



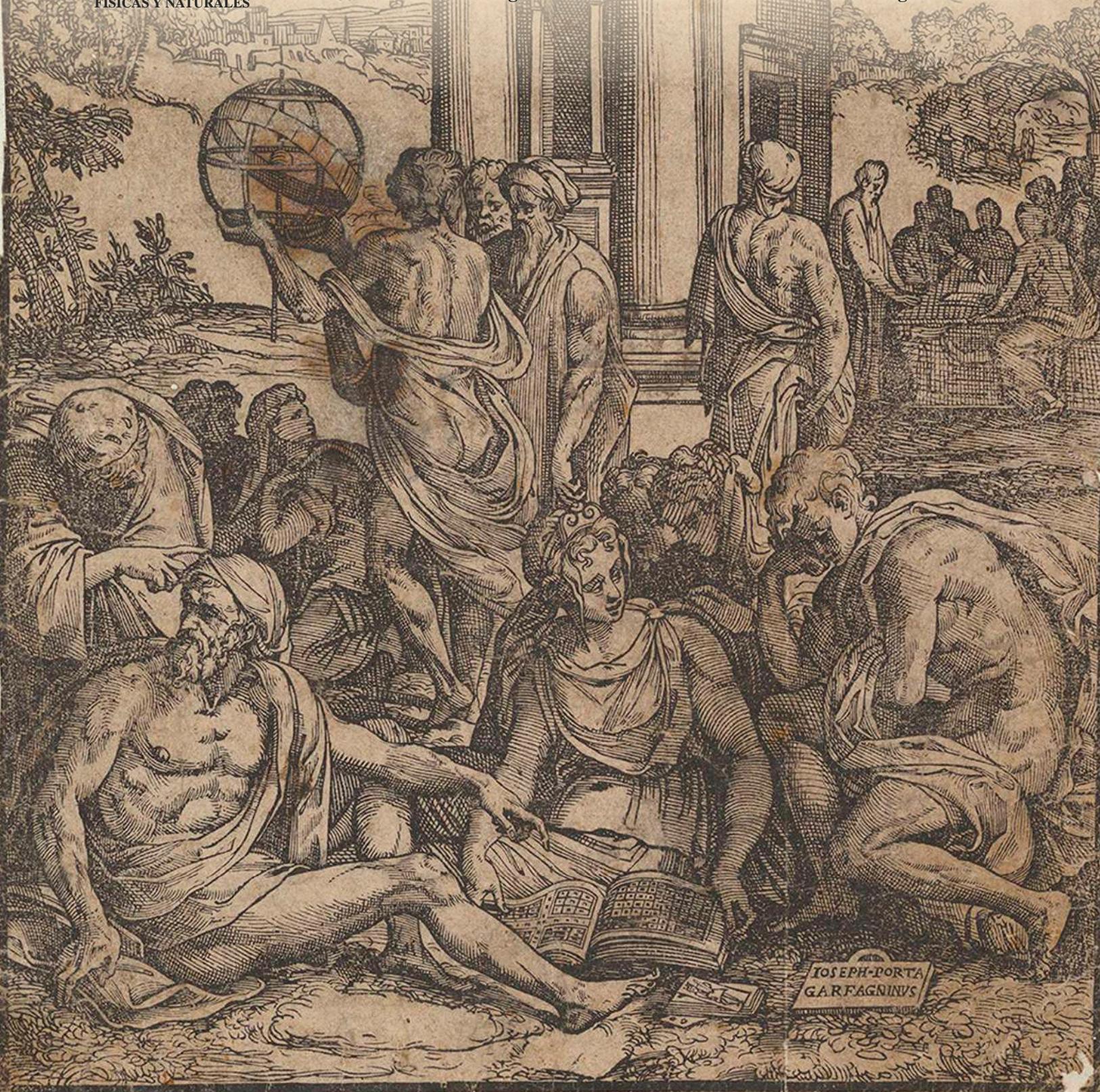
ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

85
Años
1936 - 2021

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

ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

Vol. 46 • Número 181 • Págs. 857-1080 • Octubre - Diciembre de 2022 • Bogotá - Colombia





ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

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

Vol. 46 • Número 181 • Págs. 857-1080 • Octubre - Diciembre de 2022 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

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

Asistente editorial Carolina Acosta

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

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

- Luis Fernando García, M.D., M. Sc.
Profesor emérito, Universidad de Antioquia,
Medellin, Colombia
- Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
- Juanita Ángel, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- Manuel Franco, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- Alberto Gómez, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- John Mario González, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- Gloria Patricia Cardona Gómez, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia
- Helena Groot de Restrepo, M.Sc.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ciencias del Comportamiento

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

Ciencias Físicas

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

- 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 Guillermo González, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Carlos Duque, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, 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 Clara Inés Orozco, Ph. D.
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

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
- 15 Ligia Sierra García, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 Luz Marina Jaramillo Gómez, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Ciencias de la tierra

- 15 Carlos Alberto Vargas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 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 Ligia Estela Urrego, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- 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

Matemáticas

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

Comité científico internacional

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

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana
Agris
Dialnet
EBSCO
Historia Mathematica

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

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

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

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936

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

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

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



Nuestra portada

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

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

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

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

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



ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

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

Vol. 46 • Número 181 • Págs. 857-1080 • Octubre - Diciembre de 2022 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias Biomédicas

Biomedical Sciences

Ensayo

Premio Nobel de fisiología o medicina en 2022: una revalidación de la evidencia molecular de los parentescos más recientes del *Homo sapiens* en el árbol de la vida

Nobel Prize in Physiology or Medicine in 2022: a revalidation of molecular evidence for the most recent kinship of *Homo sapiens* in the tree of life

Alberto Gómez Gutiérrez, PhD FLS 863

Original article

***Paracoccidioides restrepiensis* has undergone a severe population bottleneck**

Paracoccidioides restrepiensis ha experimentado un grave cuello de botella

Juan G. McEwen, Oscar M. Gómez, Daniel R. Matute 866

Original article

Spin-selective insulators

Aislantes de espín selectivo

J. Silva-Valencia 877

Ensayo

A propósito del premio nobel de física 2022: ¿comprender la naturaleza es asunto de la razón, de la intuición o de la tecnología?

Regarding the Physics Nobel Prize 2022: Is nature understanding a matter of reason, intuition or technology?

Román Castañeda 899

Original article

Confinement and spatial entanglement: phenomenology of a new interference principle

Confinamiento y entrelazamiento espacial: la fenomenología de un nuevo principio de interferencia

Román Castañeda 902

Artículo de revisión

Óptica y fotónica: ciencia y tecnología de la luz

Optics and photonics: Light science and light technology

Angela María Guzmán Hernández 920

Ciencias Físicas

Physical Sciences

**Ciencias
Físicas**

Physical Sciences

Artículo original

Potencial Vector Eléctrico y la Ley de Biot-Savart en Electroestática

Electric Vector Potential and the Biot-Savart like law in Electrostatics

Robert Salazar, Camilo Bayona-Roa, Diego Jaramillo 939

Artículo original

Comparación de la riqueza de insectos utilizando dos métodos de recolección en un humedal costero del Pacífico suramericano

Comparison of insect richness with two collection methods in a coastal wetland of the South American Pacific

Cristhian Raúl Rossi-La Torre 947

Original article

New records of the introduced gecko *Lepidodactylus lugubris* (Duméril & Bibron, 1836) (Squamata: Gekkonidae) in Colombia and update of its geographic range in the country

Nuevos registros del gecko introducido *Lepidodactylus lugubris* (Duméril & Bibron, 1836) (Squamata: Gekkonidae) en Colombia y actualización de su distribución geográfica en el país

Cristian Andres Collazos-Astudillo, Alejandro Navarro-Morales, Diego Huseth Ruiz-Valderrama, Juan P. Ramírez, José Rancés Caicedo-Portilla 959

Artículo original

Reservas de carbono en un ecosistema del desierto suramericano: el caso de Lomas de Amancaes, Lima, Perú

Carbon storage on an ecosystem of the South American desert: The case of Lomas de Amancaes (Lima-Perú)

Victor H. Guerrero-Palomino, Diego Malca-Rodríguez, Héctor Aponte 971

Artículo original

¿Se están reduciendo los humedales de la costa del Pacífico suramericano? El caso de los humedales de Lima

Are the wetlands on the Pacific coast of South America shrinking? The case of Lima wetlands

Daneska Urbina, Flavia Rivera-Cáceda, Héctor Aponte 985

Ensayo

La síntesis química “click” y la “bioortogonal” ganan el premio Nobel 2022

The “click” and “bioorthogonal” chemical synthesis win the Nobel Prize 2022

Moisés Wasserman 999

Original article

Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil from *Piper marginatum* leaves obtained by hydrodistillation in pH4, pH7 and pH10

Composición química y actividad antimicrobiana del aceite esencial de hojas de *Piper marginatum* obtenido por hidrodestilación con pH4, pH7 y pH10

Elayne Cristina de Oliveira, Marcílio Fagner Fontes Silva, Clécio Souza Ramos 1002

Essay

The pioneering scientific endeavor and contributions of José María González Benito (1843-1903), the first Colombian modern astronomer

Los esfuerzos y aportes científicos de José María González Benito (1843-1903), el primer astrónomo moderno colombiano

Freddy Moreno-Cárdenas, Santiago Vargas-Domínguez, Jorge Cuéllar-Moyano 1010

**Ciencias
Naturales**

Natural Sciences

**Ciencias
Químicas**

Chemical Sciences

**Ciencias
de la Tierra**

Earth Sciences

Club de revistas/Journal Club

¿Qué hay en un nombre?

What's in a name?

María Mercedes Zambrano, Ph.D 1028

¿Cuál es el costo evolutivo de sobrevivir una pandemia?

What is the evolutionary cost of surviving a pandemic?

