable para nuestro éxito en la investigación en astrofísica solar, y nos ha permitido realizar proyectos de investigación de vanguardia, tanto teóricos como observacionales, y desarrollar equipos pioneros de instrumentación radioastronómica en Colombia. Nuestro agradecimiento se extiende a nuestros colaboradores y colegas, principalmente en el Observatorio Astronómico Nacional de la Universidad Nacional de Colombia, cuyo intercambio de conocimientos y experiencia ha sido fundamental para nuestro crecimiento. Especial mención merecen todos nuestros estudiantes, en particular Julián David Alvarado Gómez, por haber sido pionero en la puesta en marcha del GoSA. Varias generaciones de estudiantes han pasado por el GoSA y culminado exitosamente sus proyectos académicos y personales. Su entusiasmo y dedicación han sido una fuente constante de inspiración y son los protagonistas de los logros del GoSA. Por último, agradecemos a la comunidad científica y al público en general por su interés y apoyo, y a todos los que nos impulsan a seguir explorando los misterios del Sol y compartir nuestros hallazgos.

Contribución de los autores

BCM y SVD han desarrollado y elaborado los contenidos en torno al contexto de la astrofísica solar y el trabajo del grupo en las diversas funciones misionales, incluyendo los logros en la última década. JCBC y JCMO han contribuido con los antecedentes y creación del grupo, al igual que en las perspectivas de la investigación en astrofísica solar.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses.

✉ **Santiago Vargas-Domínguez**^{1,*}, ✉ **Benjamín Calvo-Mozo**¹, ✉ **Juan Carlos Martínez Oliveros**², ✉ **Juan Camilo Buitrago-Casas**²

¹ Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

² Space Sciences Laboratory, Universidad de California, Berkeley, Estados Unidos

Referencias

- Arias de Greiff, J.** (1993). La astronomía en Colombia. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 1a Edición, pp. 95-105.
- Cárdenas-Avendaño, A., Vargas-Domínguez, S., Cuéllar, J., Moreno-Cárdenas, F., Calvo-Mozo, B.** (2019). The Educational Power of the Sun. *Communicating Astronomy with the Public Journal*, 25(1), 28-33.
- Erdélyi, R., Korsós, M. B., Huang, X., Yang, Y., Pizzey, D., Wrathmall, S. A., Hughes I. G., Dyer, M. J., Dhillon, V. S., Belucz, B., Brajša, R., Chatterjee, P., Cheng, X., Deng, Y., Vargas Domínguez, S., Joya, R., Gömöry, P., Gyenge, N.G., Hanslmeier, A., Kucera, A., ... y Zuccarello, F.** (2022). The Solar Activity Monitor Network - SAMNet. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 12(1), 2. <https://doi.org/10.1051/swsc/2021025>
- Guevara-Gómez, J. C., Martínez-Oliveros, J. C., Calvo-Mozo, B.** (2016). First colombian radiointerferometer: Current stage. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 12(327), 16-19.
- Higuera, M. A.** (2017). Astronomy in Colombia. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 49 (1), 3-6.
- Martínez-Oliveros, J., Christe, S., Saint-Hilaire, P., Krucker, S., Caspi, A., Peretz, E., Hayes, L., Limousin, O., Meuris, A.** (2021). The solar Polarization and Directivity X-Ray Experiment (PADRE). *Bulletin of the American Astronomical Society*, 53(6) e-id 2021n6i313p09
- Moreno-Cárdenas, F., Vargas-Domínguez, S., Cuéllar, J.** (2022). The pioneering scientific endeavor and contributions of José María Gonzalez Benito (1843-1903), the first Colombian modern astronomer. (181), 1010-1027. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1795>
- Portilla, J. G.** (2020). *Firmamento y atlas terrestre: La astronomía que practicó Francisco José de Caldas*. Ed. Universidad Nacional de Colombia
- Sarasola, S.** (1923). Noticias del Nuevo Observatorio. *Notas Geofísicas y Meteorológicas*, 1(2), 12-15.
- Vargas-Domínguez, S.** (2015). Observaciones solares de última generación. *Revista de Ciencias*, 6(3), 1-4.
- Vargas-Domínguez, S., Kosovichev, A. G., Antolin, P., Harra, L.** (2017). *Fine Structure and Dynamics of the Solar Photosphere*. Cambridge University Press.

Opinión

Tres lecciones: de azules, biodiversidad, acceso y otras yerbas apropiables

Three lessons: blues, biodiversity, access and other appropriate weeds

Hace poco más de un mes, en respuesta a la solicitud de la empresa colombiana Ecoflora, la FDA de los Estados Unidos aprobó el registro de un colorante azul, después de los 12 años de ensayos y trámites imprescindibles para verificar su efectividad e inocuidad. Más recientemente, la revista Science (**Kupferschmidt**, 2023) reseñó brevemente este trabajo, resaltando su importancia en tres planos: el uso de la biodiversidad, los derechos de las comunidades y la estructura del nuevo colorante azul. El primero de estos ámbitos es especialmente importante, ya que Colombia es el segundo país más rico en biodiversidad vegetal del mundo y ocupa los primeros lugares con respecto a varias especies animales.

Ha habido en el país un esfuerzo continuo para que la sociedad se apropie de dicha biodiversidad mediante la fabricación de medicamentos, bienes de consumo y otros productos beneficiosos. En ese sentido, nos hemos llenado de expectativas, deseos y buenas intenciones, pero hemos procedido bajo la premisa de lo que podría denominarse biodiversidad contemplativa: ver y no tocar.

Se hace aquí un breve recuento de la experiencia con el colorante y se reflexiona sobre otros dos temas también relacionados con la biodiversidad.

Azul: ¿y cómo es él?

La historia comenzó en un laboratorio de fitoquímica al observar el efecto que tenía una sustancia nitrogenada en el jugo de frutos de jagua (*Genipa americana*) recolectada por varios estudiantes en la Jagua de Ibirico. Unos 25 a 30 años después, algunos tatuajes de la empresa Ecoflora hechos con jagua dejaron de tatuar. El problema se solucionó y el excedente de ese ensayo se sometió al mismo tratamiento de antaño con un nuevo arsenal de reactivos. Apareció el maravilloso color azul que llamó la atención de una estudiante-investigadora de la empresa y de su gerente, quien emprendió una larga y costosa aventura para fabricar por kilos o toneladas lo que la naturaleza hacía en miligramos. Previamente, debía obtenerse el *know-how* de la Universidad de Antioquia, regularizar el suministro de frutas, cumplir la normatividad, hacer un producto final apropiable para alimentos, bebidas y cosméticos y, naturalmente, protegerlo (**Vargas et al.**, 2016).

Elucidar la estructura no fue fácil. En un laboratorio del exterior se diagnosticó que el color era azúcar (sí, ¡glucosa y sacarosa!), así que durante dos a tres años el tiempo se dedicó a la separación local, no de uno, sino de varios pigmentos que en primera instancia aparentaban ser abundantes, pero que, en el mejor de los casos, no producían más que unos cuantos miligramos. Las separaciones rendían apenas unas pocas gotas por minuto en múltiples columnas cromatográficas. Después de largos meses se obtuvo lo suficiente para asignar las estructuras de las moléculas minoritarias, que sirvieron de base para proponer la estructura del principal producto obtenible, un polímero azul, en gramos mediante interpretaciones y correlaciones de resonancia magnética nuclear de líquidos y sólidos y espectrometría de masas, utilizando, además, enrevesados, pero lógicos, mecanismo de reacción. Es de anotar que la estructura, aunque imprescindible en el desarrollo del producto, sólo era una prioridad académica, pues mientras se avanzaba en ella se estaban desarrollando los procesos tecnológicos relacionados con su producción.