Juan-Manuel Anaya, Paul Laissue, José A. Cadena Zuluaga 1031

Hallazgos y recomendaciones de la Comisión de Lancet para el COVID-19: una mirada crítica

Findings and recommendations of the Lancet Commission for COVID-19: A critical look

Fernando de la Hoz Restrepo, M.D. Ph.D. 1034

Opinión/ Opinion

La humanidad llega a los ocho mil millones de habitantes y su futuro está en ascuas

Humanity reaches eight billion inhabitants and its future is in embers

Carlos Castañeda-Orjuela 1038

Las humanidades, las ciencias sociales y el arte en la formación de los científicos

Humanities, social sciences, and art in the education of scientists

Darío Valencia Restrepo 1041

Consideraciones sobre la crisis pesquera mundial

Considerations on the global fisheries crisis

Arturo Acero P. 1047

Comentario bibliográfico/Bibliographic commentary

Catálogo de los hongos de Colombia

Catalogue of fungi of Colombia

Jairo Castaño-Zapata, Ph.D. 1050

Obituario/Obituary

Ernesto Guhl Nannetti 1054

Agradecimientos

Acknowledgements 1057

Índice autores

Authors Index 1058

Índice de artículos

Article Index 1060

Enfoque y alcance

Focus and Scope 1068

Ensayo

**Premio Nobel de fisiología o medicina en 2022:
una revalidación de la evidencia molecular de los parentescos
más recientes del *Homo sapiens* en el árbol de la vida**

**Nobel Prize in Physiology or Medicine in 2022:
a revalidation of molecular evidence for the most recent
kinship of *Homo sapiens* in the tree of life**

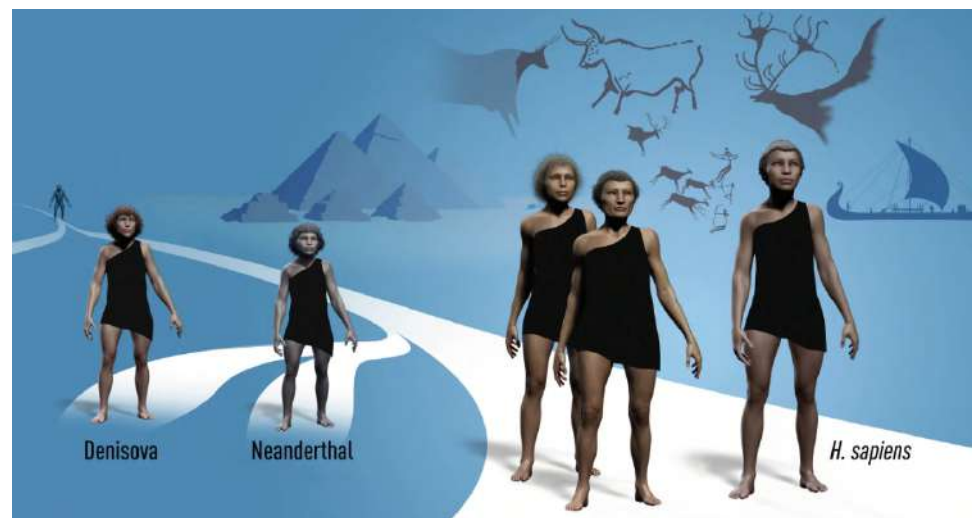


Figura 1. Linajes divergentes de los homínidos más recientes en el árbol de la vida
Tomado de: <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2022/press-release>

Citación: Gómez-Gutiérrez A. Premio Nobel de fisiología o medicina en 2022: una revalidación de la evidencia molecular de los parentescos más recientes del *Homo sapiens* en el árbol de la vida. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):863-865, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1783>

Editor: Elizabeth Castañeda

Correspondencia:

Alberto Gómez Gutiérrez;
alberto.gomez.gutierrez@gmail.com

Recibido: 3 de octubre de 2022

Aceptado: 4 de octubre de 2022

Publicado en línea: 5 de octubre de 2022



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

El comité del Premio Nobel anunció el pasado lunes 3 de octubre que el científico ganador de este galardón en el presente año de 2022 fue Svante Pääbo (n. 1955), biólogo y genetista sueco hijo del bioquímico Sune Bergström —Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1982 por su trabajo con Prostaglandinas— y de Karin Pääbo, química estonia. Las investigaciones moleculares del galardonado han permitido postular desde un gen asociado a la capacidad de hablar en los humanos, el gen FoxP2 (Enard *et al*, 2002), hasta el grado de parentesco de ramas divergentes en los homínidos al comparar genomas considerados “completos” de neandertales (Green *et al*, 2010) y denisovanos (Meyer *et al*, 2012) con el genoma del *Homo sapiens* que representa hoy, de manera preliminar, a toda la humanidad (Figura 1).

En palabras de los académicos suecos, el premio se otorga a quien “logró algo aparentemente imposible: secuenciar el genoma del neandertal, un pariente extinto de los humanos actuales. También hizo el sensacional descubrimiento de un homínido denisovano, hasta entonces desconocido. Y lo que es más importante, Pääbo también descubrió que se había producido una transferencia de genes de estos homínidos ya extinguidos al *Homo sapiens* tras la migración fuera de África hace unos 70.000 años” (NobelPrize.org, 2022).

Para muchos, la relevancia médica o fisiológica de este trabajo no será, a priori, evidente. Sin embargo, se precisó en el comunicado oficial que el flujo de los genes antiguos de neandertales y denisovanos “hacia los humanos actuales, tiene relevancia fisiológica hoy en día, por ejemplo, afectando a la forma en que nuestro sistema inmunológico reacciona a las infecciones”, y en general, que sus hallazgos han dado lugar “a una disciplina científica totalmente nueva: la paleogenómica [a través de la cual se revelan] las diferencias genéticas que distinguen a todos los seres humanos vivos de los homínidos extintos [sentando] las bases para explorar lo que nos hace singularmente humanos” (NobelPrize.org, 2022).

El Nobel que aún hoy se sigue llamando “de fisiología o medicina”, con una significativa incertidumbre, reconoce la importancia de las bases genómicas de esta dimensión del conocimiento: además de fisiología (i. e. cómo funciona el organismo) y medicina (i. e. cómo se tratan las enfermedades), introduce la necesidad de entender el fundamento genético de la fisiología y la enfermedad.

Por otra parte, el comité sueco resalta el hecho de que “la cuestión de nuestro origen y de lo que nos hace únicos ha ocupado a la humanidad desde la antigüedad”. La paleontología y la arqueología han permitido determinar que el *Homo sapiens* apareció por primera vez en África hace cerca de 300.000 años, mientras que nuestros parientes más cercanos conocidos, los neandertales, se desarrollaban fuera de África y poblaban Europa y Asia occidental desde hace unos 400.000 años. Al coexistir en estos territorios con los *Homo sapiens*, y de acuerdo con las evidencias genéticas que ha aportado el grupo liderado por Pääbo, los neandertales llegaron a mezclarse con estos “recién llegados” hace unos 40.000 años en Eurasia. La prueba molecular confirma que en diferentes individuos modernos analizados se puede hallar entre 1 y 6% de contenido neandertal o denisovano (Figura 2).

Debe tenerse en cuenta, en todo caso, que estos porcentajes se calculan a partir de las homologías de los genomas de referencia de muy pocos individuos, y es probable que en diferentes poblaciones —en comunidades americanas, por ejemplo—, y en medio de ellas en diferentes individuos, se puedan encontrar porcentajes mayores o menores de identidad de los humanos actuales con los homínidos, en función de los procesos genéticos involucrados en la miscegenación global a través de la historia, tanto como de la eventual mayor o menor importancia fisiológica de los genes que se utilicen como patrones de comparación.

Alberto Gómez Gutiérrez, PhD FLS

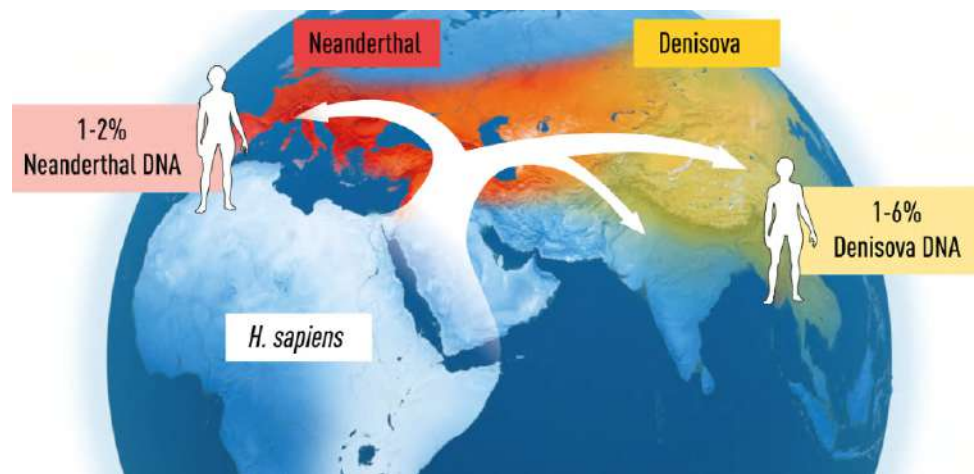


Figura 2. Porcentaje aproximado de nuestro parentesco con los homínidos más recientes
Tomado de: <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2022/press-release>

Referencias

- Enard, W., Przeworski, M., Fisher, S. E., Lai, C. S., Wiebe, V., Kitano, T., Monaco, A. P., Pääbo S.** (2002). Molecular evolution of FOXP2, a gene involved in speech and language. *Nature* 418, 869-872.
- Green, R. E., Krause, J., Briggs, A. W., Maricic, T., Stenzel, U., Kircher, M., Petterson, N., Li, H., Zhai, W., Hsi-Yang Fritz, M., Hansen, N.F., Durand, E.Y., Malaspinas, A.S., Jensen, J.D., Marques-Bonet, T., Alkan, C., Prüfer, K., Meyer, M., Burbano, H.A., Good, J.M., Schultz, R., Aximu-Petri, A., Butthof, A., Höber, B., Höffner, B., ... Pääbo, S.** (2010). A Draft Sequence of the Neandertal Genome. *Science* 328, 710-722.
- Meyer M, Kircher M, Gansauge MT, Li H, Racimo F, Mallick S, Schraiber JG, Jay F, Prüfer K, de Filippo C, Sudmant PH, Alkan C, Fu Q, Do R, Rohland N, Tandon A, Siebauer M, Green RE, Bryc K, Briggs AW, Stenzel U, Dabney J, Shendure J, Kitzman J, Hammer MF, Shunkov MV, Derevianko AP, Patterson N, Andrés AM, Eichler EE, Slatkin M, Reich D, Kelso J, Pääbo S.** (2012). A high-coverage genome sequence from an archaic Denisovan individual. *Science* 338, 222-226.
- NobelPrize.org** (2022). <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2022/press-release>.

Original article

Paracoccidioides restrepiensis has undergone a severe population bottleneck

Paracoccidioides restrepiensis ha experimentado un grave cuello de botella

✉ Juan G. McEwen^{1,2,*}, ✉ Oscar M. Gómez^{1,2}, ✉ Daniel R. Matute³

¹ Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB) Medellín, Colombia

² Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

³ Biology Department, University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina, USA

Inaugural article of Juan Guillermo McEwen as corresponding member of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences

Abstract

Genus *Paracoccidioides* now encompasses five species, *P. lutzii*, *P. brasiliensis sensu stricto*, *P. americana*, *P. venezuelensis*, and *P. restrepiensis*. All the paracoccidioidomycosis (PCM) cases reported in Colombia have been classified as *P. restrepiensis*, which was named in honor of Angela Restrepo, a leading researcher in the field of the biology of the fungus. Previous assessments of genetic diversity have suggested that *Paracoccidioides* species have differences in their level of polymorphism. To infer changes in effective population size, we used the Pairwise sequentially Markovian coalescent (PSMC) by generating two pseudodiploids for *P. restrepiensis* and one for *P. brasiliensis sensu stricto*. We found that *P. restrepiensis* diverged from its sister species recently, the divergence time from *P. venezuelensis* being 125,000 (\pm 42,000) years. The analyses using PSMC show a systematic reduction in the effective population size of *P. restrepiensis* with a rapid decrease in genetic variability compared to *P. brasiliensis sensu stricto*, which indicates that *P. restrepiensis* has undergone a systematic population bottleneck. None of the other two species show the dramatic effective population size reduction observed in *P. restrepiensis*. These comparisons suggest that the trajectory of *P. restrepiensis* is somehow different from the other *Paracoccidioides* species and poses the question regarding the biogeographic events that have led to such a dramatic population pattern.

Keywords: *Paracoccidioides* spp.; *Paracoccidioides restrepiensis*; Paracoccidioidomycosis; Effective population size.

Resumen

El género *Paracoccidioides* hoy abarca cinco especies: *P. lutzii*, *P. brasiliensis sensu stricto*, *P. americana*, *P. venezuelensis* y *P. restrepiensis*. Todos los casos de paracoccidioidomycosis reportados en Colombia han sido causados por *P. restrepiensis*, denominado así en honor de Ángela Restrepo, líder en el estudio de este hongo. Las evaluaciones previas de la diversidad genética han sugerido que las especies de *Paracoccidioides* difieren en su polimorfismo. Para inferir cambios en el tamaño efectivo de la población, se utilizó el método del coalescente markoviano secuencial por pares (*pairwise sequentially Markovian coalescent*, PSMC) mediante la generación de dos pseudodiploides para *P. restrepiensis* y uno para *P. brasiliensis sensu stricto*. Se encontró que *P. restrepiensis* divergió de sus especies hermanas recientemente, con un tiempo de divergencia en relación con *P. venezuelensis* de 125.000 (\pm 42.000) años. Los análisis que utilizan el PSMC muestran una reducción sistemática en el tamaño efectivo de la población de *P. restrepiensis*, con una rápida disminución de la variabilidad genética en comparación con *P. brasiliensis sensu stricto*, lo que indica que *P. restrepiensis* se ha visto expuesto a un cuello de botella poblacional sistemático. Ninguna de las otras dos especies muestra la drástica reducción efectiva del tamaño de

Citation: McEwen JG, Gómez OM, Matute DR. *Paracoccidioides restrepiensis* has undergone a severe population bottleneck. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):866-876, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1768>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Corresponding autor:**

Juan G McEwen; mcewen@une.net.co

Received: September 13, 2022

Accepted: November 3, 2022

Published on line: November 24, 2022



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

la población observada en *P. restrepiensis*. Estas comparaciones sugieren que la trayectoria de *P. restrepiensis* es, de alguna manera, diferente de las otras especies de *Paracoccidioides* y llevan a preguntarse cuáles han sido los eventos biogeográficos que han producido cambios tan dramáticos en el patrón poblacional.

Palabras claves: *Paracoccidioides* spp., *Paracoccidioides restrepiensis*; *Paracoccidioidomycosis*; Tamaño de población efectivo.

Introduction

Paracoccidioides spp. is a genus of temperature-dependent dimorphic fungi that causes paracoccidioidomycosis (PCM), a neglected tropical systemic mycosis. Brazil reports 80 % of the cases with an estimated incidence of 3 to 4 new cases/million and up to 8 to 10 cases/million in highly endemic areas (Bellissimo-Rodrigues *et al.*, 2011; Coutinho *et al.*, 2015). Since 1908, over 15,000 cases have been reported. The mycosis exhibits two main clinical presentations: the subclinical, or asymptomatic infection, and the clinically manifested disease. The latter is usually chronic and involves the primary target, i.e., the lungs, as well as the mucosa and different organs such as the skin, the adrenal glands, and lymph nodes, among others. PCM affects adult males at least ten times more than women, with a male-female ratio of approximately 11:1 (Restrepo-Moreno *et al.*, 2020). The disease has long latency periods, up to 30 years in some cases, as evidenced by cases reported outside the endemic area (Restrepo, 2000).

The first two cases of PCM were reported in 1908 by Adolpho Lutz (1855-1940) (Lutz, 1908, 2004). In 1912, Alfonso Splendore (1871-1953), a colleague of Dr. Lutz, reported four new cases of the disease and placed the fungus in the genus *Zymonema*, as *Zymonema brasiliensis* (Splendore, 1912). In 1930, Floriano Paulo de Almeida (1898-1977) published a comparative study of *Coccidioides immitis* and this new agent demonstrating that PCM and coccidioidomycosis were two different diseases and classifying the agent as *Paracoccidioides brasiliensis* (Almeida, 1930). A consensus on the name and classification was finally achieved in 1971 at the PCM symposium in Medellín, Colombia (PAHO, 1971).

Initially, the disease was named Brazilian blastomycosis, then South American blastomycosis, Lutz disease, and Lutz-Splendore-Almeida disease, among other names. Today, PCM is the universally accepted denomination (Franco *et al.*, 1994).

Since its discovery, *Paracoccidioides* has been the focus of intense research, but despite the exquisite characterization of the immune response and the biochemical characteristics of *Paracoccidioides*, the ecology and evolutionary biology of the fungus remained largely unexplored until the advent of molecular biology. The use of gene genealogies and later the use of wide phylogenetic reconstructions of the genome revealed the existence of species boundaries within what was previously thought to be a single species. The genus *Paracoccidioides* now encompasses *P. lutzii*, *P. brasiliensis sensu stricto*, *P. americana*, *P. venezuelensis*, and *P. restrepiensis*. The five species show phenotypic differences in their morphology (Turissini *et al.*, 2017), pathogenesis (Scorzoni *et al.*, 2018), and the immune response elicited in the host (Assolini *et al.*, 2021; Siqueira *et al.*, 2016), although there has been no systematic assessment of the phenotypic differences among all species.

Notably, the species have distinct yet overlapping geographic ranges suggesting that opportunities for hybridization and gene exchange do exist (Matute *et al.*, 2006) The most prevalent species in Colombia was named *P. restrepiensis* in honor of Angela Restrepo, a trailblazer in the study of the biology of the fungus (Turissini *et al.*, 2017). All the PCM cases reported in Colombia and subjected to molecular characterization have been classified as *P. restrepiensis* suggesting that this species is particularly important in Northern South America (Matute *et al.*, 2006).

The extent of genetic variation in *Paracoccidioides* has been studied since the advent of molecular biology techniques in the 1990s. Initial surveys with RAPDs and RFLPs revealed variations but didn't ascribe them to species boundaries (Morais *et al.*, 2000;

Nino-Vega *et al.*, 2000; Soares *et al.*, 1995). The first formal genetic efforts to characterize the extent of genetic variation in *P. brasiliensis sensu lato* populations used Sanger sequencing to detect genetic polymorphism in short amplicons and revealed the existence of four genetically isolated clades that satisfied the definition of phylogenetic species. Later, these approaches revealed the existence of five different genetically isolated clades that satisfied the definition of phylogenetic species (Matute *et al.*, 2006; Teixeira *et al.*, 2009; Turissini *et al.*, 2017).

Genome sequencing and population genomics allowed for more formal speciation tests (Matute & Sepulveda, 2019). However, the study of short sequences is inherently limited because it can only reveal the history of individual genes while the incorporation of genome-wide polymorphism has provided the opportunity of collating multiple gene genealogies and extracting the most likely species tree. This approach could be used to detect species boundaries using genome divergence as a metric of the concordance between different loci in the genome. In cases of advanced speciation, a large proportion of the genome should show consistent phylogenetic patterns suggesting in turn sufficient time to accumulate private genetic differences (Schön *et al.*, 2009), purge ancestral polymorphism (Gao *et al.*, 2015; Guerrero & Hahn, 2018), and reduce the chance of gene flow (Dagilis *et al.*, 2022; Hamlin *et al.*, 2020). Mavengere *et al.* (2020) used 37 genomes in genome-level tests for genetic divergence (Mavengere *et al.*, 2020) confirming that the five phylogenetic species within *Paracoccidioides* fulfill all these requirements.

Previous assessments of genetic diversity have suggested that *Paracoccidioides* species have differences in their polymorphism level (Matute *et al.*, 2007; Mavengere *et al.*, 2020; Turissini *et al.*, 2017) but no study has addressed whether the demographic trajectories of *Paracoccidioides* species differ from each other. To this end, we used the pairwise sequentially Markovian coalescent (PSMC) method to compare the demographic patterns of two *Paracoccidioides* species: *P. restrepiensis* and *P. brasiliensis sensu stricto*. Our results suggest that, as previously proposed, *P. restrepiensis* has a lower population size as a consequence of a rapid decrease in its population size and genetic variability compared to *P. brasiliensis sensu stricto*. Here we speculate on the potential reasons behind this pattern of genetic variability.

Methods

Genomic data

To infer the changes in effective population size, we used the pairwise sequentially Markovian coalescent (PSMC) (Li & Durbin, 2011) method, which uses the genome of a single diploid individual per species. Since all species of *Paracoccidioides* are haploid, PSMC cannot be applied directly to the genome of a single isolate. Instead, we used two haploid individuals to generate a pseudodiploid genome. We generated two pseudodiploids for *P. restrepiensis*, one for *P. brasiliensis sensu stricto*, and one for *P. americana*. Although our focus was *P. restrepiensis*, the pseudodiploids from the two other species allowed us to compare it to the two other species. The Sequence Read Archive (SRA) numbers for the genomes used to generate pseudodiploids are listed in **table 1**.