Un trabajo de maestría sobre las estructuras y una tesis de doctorado sobre la producción, estabilidad, propiedades y otros aspectos, completaron esa etapa, con lo que se dio paso a los análisis de toxicidad y genotoxicidad en laboratorios acreditados por la FDA. En fin, que fue un largo, costoso y tortuoso camino para obtener un colorante raro, estable, inodoro e insípido, que podrá aprovecharse en la ginebra, el agua envasada, incluso en el inefable Viagra, y en muchos otros productos que aspiran a tener un azul natural.

Ha resultado interesante, además, saber que desde México hasta el norte de Argentina el fruto de jagua tenga esas mismas aplicaciones en algunas comunidades locales, que lo usan para decorar maderas, cueros y el mismo cuerpo, así como en forma de alimento, o fermentado para producir un licor.

¡Viene la sigatoka negra!

Un poco antes de la aventura con la jagua, había comenzado otra lucha contra la sigatoka negra del banano, ocasionada por el hongo *Mycosphaerella fijiensis* f. sp. *Difformis*.

Como se publicó hace unos años esta misma revista (Echeverri, 2013), a comienzos de la década de 1980 hubo alerta por una enfermedad que iba a terminar con los cultivos de banano y plátano, al igual que hoy pasa con la fusariosis. Durante casi 25 años el Grupo de Química Orgánica de Productos Naturales de la Universidad de Antioquia dedicó buen parte de sus esfuerzos a conocer la bioquímica del banano y, en especial, las sustancias involucradas en su defensa. Así que en el momento de escuchar propuestas para el desarrollo de “algo” contra ese hongo había un gran bagaje científico. La idea era buscar algo diferente a los fungicidas, dada la resistencia que generaban, e inducir más eficazmente las defensas locales en la planta. Tras siete años de ensayos y formulaciones en fincas de varios países bananeros de América, el uso de un recurso de la biodiversidad, que por suerte ya se comercializaba en otro país, y después de un nuevo ensayo del producto en el ICA y dos años tratando de penetrar el mercado local, se logró lanzar un nuevo agroquímico con un novedoso mecanismo de acción, inocuo, natural y renovable, que hoy se comercializa en todos los países bananeros de América, África y Asia.

La leishmaniasis: una enfermedad desatendida

Desde un punto de vista muy amplio, se supone que la trascendencia de un colorante o de un agroquímico no es similar a la de un medicamento contra una enfermedad como la leishmaniasis cutánea, también llamada “enfermedad de la selva”, “del posconflicto” o simplemente “pito”. Padecida por decenas de miles de colombianos y millones de personas en el mundo, hay muy pocas opciones farmacológicas para combatirla, y la droga de elección implica graves efectos secundarios. Presentándose a cuanta convocatoria hubo, el Grupo de Química Orgánica de Productos Naturales en la Universidad de Antioquia y el Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales-PECET han logrado desarrollar en 19 años una formulación tópica que ha demostrado ser efectiva *in vitro* en amastigotes de varias especies de *Leishmania*, en la nariz de hámsters, en su cola, así como en perros de diferentes razas con diversos grados de afectación en sus órganos. Eventualmente, también se obtuvieron algunos resultados en enfermos que lo toleraron mejor que el Glucantime® (Piragauta *et al.*, 2022). El 2 % de los componentes de esa formulación está constituido por sustancias naturales y, aunque de momento nadie ha reclamado la propiedad del uso del jaboncillo (*Sapindus saponaria*), hace cinco o seis años se adelantaron los largos y engorrosos trámites para patentar su empleo como leishmanicida, más como protección frente al monopolio que como futuro negocio. Sin embargo, quedó la duda acerca de si una planta que se encuentra en varios países es nativa, endémica o autóctona, pues de eso depende el trámite. Y los formularios. Y las demoras.

El proceso para que ese producto sea apropiable por la sociedad enfrenta un problema crónico: faltan 3 mil millones de pesos (unos mil barriles de petróleo, o el costo anual de 2,5 senadores), para emprender los ensayos clínicos confirmatorios, imprescindibles por

ley y por ética. Tal costo, sin embargo, es mucho menor que la inversión en tratamientos, hospitalizaciones y en convocatorias harto ambiciosas que languidecen en el primer intento. Además, dicha inversión entraña una ganancia invaluable en calidad de vida.

Pero aquí seguimos, buscando convocatorias, llenando formularios, pidiendo avales, consiguiendo socios, calculando el número de estudiantes, artículos Q1 y Q2, congresos y potenciales beneficiarios, midiendo impactos, deduciendo el porcentaje para administración, y tantos otros intrínquilis, para poder presentar una propuesta con qué financiar esos ensayos clínicos. Claro, antes hay que competir por el aval institucional, la aquiescencia de los pares y el análisis de un comité, con el fin de ubicarse en el rango de “elegible” y, luego, gracia bendita, de “financiable”. Habrá que esperar, además, lo que se venga en trámites cuando la formulación se trate de elaborar para que llegue a los enfermos, en la esperanza de que por fin la biodiversidad se traduzca en beneficio para aquellos que a duras penas tienen dinero para su alimentación.

Cuando la vida se pone en la misma balanza ciega de la “transparencia” y la “igualdad de oportunidades”, termina midiéndose con los mismos criterios burocráticos a los que se someten otras acciones intrascendentes.

En todos estos casos la historia se repite: el camino hacia el uso de la biodiversidad y su apropiación por la sociedad es extremadamente largo y complejo, lleno de trámites y escollos, carente de recursos, estrategias, y prioridades programables. En el último ejemplo citado la diferencia es que mientras transcurre ese tiempo de espera, decenas de personas pueden morir, otras quedarán con secuelas irreversibles, y no pocos se encerrarán en sus casas rumiando sus úlceras y su vergüenza:

En fin, aún es un sueño obtener unos pocos cristales de aquel colorante azul.

© Luis Fernando Echeverri, Ph. D.

Grupo de Química Orgánica de Productos Naturales,
Universidad de Antioquia, Medellín
fernando.echeverri@udea.edu.co

Agradecimientos

A la Universidad de Antioquia y COLCIENCIAS (hoy Minciencias) por la financiación. A las empresas Ecoflora (hoy ECOHOME) y Sustainable Agrosolutions (España) por su fe y empeño. A los doctores Wiston Quiñones, Sara Robledo, Fernando Torres Gustavo Escobar y Rosendo Archbold, compañeros en esta larga jornada. Y a tantos estudiantes que aportaron sudor y curiosidad.