Table 1. Genomes used to generate pseudodiploids for the PSMC analyses

Species	Genome 1	Genome 2
<i>P. restrepiensis</i>	EPM83	CAB
<i>P. restrepiensis</i>	H143	CNH
<i>P. americana</i>	T10B1	Pb02
<i>P. brasiliensis sensu stricto</i>	T1F1	PbBercelli

Read mapping and variant calling

We mapped reads from the six resequenced genomes of the five known species to the *P. brasiliensis* strain Pb18 genome (BioProject accession number PRJNA28733 and BioSample accession number SAMN02953720) using the Burrows-Wheeler Aligner (BWA) version 0.7.12. This assembly currently has 57 supercontigs (Desjardins *et al.*, 2011). The resulting BAM files were merged using SAMtools version 0.1.19 for the variant call step. We remapped reads locally in the merged BAM files using the GATK version 3.2-2, RealignerTargetCreator, and IndelRealigner functions (DePristo *et al.*, 2011; McKenna *et al.*, 2010) and identified indels. Next, we identified single-nucleotide polymorphisms (SNPs) using the GATK UnifiedGenotyper function with the parameter “het” set to 0.01 and all others left as default. (The low *het* setting obeys to the fact that *Paracoccidioides* is haploid.) As in previous studies (Mavengere *et al.*, 2020), we filtered the Variant Call Format (VCF) file with the following parameters: QD=2.0, FS_filter=60.0, MQ_filter=30.0, MQ_Rank_Sum_filter = -12.5, and Read_Pos_Rank_Sum_filter = -8.0. We excluded sites when their sequencing individual coverage was below the 5th quantile or above the 99th quantile of the genomic coverage distribution from any analyses.

Phylogenetic tree

To infer divergence times between *P. restrepiensis* and its sister species *P. venezuelensis*, we used a genome-wide phylogenetic tree which inferred the genealogical relationships between the five known species of *Paracoccidioides* using a concatenated matrix of polymorphic sites. To convert tree distances to years, we used the mutation rate measured for *Saccharomyces* in mutation accumulation lines (Leffler *et al.*, 2012), an approach consistent with Turissini *et al.* (2017).

Generation of pseudodiploids

PSMC uses levels of heterozygosity to infer population changes over time. Since *Paracoccidioides* is haploid, the method cannot be applied directly to assembled genomes. We used an alternative approach combining data from two individuals to generate a pseudo-diploid. To create pseudo-diploid sequences, we randomly selected heterozygous alleles from haploid genomes of two isolates from a sample of previously sequenced *Paracoccidioides* genomes (Mavengere *et al.*, 2020). We created pseudo-diploid sequences using the mergefa program in the seqtk package (<https://github.com/lh3/seqtk>) by merging haploid sequences of two individuals per species (Table 1). We only included sites with coverage between the 5th and 99th quantile of the genomic coverage distribution for both haploid isolates and if the SNP failed to pass one of the GATK filters.

PSMC

PSMC calculates the effective population along slices of time using information from the rates of the coalescent events at a given time. To do this inference, we used the method developed by Li & Durbin (2011) (<https://github.com/lh3/psmc>). Briefly, the method uses the distribution of heterozygote sites across the genome and the pairwise sequentially Markovian coalescent (PSMC) method that defines a hidden Markov model where the parameters are the mutation rate, the recombination rate, and the effective population sizes through time. The parameters are inferred through an expectation-maximization algorithm. To assess the robustness of the inference, we did 100 bootstraps for each *Paracoccidioides* species. It should be noted that, unlike standard diploid PSMC plots, PSMC plots of pseudo-diploid genomes usually show an infinite effective population size at the point of divergence (Bazzicalupo *et al.*, 2022; Sato *et al.*, 2020). To convert generations to years, we used a substitution rate for nuclear DNA of 1×10^{-9} substitution/site/year following (Farlow *et al.*, 2015; Lynch *et al.*, 2008).

Results and comments

Paracoccidioides restrepiensis diverged from its sister species recently

Turissini et al. (2017) used a multilocus sequence typing approach to infer the approximate divergence time of *Paracoccidioides* species. We expanded this analysis using the genome-wide phylogenetic tree inferred by **Mavengere et al.** (2020) (**Figure 1**). We found that the approximate age of divergence between *P. restrepiensis* and *P. venezuelensis* is 125,000 ($\pm 42,000$) years, which is consistent with that inferred from a handful of nuclear loci and a constant substitution rate (**Turissini et al.**, 2017).

Paracoccidioides restrepiensis has undergone a systematic population bottleneck

Previous analyses have shown that *P. restrepiensis* has a low level of genetic variation suggesting the possibility of a population bottleneck at some point in its evolutionary history. This pattern of low variability is consistent across the whole genome (**Mavengere et al.**, 2020). We investigated the trajectory of the effective population size in this species using PSMC in two different pseudodiploid genomes. The analyses showed a systematic reduction in the effective population size (N_e) over the last 100,000 years (**Figure 2**); currently, the species shows its lowest historic N_e . This reduction in the N_e has a similar timeline to the divergence time from *P. venezuelensis* (**Turissini et al.**, 2017), *P. restrepiensis* sister species. Please note that although these dates are heavily affected by our assumptions of mutation rate and the number of generations per year, the pattern of constant N_e reduction remains unchanged.

Paracoccidioides brasiliensis sensu stricto and *P. americana*

We used similar PSMC analyses with two other species of *Paracoccidioides* to assess if the pattern of N_e reduction over time was unique to *P. restrepiensis* or whether other species showed a similar trajectory. The analyses yielded two results that are noteworthy: First, we observed that for these other two species, the current effective population size is much larger than that of *P. restrepiensis*, which is in line with previous observations based on the level of heterozygosity (**Mavengere et al.**, 2020; **Muñoz et al.**, 2016; **Turissini et al.**, 2017). The higher level of these two species' genetic diversity is a historical trend and the two species have had a larger N_e than *P. restrepiensis* for at least the last million years. Second, neither of these two species shows the dramatic effective population size

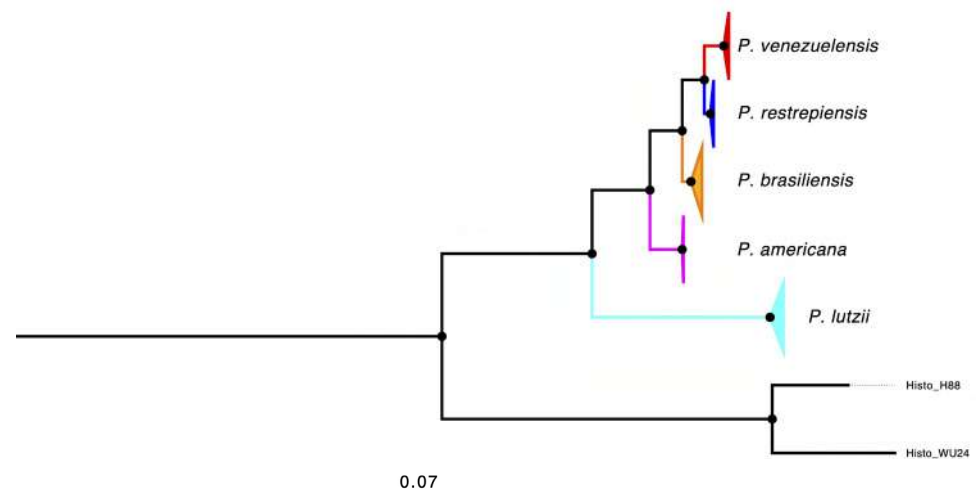


Figure 1. Maximum likelihood tree depicting the genealogical relationships between *Paracoccidioides* species. *Paracoccidioides venezuelensis* is shown in red, *P. restrepiensis* in blue, *P. brasiliensis* in orange, *P. americana* in pink, and *P. lutzii* in cyan. All branches are supported by a bootstrap > 70%. Redrawn from **Mavengere et al.** (2020).

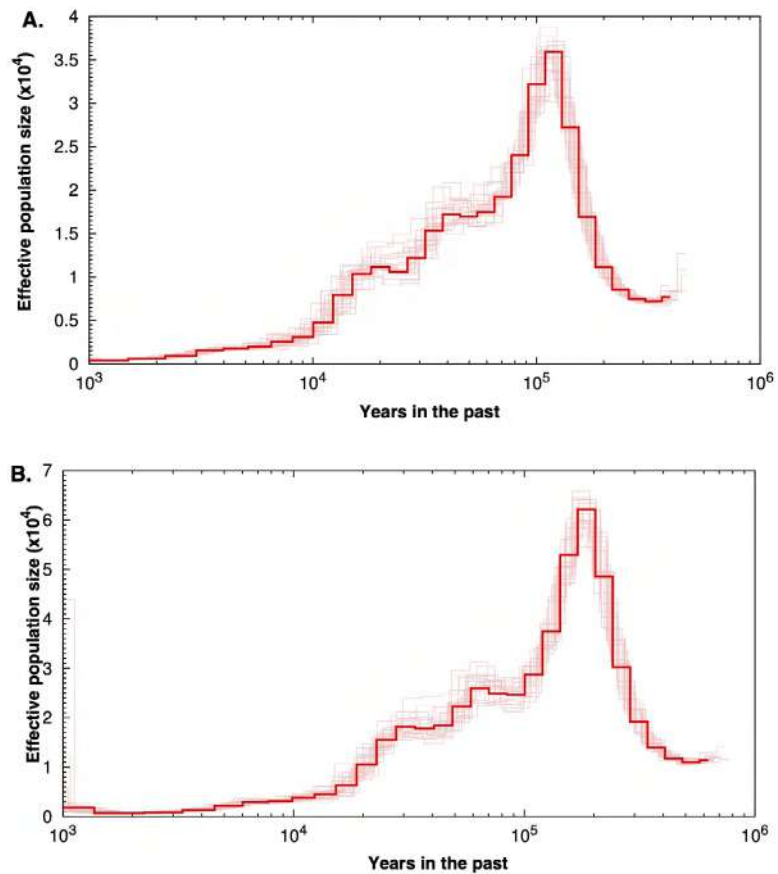


Figure 2. PSMC results for two pseudodiploid genomes of *P. restrepiensis*. The bolded line shows the median N_e (effective population size); other lines show 100 permutations. **A.** EPM83/CAB. **B.** H143/CNH. Note that both analyses show a similar trajectory.

reduction observed in *P. restrepiensis*. The different trajectory of *P. restrepiensis* compared to that of the other *Paracoccidioides* species poses the question of the nature of biogeographic events that led to such a dramatic difference (**Figure 3**).

Discussion

The evolutionary history of the different *Paracoccidioides* species remains a largely unstudied realm of the biology of the fungus. To date, most of the research has focused on describing the phylogenetic relationships between the different *Paracoccidioides* clades (**Matute et al., 2006; Teixeira et al., 2009; Teixeira et al., 2014**). In this report, we focused on the evolutionary dynamics within *Paracoccidioides* species and the trajectory of the N_e in *P. restrepiensis*. Our results suggest that *P. restrepiensis*, unlike other *Paracoccidioides* species, has undergone a continuous reduction of effective population size, which ultimately seems to have led to a genetically depauperate extant population.

Our results open two new research avenues regarding the biology of *P. restrepiensis*. First, recent collections suggested that *P. restrepiensis* is found not only in Colombia (**Cocio et al., 2020; Mattos et al., 2021; Teixeira et al., 2020**), which represents a formal test of the existence of isolation in the potential face of gene flow. More importantly, the expanded geographic range needs to be explored from the population genetics point of view. Multiple approaches have used the algorithm STRUCTURE to detect genetic partitions in the *Paracoccidioides* genus (**Bagagli et al., 2021**). These analyses have revealed the existence of genetic clusters consistent with the species delimitations from phylogenetic

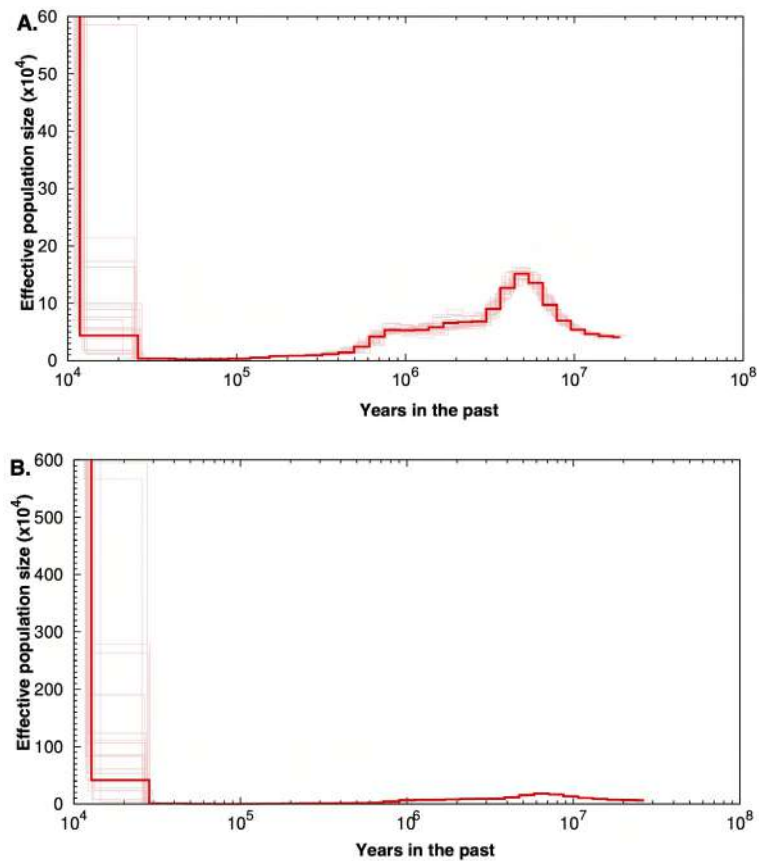


Figure 3. PSMC results for two pseudodiploid genomes of *P. brasiliensis* (A) and *P. americana* (B). The bolded line shows the median N_e ; other lines show 100 permutations.

approaches. Nonetheless, they have not detected any population differentiation with *P. restrepiensis*. This absence of differentiation is not caused by the lack of power to detect structures within each of the phylogenetic species. For example, STRUCTURE detected the existence of two different clades of *P. brasiliensis sensu stricto*, S1a and S1b (Munoz *et al.*, 2016). Genome-wide tests for speciation revealed that the magnitude of genetic differentiation, albeit considerable, is not sufficient to classify these clades as independent species (Bagagli *et al.*, 2021; Mavengere *et al.*, 2020). The recent collection of *P. restrepiensis* in southern Brazil poses the question of whether this lack of structure and low historic effective population size are artifacts of focal collection in Colombia or whether the species is truly well mixed (Teixeira *et al.*, 2020).

One of the questions that arise concerns the sources of variation in *P. restrepiensis* because populations that have undergone extreme bottlenecks are more prone to extinction than those with large effective population sizes. Using full genome sequences and an array of statistical genetics, phylogenetics, and population genetics methods, previous studies have determined that *P. restrepiensis* evidences the exchange of a moderate number of alleles with other *Paracoccidioides* species similar to the levels observed among other *Paracoccidioides* species pairs. These observations are puzzling because the total amount of introgressed DNA was similar across the three species pairs and, given the different ages of the dyads and the expectations, there should be more hybrid incompatibilities in more diverged species pairs than in those recently diverged and, consequently, less possibility of introgression (Dagilis *et al.*, 2022). It is also puzzling that the amount of total introgression in these species pairs was comparable to that observed between species of the genus *Coccidioides* (*C. posadasii* and *C. immitis*), which diverged over 5

million years ago (Maxwell *et al.*, 2019). Whether *P. restrepiensis* can survive through a constant influx of introgression or through evolutionary rescue, “defined as the recovery of a population through natural selection”, is a question that needs to be addressed with a systematic approach.

Genetic divergence is an inexorable outcome of the passage of time. The recognition of species (using any of the available concepts) is not simply a scholastic exercise. On the contrary, the identification of species boundaries allows for the systematic exploration of clinical and epidemiological features that might distinguish between lineages. The use of distinct taxonomic names is also not set in stone. Names have fallen into disuse before (Lacaz *et al.*, 1997). The decision of giving a name to *P. restrepiensis* was not taken lightly; we studied the extent of differentiation at the genome level, at diagnostic loci (Matute *et al.*, 2006) and in morphological traits (Teixeira *et al.*, 2014; Turissini *et al.*, 2017). We also measured the extent of gene flow between species and found no evidence of introgression, a mark of an advanced level of speciation. The only stronger metric of speciation would be the measurement of reproductive isolation in controlled environmental conditions in a systematic crossing scheme. This experiment, however, is not possible for *Paracoccidioides*. The fungus is not known to reproduce sexually in laboratory conditions (even though the genome shows evidence of recombination in nature) (Matute *et al.*, 2006). Doing crosses between different species tends to be much more difficult than setting up crosses within species, a prospect that in *Paracoccidioides* is just staggering.

In the case of *P. restrepiensis*, there is no evidence that the fungus causes a disease that fundamentally differs from that caused by other *Paracoccidioides* species, although no study has sought such differences. These studies are cumbersome and will require a systematic assessment of a disease that is characterized by its long incubation period (Restrepo, 2000; Restrepo-Moreno *et al.*, 2020). Nonetheless, there are indications that *P. restrepiensis* differs from other species in clinically important traits. Serum IgG and IgE show different levels of reaction to antibody exposure in *P. lutzi*, *P. americana*, and *P. restrepiensis* (Assolini *et al.*, 2021). Similarly, even before the species boundaries were reported, *P. restrepiensis* was reported to have an unusually high level of antifungal resistance compared to isolates subsequently found to belong to the other *Paracoccidioides* species (Restrepo & Arango, 1980). The generality of these findings at the species level will require a full assessment of the phenotypic trait range across species.

Currently, there are few medically approved drugs for the treatment of mycoses; besides, the drugs have also been used for agricultural purposes for decades. The genetic information of pathogens is dynamic and they are constantly adapting to new hosts. Fungi such as *Paracoccidioides* spp. have highly efficient machinery (mutations, recombination, and horizontal gene transfer, among others) for genetic diversification and colonization of new environments (Taylor *et al.*, 2017). Emerging genomic variants associated with the antifungal resistance of other fungal species are being reported all over the world. Now, *P. restrepiensis* is a unique pathogenic fungal species circulating almost exclusively in Colombia and, therefore, it is a priority to continue with the genome surveillance and evolutionary history reconstruction of this endemic fungal species, particularly in a country with high biodiversity and active agricultural production as is the case of Colombia.

Acknowledgments

This study received support from CODI-Universidad de Antioquia via a grant (Sostenibilidad 2017/2018) and a student scholarship from the post-graduation fund at Universidad de Antioquia.