Referencias

- Echeverri, F.** (2013). La protección del banano contra la sigatoka negra por métodos no biocidas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(145), 519-525. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.32>
- Kupferschmidt, K.** (2023). Natural Blue. *Science*, 380 (6650), 1100-1103. <https://doi.org/10.1126/science.adj2001>
- Piragauta, S, Higueta-Castro, J.L., Arbeláez, N., Restrepo, A.M., Archbold, R., Quiñones, W., Torres, F., Echeverri, F., Escobar, G., Vélez, I.D., Montoya, A., Robledo, S.M.** (2022). Utility of the combination of hederagenin glucoside saponins and chromane hydrazone in the topical treatment of canine cutaneous leishmaniasis. An observational study. *Parasitology Research*, 121(5), 1419-1428.
- Vargas E., Echeverri F, Gil JF, Correa E, Zapata S.** (2016). Colorant compounds derived from genipin or genipin-containing materials. (US Patent 9,376,569 B2). United State Patent and Trademark Office. <https://www.uspto.gov>

Club de revistas

Reseña sobre los artículos

Foley, N. M., Mason, V. C., Harris, A. J., Bredemeyer, K. R., Damas, J., Lewin, H. A., Eizirik, E., Gatesy, J., Karlsson, E. K., Lindblad-Toh, K., Zoonomia Consortium., Springer, M. S. Murphy, W. J. (2023). A genomic timescale for placental mammal evolution. *Science*, 380(6643), eabl8189. <https://doi.org/10.1126/science.eabl8189>

Zoonomia Consortium (2020). A comparative genomics multitool for scientific discovery and conservation. *Nature*, 587(7833), 240-245. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2876-6>



COVER: Mammals come in a wide variety of shapes and sizes, here represented by some of the least well known and most unusual—clockwise from top left: a fossa, a Hoffmann's two-toed sloth, a lesser hedgehog tenrec, two tree (or white-bellied) pangolins, and an aye-aye. The Zoonomia project's sequencing of more than 240 mammal genomes is paving new roads for understanding mammalian diversity and evolution and ourselves. See special section beginning on page 356.

Credit: ©Joel Sartore/Photo Ark

Proyecto Zoonomia: los genomas de cientos de mamíferos dan pistas claras sobre su evolución

Zoonomia Project: Genomes of hundreds of mammals give clear clues about their evolution

Los mamíferos placentados incluyen más de 6.000 especies vivientes con una amplia diversidad morfológica y ecológica que incluye desde murciélagos de dos gramos (*Craseonycteris thonglongyai*) hasta ballenas de más de 150 toneladas (*Balaenoptera musculus*). En los genomas de los organismos no sólo se encuentran los rasgos que permiten entender su funcionamiento, sino también pistas sobre su evolución. Mediante la genómica comparativa de mamíferos es posible conocer cómo los genomas de este grupo evolucionaron y descubrir las similitudes y diferencias que tenemos nosotros los *Homo sapiens* con respecto a las demás especies de nuestro clado. El Proyecto Zoonomia (**Zoonomia**, 2023) ha puesto a disposición de la comunidad científica los datos y herramientas para comparar genomas de mamíferos placentados, con el fin de explorar aspectos de su biología y descubrir variantes genómicas que se relacionen con cambios fenotípicos, enfocándose especialmente en identificar aquellos relacionados con riesgos de enfermedad en nuestra especie (**Zoonomia Consortium**, 2020).

El Proyecto Zoonomia provee ensamblajes nuevos del genoma de más de 130 especies de mamíferos placentados y el alineamiento de 241 especies en una matriz de datos con información del ADN de cada especie en relación con todas las demás, incluidos representantes del 82 % de las familias de mamíferos placentados (**Zoonomia Consortium**, 2020). En este proyecto participan más de 30 instituciones, 28 de las cuales colaboraron en la obtención de las muestras biológicas, siendo central el rol del zoológico de San Diego en California, Estados Unidos, el cual mantiene desde hace varias décadas germoplasma de varias especies de animales (**Zoonomia Consortium**, 2020).

Los genomas de las especies del proyecto se obtuvieron mediante la tecnología de secuenciación Ilumina con adaptadores que no requieren de PCR y que usan ADN de calidad media (es decir, muestras de ADN de fragmentos aislados que tienen más de 5.000 pares de bases). A pesar de que los requerimientos de calidad de las muestras de ADN no eran muy altos, el 20 % de las muestras preseleccionadas no pudieron emplearse, pues el

ADN no alcanzaba esa calidad (**Zoonomia Consortium**, 2020). El ADN de las muestras que cumplía con la calidad se fragmentó usando el sistema Covaris E220; luego se determinó la distribución de los tamaños de los fragmentos con un sistema de electroforesis automatizada de alta resolución (Agilent 2100 Bioanalyzer) para construir las librerías que después se secuenciaron en el sistema Illumina HiSeq 2500.

Para ensamblar el genoma de cada especie del proyecto, se implementó el procedimiento bioinformático DISCOVAR *de novo* a partir de la información obtenida de la secuenciación en el sistema Illumina (**Weisenfeld et al.**, 2014). El promedio de la profundidad de cobertura de todos los genomas obtenidos fue de 40X (DE \pm 14X). Esta cobertura indica que cada nucleótido de los genomas se leyó alrededor de 40 veces durante el procedimiento de secuenciación, permitiendo, así, diferenciar entre variaciones reales y errores de secuenciación. Los genomas ensamblados se encuentran en <https://zoonomiaproject.org/the-mammal-tree-list-view/>, e incluyen varias especies neotropicales como el jaguar (*Panthera onca*), la danta (*Tapirus terrestris*), el delfín rosado (*Inia geoffrensis*), el guatín (*Dasyprocta punctata*), el chigüiro (*Hydrochoerus hydrochaeris*), murciélagos (*Noctilio leporinus* y *Carollia perspicillata*), monos (*Ateles geoffroyi* y *Alouatta palliata*), osos perezosos (*Bradypus variegatus* y *Choloepus didactylus*) y osos hormigueros (*Myrmecophaga tridactyla* y *Tamandua tetradactyla*).

El alineamiento de los genomas de las 241 especies, incluidos los obtenidos por fuera del proyecto, se encuentra disponible en <https://cglgenomics.ucsc.edu/data/cactus/>. Dada la escala de los datos y de la diversidad taxonómica, construir este alineamiento fue un proceso complejo que requirió un procedimiento particular (**Armstrong et al.**, 2020, **Zoonomia Consortium**, 2020). En abril del 2023 la revista Science publicó una sección especial con casi una docena de artículos que presentaban los descubrimientos hechos a partir de los datos del Proyecto Zoonomia y que se encuentran reseñados en las perspectivas de **Upham & Landis** (2023) y **Romero** (2023). Comento a continuación un artículo en el que se usa la información genómica para reconstruir la historia evolutiva de los mamíferos placentados (**Foley et al.**, 2023).

El estudio filogenético de **Foley et al.** (2023) se basa en el alineamiento del proyecto Zoonomia, pero los autores, además, generaron una serie adicional de alineamientos. Por ejemplo, los de sitios neutrales o casi neutrales (es decir, que no codifican a proteína), empleando tres genomas de referencia (de humano, de perro y de un “ancestro hipotético”), así como alineamientos con un número menor de taxones para minimizar los datos ausentes en el alineamiento original. También hicieron alineamientos de cromosomas diferentes para analizar posibles incongruencias entre las filogenias derivadas, cuyo objeto era conocer qué tan robustos podían ser los resultados al emplear distintos esquemas de datos, o inferir los procesos evolutivos ocurridos que generarían incongruencias en los resultados obtenidos con diferentes tipos de datos. Además del análisis de la información de las secuencias genómicas, también se analizaron dos tipos de variantes estructurales del genoma (deleciones de más de 10 pares de bases y rearrreglos cromosómicos), las cuales evolucionan más lentamente que las sustituciones de los nucleótidos y fueron una fuente independiente de información para corroborar los resultados filogenéticos basados en los alineamientos. Los tiempos de divergencia en la filogenia se calcularon en el programa PALM (**Yang**, 2007), considerando las edades de 37 fósiles y otros aspectos que pueden generar variaciones en las edades o en la adscripción filogenética de los taxones fósiles.