Author contribution

JCMCE: Writing of the original draft, review of the manuscript, writing of the final draft; OMG: Review of the draft and the manuscript; DRM: Writing of the main draft of the article, conceptualization and design of the methodology and data curation.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Almeida, F. P.** (1930). Estudos comparativos do granuloma coccidióidico nos Estados Unidos e no Brasil. Novo gênero para o parasito brasileiro. *Annals Faculdade de Medicina Sao Paulo* 5, 125-141.
- Assolini, J. P., Lenhard-Vidal, A., Brecht, C. S. O., Tano, Z. N., Sano, A., Cezar-Dos-Santos, F., Ono, M. A., Itano, E. N.** (2021). Distinct Pattern of *Paracoccidioides lutzii*, *P. restrepiensis* and *P. americana* Antigens Recognized by IgE in Human Paracoccidioidomycosis. *Current Microbiology*, 78(7), 2608-2614. <https://doi.org/10.1007/s00284-021-02508-7>
- Bagagli, E., Matute, D. R., Garces, H. G., Tenorio, B. G., Garces, A. G., Alves, L. G. B., Yamauchi, D. H., Hrycyk, M. F., Barker, B. M., Teixeira, M. M.** (2021). *Paracoccidioides brasiliensis* Isolated from Nine-Banded Armadillos (*Dasypus novemcinctus*) Reveal Population Structure and Admixture in the Amazon Basin. *Journal of Fungi (Basel)*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/jof7010054>
- Bazzicalupo, E., Lucena-Pérez, M., Kleinman-Ruiz, D., Pavlov, A., Trajçe, A., Hoxha, B., Sanaja, B., Gurielidze, Z., Kerdikoshvili, N., Mamuchadze, J., Yarovenko, Y. A., Akkiev, M. I., Ratkiewicz, M., Saveljev, A. P., Melovski, D., Gavashelishvili, A., Schmidt, K., Godoy, J. A.** (2022). History, demography and genetic status of Balkan and Caucasian *Lynx lynx* (Linnaeus, 1758) populations revealed by genome-wide variation. *Diversity and Distributions*, 28(1), 65-82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ddi.13439>
- Bellissimo-Rodrigues, F., Machado, A. A., Martinez, R.** (2011). Paracoccidioidomycosis epidemiological features of a 1,000-cases series from a hyperendemic area on the southeast of Brazil. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 85(3), 546-550. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.2011.11-0084>
- Cocio, T.A., Nascimento, E., Kress, M., Bagagli, E., Martinez, R.** (2020). Characterization of a *Paracoccidioides* spp. strain from southeastern Brazil genotyped as *Paracoccidioides restrepiensis* (PS3) and review of this phylogenetic species. *Genetics and Molecular Biology*, 43(2), e20190201. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2019-0201>
- Coutinho, Z.F., Wanke, B., Travassos, C., Oliveira, R.M., Xavier, D.R., Coimbra, C. E., Jr.** (2015). Hospital morbidity due to paracoccidioidomycosis in Brazil (1998-2006). *Tropical Medicine and International Health*, 20(5), 673-680. <https://doi.org/10.1111/tmi.12472>
- Dagilis, A.J., Peede, D., Coughlan, J.M., Jofre, G.I., D'Agostino, E.R.R., Mavengere, H., Tate, A.D., Matute, D.R.** (2022). A need for standardized reporting of introgression: Insights from studies across eukaryotes. *Evolution Letters*, n/a(n/a). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/evl3.294>
- DePristo, M.A., Banks, E., Poplin, R., Garimella, K.V., Maguire, J.R., Hartl, C., Philippakis, A.A., del Angel, G., Rivas, M.A., Hanna, M., McKenna, A., Fennell, T.J., Kernysky, A.M., Sivachenko, A.Y., Cibulskis, K., Gabriel, S.B., Altshuler, D., Daly, M.J.** (2011). A framework for variation discovery and genotyping using next-generation DNA sequencing data. *Nature Genetics*, 43(5), 491-498. <https://doi.org/10.1038/ng.806>
- Desjardins, C.A., Champion, M.D., Holder, J.W., Muszewska, A., Goldberg, J., Bailao, A.M., Brigido, M.M., Ferreira, M.E., Garcia, A.M., Grynberg, M., Gujja, S., Heiman, D.I., Henn, M.R., Kodira, C.D., Leon-Narvaez, H., Longo, L.V., Ma, L.J., Malavazi, I., Matsuo, A.L., . . . Cuomo, C. A.** (2011). Comparative genomic analysis of human fungal pathogens causing paracoccidioidomycosis. *PLoS Genetics*, 7(10), e1002345. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002345>
- Farlow, A., Long, H., Arnoux, S., Sung, W., Doak, T.G., Nordborg, M., Lynch, M.** (2015). The Spontaneous Mutation Rate in the Fission Yeast *Schizosaccharomyces pombe*. *Genetics*, 201(2), 737-744. <https://doi.org/10.1534/genetics.115.177329>
- Franco, M.F., Del Negro, G., Lacaz, C.d.S., Restrepo-Moreno, A.** (1994). *Paracoccidioidomycosis*. CRC Press.
- Gao, Z., Przeworski, M., Sella, G.** (2015). Footprints of ancient-balanced polymorphisms in genetic variation data from closely related species. *Evolution*, 69(2), 431-446. <https://doi.org/10.1111/evo.12567>
- Guerrero, R.F., Hahn, M.W.** (2018). Quantifying the risk of hemiplasy in phylogenetic inference. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 115(50), 12787-12792. <https://doi.org/10.1073/pnas.1811268115>


- Hamlin, J.A.P., Hibbins, M.S., Moyle, L.C.** (2020). Assessing biological factors affecting post-speciation introgression. *Evolution Letters*, 4(2), 137-154. <https://doi.org/10.1002/evl3.159>
- Lacaz Cda, S., Vidal, M.S., Pereira, C.N., Heins-Vaccari, E.M., de Melo, N.T., Sakai-Valente, N., Arriagada, G.L.** (1997). *Paracoccidioides cerebriformis* Moore, 1935. Mycologic and immunochemical study. *Rev Inst Med Trop Sao Paulo*, 39(3), 141-144. <https://doi.org/10.1590/s0036-46651997000300003>
- Leffler, E.M., Bullaughey, K., Matute, D.R., Meyer, W.K., Segurel, L., Venkat, A., Andolfatto, P., Przeworski, M.** (2012). Revisiting an old riddle: what determines genetic diversity levels within species? *PLoS Biology*, 10(9), e1001388. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001388>
- Li, H., Durbin, R.** (2011). Inference of human population history from individual whole-genome sequences. *Nature*, 475(7357), 493-496. <https://doi.org/10.1038/nature10231>
- Lutz, A.** (1908). Uma mycose pseudo-coccidica localizada na boca e observada no Brazil: contribuicao ao conhecimento das hyphoblastomycoses americanas. *Brasil Medico*, 22, 121-124, 141-144.
- Lutz, A.** (2004). *Lutz A Obra completa Uma micose pseudococcidica localizada na boca e observada no Brasil. Contribuição ao conhecimento das hifoblastomicoses americanas*. Fiocruz
- Lynch, M., Sung, W., Morris, K., Coffey, N., Landry, C.R., Dopman, E. B., Dickinson, W.J., Okamoto, K., Kulkarni, S., Hartl, D.L., Thomas, W.K.** (2008). A genome-wide view of the spectrum of spontaneous mutations in yeast. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 105(27), 9272-9277. <https://doi.org/10.1073/pnas.0803466105>
- Mattos, K., Cocio, T. A., Chaves, E. G. A., Borges, C.L., Venturini, J., de Carvalho, L.R., Mendes, R.P., Paniago, A.M.M., Weber, S.S.** (2021). An update on the occurrence of *Paracoccidioides* species in the Midwest region, Brazil: Molecular epidemiology, clinical aspects and serological profile of patients from Mato Grosso do Sul State. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 15(4), e0009317. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009317>
- Matute, D.R., McEwen, J.G., Puccia, R., Montes, B.A., San-Blas, G., Bagagli, E., Rauscher, J.T., Restrepo, A., Morais, F., Nino-Vega, G., Taylor, J.W.** (2006). Cryptic speciation and recombination in the fungus *Paracoccidioides brasiliensis* as revealed by gene genealogies. *Molecular Biology and Evolution*, 23(1), 65-73. <https://doi.org/10.1093/molbev/msj008>
- Matute, D.R., Sepulveda, V.E.** (2019). Fungal species boundaries in the genomics era. *Fungal Genetics and Biology*, 131, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2019.103249>
- Matute, D.R., Sepulveda, V.E., Quesada, L.M., Goldman, G.H., Taylor, J.W., Restrepo, A., McEwen, J.G.** (2006). Microsatellite analysis of three phylogenetic species of *Paracoccidioides brasiliensis*. *Journal of Clinical Microbiology*, 44(6), 2153-2157. <https://doi.org/10.1128/JCM.02540-05>
- Matute, D.R., Torres, I.P., Salgado-Salazar, C., Restrepo, A., McEwen, J.G.** (2007). Background selection at the chitin synthase II (chs2) locus in *Paracoccidioides brasiliensis* species complex. *Fungal Genetics and Biology*, 44(5), 357-367. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2007.01.006>
- Mavengere, H., Mattox, K., Teixeira, M.M., Sepulveda, V.E., Gomez, O.M., Hernandez, O., McEwen, J., Matute, D.R.** (2020). *Paracoccidioides* Genomes Reflect High Levels of Species Divergence and Little Interspecific Gene Flow. *mBio*, 11(6), e01999-01920. <https://doi.org/10.1128/mBio.01999-20>
- Maxwell, C.S., Mattox, K., Turissini, D.A., Teixeira, M.M., Barker, B.M., Matute, D.R.** (2019). Gene exchange between two divergent species of the fungal human pathogen, *Coccidioides*. *Evolution*, 73(1), 42-58. <https://doi.org/10.1111/evo.13643>
- McKenna, A., Hanna, M., Banks, E., Sivachenko, A., Cibulskis, K., Kernytsky, A., Garimella, K., Altshuler, D., Gabriel, S., Daly, M., DePristo, M.A.** (2010). The Genome Analysis Toolkit: a MapReduce framework for analyzing next-generation DNA sequencing data. *Genome Research*, 20(9), 1297-1303. <https://doi.org/10.1101/gr.107524.110>
- Morais, F.V., Barros, T.F., Fukada, M.K., Cisalpino, P.S., Puccia, R.** (2000). Polymorphism in the gene coding for the immunodominant antigen gp43 from the pathogenic fungus *paracoccidioides brasiliensis*. *Journal of Clinical Microbiology*, 38(11), 3960-3966. <http://jcm.asm.org/cgi/content/abstract/38/11/3960>
- Muñoz, J.F., Farrer, R.A., Desjardins, C.A., Gallo, J.E., Sykes, S., Sakthikumar, S., Misas, E., Whiston, E.A., Bagagli, E., Soares, C.M., Teixeira, M.M., Taylor, J. W., Clay, O.K., McEwen, J.G., Cuomo, C.A.** (2016). Genome Diversity, Recombination, and Virulence across the Major Lineages of *Paracoccidioides*. *mSphere*, 1(5), e00213-00216. <https://doi.org/10.1128/mSphere.00213-16>