Los árboles filogenéticos resultantes de los diferentes alineamientos fueron similares, e indicaban que el origen de los mamíferos placentados se dio hace 102 millones de años (intervalo de confianza: 114,5 a 90,4 millones de años). Sin embargo, se presentaron casos con cambios en la topología en diferentes análisis, particularmente dentro del clado Afrotheria, que incluye a los manatíes (*Trichechus*) distribuidos en el Mar Caribe y en algunos ríos del Neotrópico. En los análisis de los alineamientos de diferentes cromosomas los autores compararon los resultados del cromosoma X y de tres autosomas y encontraron que los clados mayores, que incluyen varios órdenes de mamíferos (clados superordinales),

mostraban muy poca discordancia en relación con el cromosoma analizado. Esta poca discordancia en esos clados superordinales (que se diversificaron en el Cretáceo tardío hace 100 a 66 millones de años), puede ser una señal de procesos de especiación alopátrica que aislaron pequeñas poblaciones de los ancestros de mamíferos placentados en diferentes fragmentos de las masas continentales de Gondwana y Laurasia y llevó al patrón biogeográfico de distribución actual de tales clados (Afrotheria en África, Xenarthra en Suramérica, Laurasiatheria y Euarchontoglires en Eurasia y Norte América).

La divergencia inicial de los cuatro clados mayores coincide en el tiempo con la separación de las masas continentales y el aumento en el nivel de los mares, es decir, el Cretáceo tardío, cuando se subdividieron las superficies de tierra emergidas. Estos resultados contrastan con otros modelos previos de diversificación de mamíferos, pero se sostienen frente a las variaciones en los datos y las calibraciones de las edades de los fósiles. Además, los datos usados en estos análisis incluyen más de 40.000 sitios informativos, o sea, diez veces más de lo requerido en el modelamiento de datos para recuperar tiempos de divergencia precisos de un número comparable de taxones.

Un segundo pulso de diversificación al interior de los clados, correspondiente al nivel taxonómico de orden, se debió haber dado inmediatamente después del evento de extinción ocurrido en la transición Cretáceo-Paleógeno hace 65 a 53 millones de años (famoso por la extinción de los dinosaurios) y que también coincide con la emergencia rápida de masas continentales. En contraste con la diversificación inicial de los mamíferos placentados, que muestra una clara división de los linajes superordinales, la diversificación posterior durante el Cenozoico (últimos 65 millones de años), muestra altos niveles de discordancia filogenética. Por ejemplo, la radiación de los primates evidencia el conflicto topológico entre autosomas y el cromosoma X, algo que es característico cuando hay sorteo incompleto de linajes. Este sorteo de linajes es común cuando hay especies ancestrales con poblaciones muy grandes que se subdividen varias veces en una sucesión rápida. Esto lleva a que en el genoma de varias especies descendientes haya parte de la variación genómica de la especie ancestral, pero la similitud de los genomas de esas especies descendientes no necesariamente se debe a una relación histórica cercana. Es decir, un proceso así lleva a que haya incongruencias en la señal filogenética de diferentes cromosomas o regiones del genoma. Otro proceso evolutivo que también causa incongruencias es la especiación con flujo génico o introgresión entre especies, lo que parece haber ocurrido en el orden de los roedores. Los autores proponen que esta discordancia entre regiones en los genomas se debe a que las especies ancestrales tenían grandes tamaños poblacionales y distribuciones geográficas muy amplias, lo que habría favorecido los procesos mencionados.

Aunque el muestreo del proyecto Zoonomia es taxonómicamente amplio e incluye varias especies neotropicales, la colaboración con instituciones latinoamericanas será necesaria para ampliar la cobertura de especies. De hecho, Brasil y Alemania lideran otro consorcio para estudiar la genómica adaptativa de especies neotropicales que no se limita solo a mamíferos placentados (**GenoTropics**, 2023), en tanto que Colombia se ha vinculado al consorcio del Proyecto del Biogenoma de la Tierra (**Huddart et al.**, 2022), lo que demuestra cómo la genómica empieza a hacerse presente en las agendas científicas de varios países. Por último, vale la pena anotar que en junio del 2023, la misma revista Science publicó otra serie especial de artículos sobre genómica de primates que incluye los análisis de genomas de más de 200 especies, lo cual evidencia la rapidez con que se están generando datos de especies relacionadas con nosotros. Este gran volumen de información permite un mejor entendimiento de la diversidad de los mamíferos, con lo que se vislumbra, asimismo, un sinfín de aplicaciones beneficiosas para los humanos.

Enrique Arbeláez-Cortés

Grupo de Estudios en Biodiversidad, Escuela de Biología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Agradecimientos

A Martha Patricia Ramírez Pinilla por la amable invitación a presentar esta reseña.

Referencias

- Armstrong, J., Hickey, G., Diekhans, M., Fiddes, I. T., Novak, A. M., Deran, A., Fang, Q Xie, D., Feng, S., Stiller, J., Genereux, D., Johnson, J., Marinescu, V., Alföldi, J., Harris, R., Lindblad-Toh, K., Haussler, D., Karlsson, E., Jarvis, E., Zhang, G., Paten, B.** (2020). Progressive Cactus is a multiple-genome aligner for the thousand-genome era. *Nature*, 587(7833), 246-251.
- Foley, N. M., Mason, V. C., Harris, A. J., Bredemeyer, K. R., Damas, J., Lewin, H. A., Eizirik, E., Gatesy, J., Karlsson, E. K., Lindblad-Toh, K., Zoonomia Consortium., Springer, M. S. Murphy, W. J.** (2023). A genomic timescale for placental mammal evolution. *Science*, 380(6643), eabl8189. <https://doi.org/10.1126/science.abl8189>
- Zoonomia Consortium** (2020). A comparative genomics multitool for scientific discovery and conservation. *Nature*, 587(7833), 240-245. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2876-6>
- GenoTropics** (2023). GenoTropics: Adaptive genomics for neotropical species. <https://www.genotropics.org/>
- Huddart, J. E., Crawford, A. J., Luna-Tapia, A. L., Restrepo, S., Di Palma, F.** (2022). EBP-Colombia and the bioeconomy: Genomics in the service of biodiversity conservation and sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(4), e2115641119.
- Romero, I. G.** (2023). Seeing humans through an evolutionary lens. *Science*, 380 (6643), 360-361.
- Upham, N. S., Landis, M. J.** (2023). Genomics expands the mammalverse. *Science*, 380(6643), 358-359.
- Yang, Z.** (2007). PAML 4: phylogenetic analysis by maximum likelihood. *Molecular Biology and Evolution*, 24(8), 1586-1591.
- Zoonomia** (2023). Zoonomia Project. <https://zoonomiaproject.org/the-project/>

In Memoriam



Foto tomada de <https://scm.org.co/semblanzas/carlos-vasco/>

Carlos Eduardo Vasco Uribe *in memoriam* (1937-2022)

El profesor Vasco ingresó a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales como Miembro Correspondiente el 9 de marzo de 1988. Fue designado Miembro de Número (silla n° 32) el 28 de octubre de 1992 y en 2019 recibió la distinción de Miembro Honorario.