- Niño-Vega, G.A., Calcagno, A.M., San-Blas, G., San-Blas, F., Gooday, G.W., & Gow, N.A. (2000). RFLP analysis reveals marked geographical isolation between strains of *Paracoccidioides brasiliensis*. *Medical Mycology*, 38(6), 437-441. <https://doi.org/10.1080/mmy.38.6.437.441>
- PAHO, (1971). Paracoccidioidomycosis. Proceedings of the First Pan American Symposium, Medellín, Colombia, Medellín, Colombia.
- Restrepo, A. (2000). Morphological aspects of *Paracoccidioides brasiliensis* in lymph nodes: implications for the prolonged latency of paracoccidioidomycosis?. *Medical Mycology*, 38(4), 317-322. <https://doi.org/10.1080/mmy.38.4.317.322>
- Restrepo, A., Arango, M. D. (1980). In vitro susceptibility testing of *Paracoccidioides brasiliensis* to sulfonamides. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 18(1), 190-194. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7416744>
- Restrepo-Moreno, A., Tobon-Orozco, A.M., González-Marín, A. (2020). Paracoccidioidomycosis. In J. E. Bennett, R. Dolin, & M. J. Blaser (Eds.), *Mandell, Douglas, and Bennett's principles and practice of infectious diseases* (Ninth edition. ed., Vol. 2, pp. 3211-3221). Elsevier.
- Sato, Y., Ogden, R., Kishida, T., Nakajima, N., Maeda, T., Inoue-Murayama, M. (2020). Population history of the golden eagle inferred from whole-genome sequencing of three of its subspecies. *Biological Journal of the Linnean Society*, 130(4), 826-838. <https://doi.org/10.1093/biolinnean/blaa068>
- Schön, I., Martens, K., Dijk, P.V. (2009). *Lost sex: the evolutionary biology of parthenogenesis*. Springer.
- Scorzoni, L., de Lucas, M.P., Singulani, J.L., de Oliveira, H.C., Assato, P.A., Fusco-Almeida, A.M., Mendes-Giannini, M.J.S. (2018). Evaluation of *Caenorhabditis elegans* as a host model for *Paracoccidioides brasiliensis* and *Paracoccidioides lutzii*. *Pathogens and Disease*, 76(1). <https://doi.org/10.1093/femspd/fty004>
- Siqueira, I.M., Fraga, C.L., Amaral, A.C., Souza, A.C., Jeronimo, M.S., Correa, J.R., Magalhaes, K.G., Inacio, C.A., Ribeiro, A.M., Burguel, P.H., Felipe, M.S., Tavares, A.H., Bocca, A.L. (2016). Distinct patterns of yeast cell morphology and host responses induced by representative strains of *Paracoccidioides brasiliensis* (Pb18) and *Paracoccidioides lutzii* (Pb01). *Medical Mycology*, 54(2), 177-188. <https://doi.org/10.1093/mmy/myv072>
- Soares, C., Madlun, E., da Silva, S., Pereira, M., Felipe, M. (1995). Characterization of *Paracoccidioides brasiliensis* isolates by random amplified polymorphic DNA analysis. *Journal of Clinical Microbiology*, 33(2), 505-507. <https://doi.org/10.1128/jcm.33.2.505-507.1995>
- Splendore, A. (1912). Zymonematosi con localizzazione nella cavita della bocca, osservata in Brasile. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 5, 313-319.
- Taylor, J. W., Branco, S., Gao, C., Hann-Soden, C., Montoya, L., Sylvain, I., Gladieux, P. (2017). Sources of Fungal Genetic Variation and Associating It with Phenotypic Diversity. *Microbiology Spectrum*, 5(5). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0057-2016>
- Teixeira Mde, M., Theodoro, R.C., Oliveira, F.F., Machado, G.C., Hahn, R.C., Bagagli, E., San-Blas, G., Soares Felipe, M.S. (2014). *Paracoccidioides lutzii* sp. nov.: biological and clinical implications. *Medical Mycology*, 52(1), 19-28. <https://doi.org/10.3109/13693786.2013.794311>
- Teixeira, M.M., Cattana, M.E., Matute, D.R., Munoz, J.F., Arechavala, A., Isbell, K., Schipper, R., Santiso, G., Tracogna, F., Sosa, M. L. A., Cech, N., Alvarado, P., Barreto, L., Chacon, Y., Ortellado, J., Lima, C. M., Chang, M. R., Nino-Vega, G., Yasuda, M.A.S., ... Giusiano, G. (2020). Genomic diversity of the human pathogen *Paracoccidioides* across the South American continent. *Fungal Genetics and Biology*, 140, 103395. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2020.103395>
- Teixeira, M.M., Theodoro, R.C., de Carvalho, M. J., Fernandes, L., Paes, H.C., Hahn, R.C., Mendoza, L., Bagagli, E., San-Blas, G., Felipe, M.S. (2009). Phylogenetic analysis reveals a high level of speciation in the *Paracoccidioides* genus [Research Support, Non-U.S. Gov't]. *Mol Phylogenet Evol*, 52(2), 273-283. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2009.04.005>
- Teixeira, M.M., Theodoro, R.C., Nino-Vega, G., Bagagli, E., Felipe, M.S. (2014). Paracoccidioides species complex: ecology, phylogeny, sexual reproduction, and virulence. *PLoS Pathogens*, 10(10), e1004397. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1004397>
- Turissini, D.A., Gómez, O.M., Teixeira, M.M., McEwen, J.G., Matute, D.R. (2017). Species boundaries in the human pathogen *Paracoccidioides*. *Fungal Genetics and Biology*, 106, 9-25. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2017.05.007>

Original article

Spin-selective insulators

Aislantes de espín selectivo

 J. Silva-Valencia

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

Inaugural article for admission as corresponding member of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences

Abstract

Spin-selective insulators emerge in systems composed of fermions with two internal degrees of freedom and another carrier, which could be fermionic or bosonic. These insulators are characterized by a gapless state for one kind of fermion and an insulator state for the other, with the latter satisfying a commensurability relation that involves the other carrier. We review the different scenarios where these unique insulators arise, focusing on Bose-Fermi mixtures, the most recent and promising scenario for observing these insulators in cold atom setups.

Keywords: Quantum phase transitions; strongly correlated systems; Hubbard model; Kondo lattice model; DMRG.

Resumen

Estados aislantes de espín selectivo surgen en sistemas compuestos de fermiones con dos grados de libertad internos y otro tipo de portador, que puede ser fermiónico o bosónico. Estos aislantes se caracterizan por un estado sin gap para un tipo de fermiones y un estado aislante para los otros, donde los últimos satisfacen una relación de commensurabilidad que involucra al otro tipo de portador. Nosotros revisamos los diferentes escenarios donde estos particulares aislantes surgen, enfocandonos en las mezclas Bose-Fermi, que son el más reciente y promisor escenario para observar estos aislantes en los montajes de átomos fríos.

Palabras clave: Transiciones de fase cuánticas; sistemas fuertemente correlacionados; modelo de Hubbard; modelo de red de Kondo; DMRG.

Introduction

The main reason that condensed matter physics exhibits such plethora of physical phenomena is that it involves a great number of carriers that undergo strong interactions in various degrees of freedom, such as charge, spin, lattice, orbital, topology, and disorder, which generate diverse ground states and intriguing quantum phenomena. A basic description of materials in terms of weakly interacting electron systems and the use of the filling of the electronic bands allowed us to distinguish between metals and insulators; however, experiments suggested the need to include an on-site Coulomb interaction between electrons in order to explain some results and the *metal-insulator transition* (Mott, 1968). The interplay between the kinetic energy and the local repulsive interaction leads to a half-filling

Citation: Silva-Valencia J. Aislantes de espín selectivo. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):877-898, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1774>

Editor: Jairo Roa Rojas

Corresponding autor:

Jereson Silva Valencia;
jsilvalencia@gmail.com

Received: September 22, 2022

Accepted: October 8, 2022

Published on line: November 30, 2022



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

insulator with a charge gap, where at each site there is one electron forming a global antiferromagnetic state called *Mott-insulator* (Imada *et al.*, 1998; Guan *et al.*, 2013). Note that the bosonic counterpart also exhibits insulator states at integer densities, which has been experimentally observed (Cazalilla *et al.*, 2011).

The diverse degrees of freedom of the carriers enable the emergence of other insulators, such as charge density waves (Grüner, 1988) and spin density waves (Grüner, 1994), among others. Taking into account the topology of the band structures allows us to classify insulators into different classes, and under the influence of strong spin-orbital coupling, the usual ordering conduction and valence bands of an ordinary insulator can be inverted, allowing the appearance of metallic surface states. This illustration indicates that there are gapless surface states inside the bulk energy gap, which characterizes the topological insulators, where these surface states exhibit a Dirac cone-type dispersion (Hasan & Kane, 2010; Qi & Zhang, 2011; Yan & Felser, 2017).

In iron chalcogenide materials, the physical properties depend on the competition between the electron correlation strength and the nature of the Fermi surface, which causes a subset of orbitals (denoted “heavy”) to have a much larger effective mass than another group (denoted “light”), allowing the possibility that the heavy electrons are Mott localized and coexist with the itinerant light electrons, a unique insulator state called an orbital-selective Mott phase (Anisimov *et al.*, 2002; Yi *et al.*, 2015).

As mentioned before, there are many intriguing insulators with interesting properties; however, in this review, we consider the spin-selective insulators, which have emerged so far in two different scenarios: the Kondo lattice model and Bose-Fermi mixtures. The common element between the two scenarios is a system of fermions with two internal degrees of freedom that coexist with other systems of localized spins or bosons. The strong interactions generate a state characterized by a gapless background due to one kind of fermions, while the other kind of fermions remains in an insulator state, fulfilling a commensurate relation with the other ingredient (fermions or bosons), which is the reason it is called a spin-selective insulator. Although both scenarios will be discussed, special attention will be dedicated to mixtures, which are projected to be the most promising platform for observing these states.

The plan of this article is as follows: The original scenario where the spin-selective insulator emerges, which is the Kondo lattice model, is discussed in Sec. II. The recent Bose-Fermi mixture scenario will be covered extensively in Sec. III. In Sec. IV, we will suggest possible new scenarios for the emergence of spin-selective insulators. Finally, some conclusions will be put forth in Sec. V.

Two-band Fermionic models

Strong correlations between electrons generate interesting and intriguing experimental results in diverse kind of materials. For instance, in intermetallic compounds containing rare-earth or actinide elements, the strong electron-electron correlation is crucial. In these materials, the linear coefficient of the specific heat and the Pauli spin susceptibility are extremely large compared to that of conventional metals, keeping the Wilson ratio around the unity and enabling a description in terms of the Fermi-liquid theory. To explain the experiments, it is common to consider a quasiparticle mass around two to three orders of magnitude larger than the bare electron mass, giving the name of *heavy fermions* to these materials (Hewson, 1997).

Two different kind of electrons determine the physics of the heavy-fermion materials. One is a set of electrons in the inner f orbitals, which remains localized even in a periodic lattice. The other set consists of the conduction electrons in s -, p -, or d -atomic orbitals, which

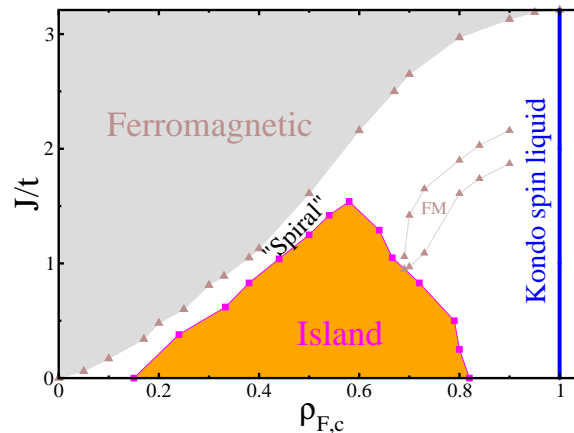


Figura 1. Zero-temperature phase diagram of the one-dimensional Kondo lattice model, interaction coupling (J/t) versus conduction electron density ($\rho_{F,c}$).

moves through a lattice. The local interaction between f and conduction electrons generates the largest energy scale of the system, followed by the Hund's-rule coupling (Tsunetsugu *et al.*, 1997). The heavy-fermion materials are modeled as strongly coupled conduction electrons and nearly independent localized spins, which generate a variety of ground states, such as the normal heavy-fermion state, unusual superconducting states, antiferromagnetically ordered states, and topological Kondo insulators (Gegenwart *et al.*, 2008).