El doctor Vasco Uribe nació en Medellín en 1937. Su padre Eduardo Vasco Gutiérrez (1894-1982), un destacado psiquiatra infantil con estudios en Ginebra, París y Bruselas, fundó en Medellín el Instituto Psicopedagógico, lo que sin duda contribuyó a despertar en Carlos Eduardo su vocación por la educación de los niños, en particular de aquellos con condiciones sociocognitivas especiales. Su tío César Uribe Piedrahita (1897-1951) fue una prominente figura intelectual en su época. Además de una brillante carrera como médico parasitólogo que lo condujo a ocupar altas posiciones académicas en este campo, se destacó como arqueólogo, acuarelista, dibujante, grabador, escritor y novelista. Uribe Piedrahita fue miembro fundador de la Academia en 1936 y ocupó la silla N° 11. El mentor y maestro de Carlos Eduardo Vasco, Carlo Federici Casa (1906-2004), también fue Miembro de número (1953) y mereció la distinción de Miembro Honorario de la Academia (1990) por sus importantes contribuciones al desarrollo de la investigación científica y la formación académica en Colombia en campos como la teoría de números, la lógica matemática, la epistemología, la educación y la pedagogía, y la enseñanza de las matemáticas.

El doctor Vasco cursó estudios profesionales de Filosofía y Letras en la Universidad Javeriana de Bogotá y allí obtuvo el título correspondiente el 20 de octubre de 1962. El tema de su trabajo de grado, orientado por Federici, fue la epistemología del espacio y el tiempo en la teoría de la relatividad especial de Einstein. Inmediatamente después inició sus estudios de posgrado en física y matemáticas en la Universidad de Saint Louis en Missouri, Estados Unidos, obteniendo la Maestría en Ciencias (Física) en 1967 y el título de Ph.D. (Matemáticas) el 4 de febrero de 1968. Su tesis doctoral versó sobre los lazos algebraicos abstractos no asociativos (*Homogeneous Identities on Algebraic Loops*). Posteriormente viajó a Alemania para realizar estudios de teología en la Hochschule Sankt-Georgen, Frankfurt am Main, donde finalmente recibió el título de Licenciado en Teología el 14 de julio de 1971 y fue ordenado sacerdote de la Compañía de Jesús en esa misma ciudad.

A su regreso al país se dedicó a la investigación en matemáticas y lógica, a la enseñanza de las matemáticas y al estudio de problemas histórico-epistemológicos relacionados con esta área del conocimiento, y a numerosas obras de asistencia social en los barrios nororientales de Bogotá como sacerdote jesuita. Ejerció su carrera de profesor en la Universidad Javeriana (1971-2006), donde fundó con su colega Alfonso Freidel la carrera de matemáticas, y en la Facultad de Ciencias y el Departamento de Matemáticas y Estadística de la Universidad Nacional (1972-1995). También fue profesor especial del Programa de Magister en Educación del Convenio CINDE-Universidad Pedagógica de Bogotá-Universidad Nova de Fort Lauderdale (Florida, EE. UU.) desde 1977 hasta 1995.

Su enorme capacidad de trabajo y su vocación de servicio a la educación lo condujeron a involucrarse cada vez más en el área de asesorías a agencias del Estado paralelamente con su labor como profesor universitario. Fue miembro

del Grupo de Trabajo de Matemáticas del Instituto Colombiano de Fomento a la Educación Superior-ICFES entre 1973 y 1985, y coordinador del Grupo de investigación sobre Historia social de la Ciencia en Colombia de COLCIENCIAS. La Universidad Nacional de Colombia lo comisionó como asesor del Ministerio de Educación Nacional en la elaboración de los programas curriculares de matemáticas para la educación básica primaria y secundaria desde 1978 hasta 1993. Desempeñó un papel importante como asesor del Programa de Estudios Científicos de la Educación en el inicio del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación coordinado por Colciencias.

De 1993 a 1994 fue Comisionado Coordinador de la Misión de Ciencia, Educación y Desarrollo nombrada por el Presidente César Gaviria Trujillo para diseñar una carta de navegación para el país en esos temas junto con otras nueve personalidades del país. Se encargó de la redacción final del informe “Colombia, al filo de la oportunidad” entregado en julio de 1994, y luego se dedicó a la publicación de los siete volúmenes de documentos de la Misión. Asesoró al Ministerio de Educación y a la Asociación Colombiana de Facultades de Educación-Ascofade en la elaboración de los Estándares Básicos de Competencias y coordinó la nueva introducción a los Estándares de Matemáticas. También formó parte de la comisión de diez personalidades nombrada por la Sra. Ministra de Educación Cecilia María Vélez para animar el proceso de conformación del Segundo Plan Decenal de Educación 2006-2015.

Uno de los mayores logros de su carrera profesoral fue haber contribuido a lo largo de más de veinte y cinco años al desarrollo de programas de maestría en el país, y a la creación y consolidación de los primeros programas de doctorado en educación. Fue Profesor Especial del Doctorado Interinstitucional en Educación con énfasis en educación matemática desde su creación en agosto de 1997 en el Instituto de Educación y Pedagogía de la Universidad del Valle. A partir de 2007 también se desempeñó como docente del mismo programa en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Desde el año 2000 ejerció como Profesor Especial de la Universidad de Manizales en el Programa de Doctorado en Ciencias Sociales con énfasis en niñez y juventud en convenio con el Centro Internacional de Desarrollo Humano - CINDE.

Los seminarios del profesor Vasco y sus asesorías de tesis de maestría y doctorado hoy son ampliamente reconocidos por la claridad y el rigor de sus presentaciones y por haber dado inicio en el país a varias líneas estratégicas de investigación en Didáctica y Educación Matemática, entre las cuales cabe destacar la de procesos de razonamiento matemático en la argumentación, pensamiento variacional en la enseñanza matemática, y argumentación y demostración en la construcción de conocimiento matemático. Acorde con el sello característico que identificó su formación académica y su actividad como profesor e investigador, Vasco insistió en la interdisciplinariedad en el trabajo doctoral, empleando enfoques histórico-epistemológicos, semióticos, lingüísticos, filológicos, antropológicos y éticos. Ello se concretó, en la madurez de su trayectoria intelectual, en la formulación de un programa neo-estructuralista para las matemáticas modelo-teóricas en el siglo XXI, que se fundamenta en la articulación de las matemáticas, su historia y su epistemología, y promete convertirse en una fuente renovadora de propuestas para la didáctica y la educación matemática.

<https://xvi.ciaem-iacme.org/carlos-vasco/>

Luis Carlos Arboleda

Profesor emérito de la Universidad del Valle
Académico de número de ACCEFYN

A nuestros lectores y autores

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias biomédicas, ciencias del comportamiento (filosofía, psicología, antropología, sociología), ciencias físicas, ciencias naturales (biología, microbiología, botánica, zoología, ecología) ciencias químicas, ciencias de la tierra (geología, medio ambiente) y matemáticas.

Está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (*International Center for Scientific Research*), *Current Mathematical Publications*, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, *Zentralblatt für Mathematik*, *Zoological Record*. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 41 volúmenes.

Proceso de evaluación por pares

Se recibirán solo los manuscritos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los manuscritos serán evaluados en primera instancia por el editor y los editores asociados de la disciplina correspondiente.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, quienes evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración aproximada de 90 días.

Los pares académicos pueden adoptar alguna de las siguientes tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a un tercer evaluador.

En cualquiera de los casos, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo dentro de las cuatro semanas siguientes. Además, deberá enviar un documento en el que responderá, una a una, todas las observaciones señaladas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, se entenderá que los autores han retirado el manuscrito en su forma actual y, si se remitiera de nuevo, el Comité Editorial de la Revista lo considerará como un nuevo trabajo.

Los trabajos que sean aceptados se considerarán como propiedad de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales** y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Ética de la publicación

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACCEFYN), acoge la normatividad internacional definida por el *Committee on Publication Ethics* (COPE). Algunas normas se pueden consultar en:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

Ver documento pdf (anexo)

Política de acceso abierto

La página web de la Revista (www.raccefyn.co) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, el acceso y la difusión de la producción científica.

Directrices para autores

Tipología de los artículos publicados en la Revista

Artículos originales o artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene los siguientes apartes importantes: introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

Artículos cortos: documentos breves que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica y, que, por lo general, requieren de una pronta difusión.

Artículos de posesión o artículos de revisión de tema: documentos resultantes de una investigación donde se analizan crítica y sistemáticamente, a la par que se integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, centradas en un campo de la ciencia o la tecnología, con el fin de dar cuenta de sus avances y sus tendencias de desarrollo. Presentar un artículo de revisión constituye un requisito para que un Académico pueda posesionarse como miembro correspondiente o de número.

Cartas al editor: posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

Comentarios bibliográficos: son escritos críticos breves sobre libros recientes publicados en las disciplinas de interés de la Revista.

Corrección de los autores

Fe de erratas

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales y de alto nivel, escritos en inglés o español, y que traten sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedarán como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo la internet. (Ver transferencia derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia aceptará mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original, que no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado para aparecer en otra publicación impresa o electrónica y que, además, ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista. Igualmente, que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad. (Ver formatos declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).
3. La participación de los autores en el trabajo deberá ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad por los aportes de cada cual. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, quienes deberán ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres. Finalmente, el manuscrito debe contener un párrafo en el que se detallará la contribución de cada uno de los autores.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplan con los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deberán aparecer en la sección de *Agradecimientos*, pero no serán citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deberán aparecer en los *Agradecimientos*.
5. La terminología debe regirse por el Código Internacional de Nomenclatura Botánica. La terminología física, química o bioquímica, deberá seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deberán usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos deberán ser escritos en la forma recomendada por el *Internacional Code of Botanical Nomenclature* y por el *International Committee on Systematics of Prokaryotes* o ICSP.

Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deberán ser enviados a través de <http://www.raccefyn.co>

El manuscrito incluirá además de la página correspondiente al título, el resumen, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de las figuras, todos los cuales deberán estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No debe olvidarse el usar la numeración en todo el manuscrito. Extensión máxima de 30 páginas, entre 5.000 a 8.000 palabras.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una hoja de presentación, página en Word con los nombres y apellidos (si desea poner el segundo apellido, debe ir separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grado académico), filiaciones y correos electrónicos. Agregar aquí un párrafo en el que los autores declaren su aporte personal al manuscrito bajo consideración.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés (máximo 30 palabras, 165 caracteres)
3. Título corto (máximo 10 palabras, 50 caracteres)
4. Resumen en español e inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis, separadas por punto y coma.
6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico, dirección electrónica y código ORCID. *Open Researcher and Contributor ID* (Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Researcher and Contributor ID*.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo en conjunto con las leyendas de las figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales y con una resolución mayor a 300 dpi (*dots per inch*).
9. El número máximo de tablas y figuras es de 7. Para enviar información adicional se puede emplear la sección de *Información suplementaria* debidamente referenciada en el texto: tabla 1S, 2S, etc.; figura 1S, 2S, etc.

Estructura del manuscrito

Introducción: se debe mostrar el marco teórico en el cual se inscribe el tema de la investigación, propósito del artículo y justificación del estudio indicando, además, la delimitación de la pregunta problema.

Materiales y métodos: se describirán los sujetos de observación o experimentación, aparatos o dispositivos y metodologías empleadas en el estudio. La descripción de la metodología debe tener referencias de los métodos usados.

Análisis estadístico: señalar los métodos estadísticos utilizados y la manera de analizar los datos.

Resultados: deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y las figuras acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

Discusión: debe hacerse énfasis en los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastando los resultados con la información pertinente disponible en literatura actualizada y relacionar las conclusiones con los objetivos propuestos. Se deben incluir las implicaciones y limitaciones de los hallazgos y comparar las observaciones relevantes con las de otros estudios.

Los resultados y la discusión pueden presentarse también en forma combinada, en cuyo caso la sección se denominará *Resultados y Discusión*.

Conclusiones: deberán responder al objetivo de la investigación reportada e incluir el planteamiento de objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

Referencias: todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre entre paréntesis el apellido del primer autor y el año de publicación. Si el apellido del autor o autores forma parte de la estructura formal de la frase, sólo se pondrá entre paréntesis la fecha; por ejemplo: Pérez y Ribas (1996). Si no forma parte de la estructura formal del texto, por ejemplo: ... como indica Barbudo (2003). Si son solo dos autores se pondrán los dos apellidos, si son más de dos sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo “*et al.*”

La Revista ACCEFYN utiliza las normas del Manual APA, estas emplean un sistema de citación de autor-fecha.

Lista de referencias. Se organizan alfabéticamente y se citan de la siguiente manera:

Artículo de revista

Apellido, A. A., Apellido, B. B., Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen: pp-pp.

Ejemplo

Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L. (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, 7: 33-40.

Libro

Apellido, A. A. (Año). Título. Ciudad, País: Editorial

Ejemplo

Salisbury, F. B., Ross, C. M. (1994). Fisiología Vegetal. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

Capítulo de libro

Apellido, A. A., Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido. (Ed.), Título del libro (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplo

Guba, E.G. (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. La enseñanza: Su teoría y su práctica (148-165). Madrid, España: Akal.

Revista en línea

Apellido, A. A. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen** (número): pp-pp. Disponible en: <http://www...>

Ejemplo

Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G. (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Disponible en: <http://www.jstor.org/pss/2388013>.

Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P. (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

Citas páginas web

Anotar la fecha de la consulta

Ejemplo

Guiry, M.D., Guiry, G.M. (2015). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Disponible en <http://www.algaebase.org>., accedida entre enero y junio de 2015.

Tablas y figuras: las tablas y cuadros se denominarán tablas y llevarán numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilizar las letras minúsculas del alfabeto según orden de aparición en la respectiva tabla: a, b, c, d, e, etc.

Las fotografías, gráficos, dibujos y esquemas se denominan todos como Figuras, las cuales se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se describen en hoja separada. Si se trata de micro-fotografías debe indicarse el aumento utilizado. Las personas, o sus nombres, no deben ser identificables en las fotografías pero se requiere permiso escrito para su publicación.

Cuando las tablas y figuras hayan sido tomadas de revistas o libros, sean impresos o electrónicos, se debe especificar la fuente y adjuntar autorización de la respectiva publicación para su reproducción.

Agradecimientos: podrán ser expresados a personas o entidades que hayan ayudado en la realización del trabajo. Se mencionarán las personas y el tipo de ayuda aportada, así como las entidades, instituciones o fundaciones que hayan financiado o suministrado materiales. En caso de proyectos de investigación financiados será suficiente con mencionar el código de registro y la entidad, institución o fundación que lo apoyó económicamente.

Consideraciones

Los trabajos aceptados son propiedad de la Revista ACCEFYN y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Corrección de estilo y publicación del manuscrito

Una vez aceptados los artículos, éstos se enviarán a corrección orto-tipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará el registro de cada una de las sugerencias llevadas a cabo y los comentarios o dudas para que el autor o los autores aprueben y contesten apropiadamente.

La versión corregida deberá ser enviada nuevamente para su aprobación definitiva en un plazo mínimo de 48 horas. El manuscrito deberá ir con una carta al editor, informando cuales correcciones fueron procesadas. El editor le informará al autor la fecha aproximada y el número del volumen en el que el trabajo será publicado.

Rectificaciones y correcciones de errores

Las rectificaciones sobre la información suministrada por parte de los autores, se harán en el número inmediatamente posterior al anuncio de las mismas y serán responsabilidad de los mismos autores. La Revista se encargará de publicar una nota aclaratoria a manera de erratas. En el caso que sean necesarias mejoras y corrección de errores orto-tipográficos, de manejo visual de la información o de imprecisiones involuntarias, el o los autores podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan efectuarse en las versiones electrónicas de la Revista.

Falsificación de artículos

Si en el proceso editorial se encuentra falsificación, omisión de datos, duplicidad del artículo o plagio, se devolverá el original al autor con la debida notificación a su institución patrocinadora, centro de investigación o universidad.

Conflicto de intereses

Si los autores o coautores, editores o revisores (evaluadores) tienen algún conflicto de intereses que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, tal conflicto debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleador-empleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, entre otros.

También existen los conflictos personales resultado de amistades o animadversiones, competencias académicas y pasiones en el campo intelectual o moral (por ej. parientes en una compañía que se beneficiaría de los resultados que se van a publicar, el uso de los resultados publicados para promoción inmediata basada en el artículo publicado, creencias religiosas que estén en conflicto directo con la investigación que se va a publicar, entre otros).

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También pueden publicarse el título del trabajo, resumen, tablas y figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, también dando el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

Aviso de derechos de autor

Los autores certifican que son los creadores originales del trabajo y declaran que:

- a) Los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y,

en los casos que así lo requieran, se cuenta con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales.

- b) Todos los materiales que se presentan están totalmente libres de derecho de autor y, por lo tanto, el autor de la correspondencia se hace responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.
- c) El trabajo es inédito y no será enviado a otras revistas mientras se espera la decisión de los editores de tal revista. El primer autor declara que no existe un posible conflicto de intereses en este manuscrito.
- d) En caso de ser publicado, los autores del artículo transfieren todos los derechos de autor a la Revista ACCEFYN, sin cuyo permiso expreso no podrá reproducirse ninguno de los materiales publicados en la misma.
- e) A través de este documento, y si el trabajo es aceptado para su publicación, la Revista ACCEFYN asume los derechos para editar y publicar los artículos en índices nacionales, e internacionales o bases de datos con fines académicos y científicos no comerciales en medios impresos, electrónicos, Internet en texto completo o cualquier otro medio conocido o por conocer con respeto de los derechos de autoría.

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También se pueden publicar el título del trabajo, el resumen, las tablas y las figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, dando también el crédito a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y de los coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico incluidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros ni serán usados con otros fines.

Lista de comprobación para la preparación de envíos

Como parte del proceso de envíos, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

1. Carta de sometimiento del artículo, donde informa que todos los autores han leído, aprueban y declaran que:

- Están de acuerdo con el manuscrito remitido, en su contenido, organización y presentación.
- El trabajo es original, el cual no ha sido publicado previamente y, de igual forma, no se someterá a otra revista hasta conocer la respuesta del Comité Editorial.
- En caso de ser aceptado el manuscrito, se autoriza su publicación bajo las normas establecidas por la revista.

- El documento no cuenta con texto o figuras que tengan reserva de derechos y si los tuviere se cuenta con la autorización escrita para su reproducción.
- El documento no contiene citas o transcripciones de obras que carezcan de referencias bibliográficas debidamente citadas.
- Se incluye un párrafo donde los autores declaran cuál fue el aporte de cada uno de ellos al documento.
- Esta carta firmada debe ser adjuntada en el paso 4 del presente proceso de envío en formato PDF.

2. Presentación

- Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo, apellido y segundo apellido separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grados académicos), filiaciones y correos electrónicos.
- Título completo del manuscrito en español e inglés y título corto.
- Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
- Direcciones electrónicas de todos los coautores.
- Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras. Figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales.

3. Estructura del artículo. Se incluyen

- El resumen en español e inglés (Abstract).
- Las palabras clave (máximo 6) en español e inglés (Keywords).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y/o instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.
- Referencias.
- Declaración de conflicto de interés.

4 Información adicional: figuras

- Se incluyen como archivo independiente, cada figura en página aparte.
- Se incluyen las leyendas correspondientes al final del original. Estas figuras deberán ser cargadas en el paso 4 del presente proceso de envío en formato JPG o TIF.

5. Información adicional: tablas

- Se incluyen al final del original, elaborados en el modelo más sencillo de tablas del programa Word.
- Se ordenan secuencialmente.
- Se incluye el título correspondiente.

6. Referencias

- Se han seguido las normas de la revista de ACCEFYN en las instrucciones a los autores.

7. Abreviaturas:

- Se introducen entre paréntesis la primera vez que se usan.

8. Nomenclatura:

- Los nombres de género y especie están en letra cursiva.
- Los nombres de microorganismos, plantas y animales se escriben completos la primera vez que se citan, en el título y en el resumen.

9. Ética

- Todos los autores conocen y aprueban la presentación del manuscrito, su contenido, la autoría y el orden de la autoría.
- El manuscrito ha sido postulado solo a la Revista ACCEFYN y no se encuentra postulado ni ha sido publicado en otra revista.
- Si el artículo incluye la investigación en humanos o con animales se han seguido las directrices de la Declaración de Helsinki y el uso de primates no humanos en la investigación.
- Se incluye los agradecimientos a las instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.

10. Revisores

Se suministran indicaciones sobre tres o cuatro posibles revisores con sus nombres completos, formación académica y direcciones de correos electrónicos.

To our readers and authors

Focus and Scope

The Journal of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences (ACCEFYN) is a multidisciplinary quarterly journal that publishes high quality original research articles.

The journal publishes scientific articles in the disciplines of Biomedical Sciences, Behavioral Sciences (philosophy, psychology, anthropology, and sociology), Natural Sciences (Biology, Botany, Microbiology, Zoology, Ecology), Physical Sciences, Chemical Sciences, Earth Sciences (Geology, Environmental Sciences) and Mathematics. It is included in several national and international directories and indexing services like Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, On-line Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Within the Colombian citation system, the journal is register in Publindex (The Journal index Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias).

The journal's website (www.racefyn.co) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

Peer Review Process

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

See document pdf (annex)

Open access policy

The journal enables open access to published articles via its website (www.racefyn.co) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

Author Guidelines

Research articles. A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

Brief articles. Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

Inaugural articles or Review articles. Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

Letters to the editor. Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

Book reviews. Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

Authors correction

Errata

Information for Authors

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English in an area related to the **Exact, Physical or Natural Sciences**. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see <http://www.icmje.org/> for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.

Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.acefyn.co>

The manuscript, including the title page, the abstract, tables with titles, graphics with descriptive legends, must be prepared in Microsoft WORD processor in double space. Use Arial font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript. Maximum extension 30 pages, 5,000 to 8,000 words.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name, first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions, and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references, and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or TIF format.

Manuscript Structure

Introduction: there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

Materials and methods: a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

Statistical analysis: indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

Results: these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

Discussion: emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies. The results and the discussion may also be presented in a combined form.

Conclusions: an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

References: these citations must be verifiable. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way: last name of the first author and year of publication Pérez (1996). If there are only two authors use both last names Perez and Ribas (1996). If there are more than two authors use only the first last name followed by *et al.*

Reference list: alphabetically and following the examples

Journal article

Last name, A. A., Last name, B. B., Last name, C. C. (Year). Title. Journal name, **volume:** pp-pp.

Example

Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L. (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, **7:** 33-40.

Book

Last name, A. A. (year). Title, City, Country: Publisher

Example

Salisbury, F. B., Ross, C. M. (1994). *Fisiología Vegetal*. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

Book chapter

Last name, A. A., Last name, B. B. (Year). Chapter title. In A. A. Last name. (Ed.), Book title (pp. xx-xx). City, Country: Publisher.

Example

Guba, E.G. (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. *La enseñanza: Su teoría y su práctica* (148-165). Madrid, España: Akal.

Journal on line

Last name, A. A. (Year). Article title. Journal, **volume** (issue): pp-pp. Available in <http://www...or DOI>

Examples

Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G. (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Available in: <http://www.jstor.org/pss/2388013>

Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P. (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

References web pages

Date of the access

Example

Guiry, M.D., Guiry, G.M. (2015). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Available in <http://www.algaebase.org>., accessed in June 2015.

Tables and graphics: The tables and frames are called tables and carry an Arabic numeration in accordance with the order in which they appear. The corresponding title is placed on the upper part of the table and notes are placed in the lower part. Symbols for unit measures must appear in the column

headings. If it is necessary to display some information, use lower case letters from the alphabet according to the appearance of the table: a, b, c, d, e, etc.

Photographs, graphics, pictures, or sketches are named figures, are enumerated in order of appearance, and their legends must be written in a separate page. With respect to microfiches, indicate the size of the augmentation used. People or their names should not be identifiable in photographs, unless written permission for their publication has been obtained.

When tables and figures have been taken from magazines or books, published in hard copy or electronically, specify the source and include the authorization for its reproduction from the respective publication.

Acknowledgments: These can be expressed to persons or entities who have aided in the realization of the work. Mention is made of persons and their type of aid provided, as well as to entities or institutions which have provided financial and material assistance. In case of investigative projects with financial support it suffices to mention the registry code and the entity, institution or foundation which provided the economic support.

Considerations

They will be published in the following issue to the announcement of the correction. They are responsibility of the authors. Errata are responsibility of the Journal.

Fabrication of evidence, data omission, duplicity of data or plagiarism will be penalized. The authors and their institutions, research center or university and sponsors will be notified.

Once the article has been accepted, it will undergo a style and format revision which will bring it to its definitive version. The authors will receive the galley proofs in PDF format for the correction of errors before its printing. The corrected version must be returned for final approval within a period of 48 hours. The manuscript must be accompanied with a letter to the editor informing him of the corrections that were carried out. The editor will inform the author of the date and volume number in which the publication will appear.

If the authors or co-authors, the editors or reviewers (evaluators) have some conflict of interest which may in any way influence the transparency and objectivity of the peer review process and publication, it must be so declared.

The most obvious conflicts of interest are those referred to as financial conflicts, which result between, employer-employee, investments, and patents, as well as honoraria, consulting, paid investigation by companies which depend on the investigative results, etc.

There also exist personal conflicts arising from friendships, animosity, academic competencies and passions in the moral or intellectual field (for example relatives in a company which will benefit from the results to be published, the use of the results for immediate promotion based on the published article, religious beliefs which are in direct conflict with the investigation that will be published, etc.).

Copyright Notice

Declaration of originality and transfer author's rights

The authors declare:

The published data and reference materials have been duly identified with their respective credits and have been included in the bibliographic notes and citations that have been so identified and that should it be required, I have all releases and permissions from any copyrighted material.

All material presented is free from any copyright and that I accept full legal responsibility for any legal claims relating to copyrighted intellectual property, fully exonerating from responsibility the **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

This work is unpublished and will not be sent to any other journal while waiting for the editorial decision of this journal. I declare that there is no conflict of interest in this manuscript.

In case of publication of this article, all author's rights are transferred to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, and so cannot be reproduced in any form without the express permission of it.

By means of this document, if the article is accepted for publication by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, the Revista assumes the right to edit and publish the articles in national and international indices or data bases for academic and scientific use in paper, electronic, CD-ROM, internet form either of the complete text or any other known form known or to be known and non-commercial, respecting the rights of the authors.

Transfer of author rights

In case the article is approved for publication, the main author in representation of himself and his co-authors or the main author and his co-authors must cede the author rights of the corresponding article to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, except in the following cases:

The authors and co-authors will retain the right to revise, adapt, prepare derived works, oral presentations, and distribution to some colleagues of reprints of their own published work, if the corresponding credit is given to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**. It is also permissible to publish the title of the work, summary, tables, and figures of the work in the corresponding web sites of the authors or their employers, also giving credit to the Revista.

If the work has been realized under contract, the author's employer has the right to revise, adapt, prepare derivative works, reproduce, or distribute in hard copy the published work, in a secure manner and for the exclusive use of his employees.

If the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** were approached for permission by a third party for using, printing, or publishing specifically articles already published, the Revista must obtain the express permission of the author and co-authors of the work or of the employer except for use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work. The **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

No other right, other than the author's right, can be claimed by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

Privacy Statement

The names and e-mail addresses appearing in the journal will be used solely for the purposes explicitly therein expressed and by no means will they be supplied to third parties.

Submission Preparation Checklist

As part of the submission process, authors are required to check off their submission's compliance with all of the following items, and submissions may be returned to authors that do not adhere to these guidelines.

1. Letter of submission, where it is stated that all authors have read and approved that:

- The submitted manuscript conforms in content, organization and presentation with established norms.
- The original article has not been previously published in any form nor has it been submitted to another journal nor will it be until an answer is received from the Editorial Committee.
- In the case the manuscript is accepted, it is then authorized to be published under the journal's norms.
- The document may not be published without authorization of all copyrighted texts and figures.
- The document is fully cited in a list of references.

2. Appearance

- The first page written in Word with names and surnames (complete name, first and second surnames separated by a hyphen) of all authors (without job titles or academic titles), affiliations and e-mail address.
- Complete title of the manuscript in Spanish and English. Short title.
- Name of person responsible for correspondence with their complete address, telephone number and electronic address.
- E-mail of all coauthors.
- Text, references and tables in the same file together with legends of the figures. Figures in jpg or TIF format.

3. Structure of the article

The following sections are to be included:

- An abstract should be included in both Spanish and English.
- Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
- Introduction.
- Materials and methods.

- Results and Discussion for short communications.
- Discussion.
- Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
- Declaration of conflict of interest.

4. Additional information: Figures

- Each figure is included in a separate page in jpg or TIF format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o TIF format

5. Additional information: Tables

- Tables are included on a separate page and are presented in a simple manner as a Word table
- Tables are ordered sequentially

6. References

Citations must follow the journal ACCEFYN's norms found in the authors' instructions

7. Abbreviations

The first use is introduced in parentheses

8. Nomenclature

- The generic and specific names are written in italics
- Names of micro-organisms, plants and animals are written out completely the first time that they are cited in the title and in the abstract.

9. Ethics and malpractice considerations

- All authors must know and approve of the form, content, authors, and the order of the authors
- An article that has been submitted to the journal ACCEFYN has not be submitted or published in any other journal.
- If the article includes research on human or animals have all authors read and followed the guiding principles of the Declaration of Helsinki and the use of non-human primates in the research?

10. Reviewers

List 3 or 4 possible reviewers with their complete names, academic background and e-mails.