Although the study of the physics of block heavy-fermion materials is still current and offering surprises, a new impetus has emerged with the possibility of creating heterostructures based on heavy-fermion materials, for instance superlattices with a unit cell composed of a two-dimensional heavy-fermion material and a different material exhibit intriguing superconducting and magnetic properties, which are tunable by changing the superlattice structure, opening the possibility of creating new functional devices based on heavy-fermions (Shishido *et al.*, 2010; Mizukami *et al.*, 2011; Shimozawa *et al.*, 2016).

Recently, it was observed that the material CeCo_2Ga_8 exhibits a strong anisotropy ratio of its magnetic exchange interactions, which allows concluding that this is a realistic example of a Kondo chain, thus approaching the theoretical results and the experimental ones (Cheng *et al.*, 2019).

Another branch, opened in the last decade, relate to heavy fermions is the possibility of emulating their main ingredients in clean and fully controllable setups, which is achieved by confining alkaline-earth-like atoms (Yb and Sr) in optical lattices (Gorshkov *et al.*, 2010; Riegger *et al.*, 2018; Ono *et al.*, 2019).

As mentioned before, the spin exchange between conduction electrons and localized impurities is relevant for understanding heavy-fermions, which can lead us to an indirect exchange interaction between impurities called Rudermann-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) interaction, which emerges due to the fact that the impurities are coupled to the same conduction electrons, making possible a magnetic interaction between impurities and a magnetic ordering throughout the system. A different scenario involves a collective screening of the impurities by the conduction electrons called the Kondo effect. The interplay between the RKKY interaction and the Kondo effect is crucial here (Hewson, 1997). The main models considered to explain the experimental results of heavy-fermion materials are the periodic Anderson model and the Kondo lattice model, the latter being a simpler model obtained from the former one. The Kondo lattice model considers a kinetic energy term and a local spin-spin interaction term between the localized impurity and the conduction electrons, and

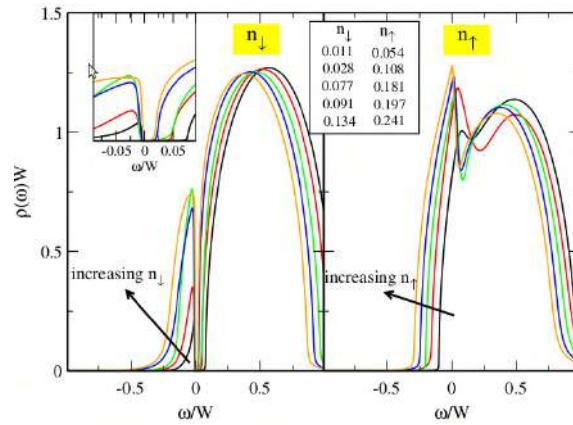


Figure 2. Local spin-resolved spectral functions for the Kondo lattice model in a Bethe lattice. The interaction coupling is $J/4t = 0.25$, hence the ground state is ferromagnetic. In the inset, we can see the gap for the spin-down component. Reproduced from (Peters *et al.*, 2012).

its Hamiltonian reads

$$\hat{H} = J \sum_i \hat{S}_i \cdot \hat{s}_i - t \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} \left(\hat{c}_{i,\sigma}^\dagger \hat{c}_{j,\sigma} + \text{H.c.} \right), \quad (1)$$

where $\hat{c}_{i,\sigma}^\dagger$ creates a conduction electron at site i with spin σ so that $\hat{n}_{i,\sigma}^{F,c} = \hat{c}_{i,\sigma}^\dagger \hat{c}_{i,\sigma}$ is the local number operator. \hat{S}_i represents a localized spin-1/2 operator, while $\hat{s}_i = \frac{1}{2} \sum_{\alpha\beta} \hat{c}_{i,\alpha}^\dagger \sigma_{\alpha\beta} \hat{c}_{i,\beta}$ is the spin operator of a conduction electron, σ being the vector of the Pauli matrices. J is the antiferromagnetic local exchange coupling, and t is the hopping integral between nearest-neighbor sites.

Despite its apparent simplicity and the arduous study on the Kondo lattice model, which has involved multiple techniques, it constantly gives us new surprises that keep it alive and current even today (Tsunetsugu *et al.*, 1997; Shibata & Ueda, 1999; Gulacsi, 2004; Caprara & Rosengren, 1997; Honner & Gulacsi, 1997; McCulloch *et al.*, 2002; Basylko *et al.*, 2008). In Fig. 1, we sketch the one-dimensional phase diagram of the Kondo lattice model, the local exchange coupling (J/t) versus the density of the conduction electrons $\rho_{F,c} = N_F/L$, where N_F is the total number of conduction electrons and L is the lattice size. When the number of conduction electrons matches the lattice size, the half-filling configuration ($\rho_{F,c}=1$) is reached and a local singlet is expected at each site. This ground state is an insulator with nonzero spin and charge gaps, which is called a Kondo spin liquid. A richer scenario emerges far away from half-filling with a main ferromagnetic phase dominating the diagram, although it decreases when the density increases. A phase with zero spin gap and a quasi-long-range order that depends on the density is established for lower values of the local exchange, which is called the “island” phase (Garcia *et al.*, 2000, 2002, 2004; Xavier *et al.*, 2003). Between the island and ferromagnetic phases, a “spiral” region with unclear magnetic order in the system emerges (Garcia *et al.*, 2004). An additional small ferromagnetic phase with intermediate coupling strengths and densities $\rho_{F,c} > 2/3$ has been reported (Peters & Kawakami, 2012; McCulloch *et al.*, 2002).

The ferromagnetic phase contains interesting physics, as was shown by Peters *et al.*, who used dynamical mean-field theory to solve the Kondo lattice model, considering a two-dimensional square lattice and a Bethe lattice. The local spin-resolved spectral functions reported for the latter lattice appear in Fig. 2, where they considered an antiferromagnetic Kondo coupling $J/W = 0.25$ (bandwidth $W = 4t$), for which the ferromagnetic phase ex-

tends to the conduction density $\rho_{F,c} = \rho_{F,c}^\uparrow + \rho_{F,c}^\downarrow = 0.5$. The surprising result is that the spectral function for the majority-spin ($\rho_{F,c}^\uparrow$) is different from that for the minority-spin ($\rho_{F,c}^\downarrow$). The minority-spin spectral function exhibits a gap at the Fermi energy, while that for the majority-spin has a peak at the Fermi energy $\omega = 0$ and a dip for $\omega > 0$, which suggests that despite the ferromagnetic state being metallic, one kind of conduction electron contributes little to the low-temperature behavior and the responsibility is assumed by the other kind. A further increase in the occupation number leads to the dip becoming larger and closer to the Fermi energy, which will take us to a paramagnetic state (**Peters *et al.*, 2012**).

An insulator state called spin-selective Kondo insulator is established for the minority-spin conduction electrons, which has not yet been explained. To elucidate this, Peters *et al.* considered that the localized spins are formed by a half-filled f orbital with a strongly local repulsion interaction between the electrons, so that the spin polarization is given by $\langle S_{z,i} \rangle = 0.5(\langle n_{i,\uparrow}^{Ff} \rangle + \langle n_{i,\downarrow}^{Ff} \rangle)$. In Fig. 3, we display the local commensurability profile along a one-dimensional lattice, calculated using the density matrix renormalization group (DMRG) method with open boundary conditions (**Peters & Kawakami, 2012**). The local commensurability is given by $\langle n_{i,\downarrow}^{Fc} + n_{i,\downarrow}^{Ff} \rangle = \langle n_{i,\uparrow}^{Fc} \rangle - \langle S_{z,i} \rangle + 0.5$, and its evolution is shown for a lattice with 60 sites and diverse numbers of conduction electrons and antiferromagnetic couplings. In all the panels, we observe that the local commensurability oscillates around $\langle n_{i,\downarrow}^{Fc} + n_{i,\downarrow}^{Ff} \rangle \sim 1$, but the total number of minority-spin conduction electrons plus spin-down f electrons is commensurate with the lattice size. The oscillations are due to the open boundary conditions, and despite them, the local commensurability condition is fulfilled within 1% for the upper four panels, which correspond to states inside the main ferromagnetic phase, while the lower panel, related to the smaller ferromagnetic area in the phase diagram, exhibits very strong oscillations. It is important to mention that the above commensurability was also observed for the Kondo lattice model in a Bethe lattice and a two-dimensional square lattice; therefore the conclusion is that within the ferromagnetic state the following commensurability condition is fulfilled:

$$\rho_{F,c}^\downarrow + \rho_{F,f}^\downarrow = 1. \quad (2)$$

Taking into account that the half-filling condition for the localized band requires that $\rho_{F,f}^\uparrow + \rho_{F,f}^\downarrow = 1$, it is clear that $\rho_{F,f}^\uparrow = \rho_{F,c}^\downarrow$. Another important point is that the majority spins do not fulfill any commensurability relation. Note that the minority-spin conduction electrons and a part of the f electrons collaborate to form a Kondo singlet, while the rest give the ferromagnetic character to the state.

To summarize, it was found that in the ferromagnetic metallic phase of the Kondo lattice model with antiferromagnetic coupling, the majority-spin conduction electrons are in a gapless state, while the minority-spin ones remain in an insulator state, which has an associated a commensurability relation. This insulator was referred to as a spin-selective Kondo insulator, for us simply a spin-selective insulator, and this was the first scenario in which it arose.

We would like to point out that Bazzanella and Nilsson also explain the ferromagnetic phase and the emergence of the spin-selective insulators through a canonical transformation that expresses the Kondo lattice model in terms of Majorana fermions (**Bazzanella & Nilsson, 2014**).

From the above discussion, we know that the Kondo lattice model can offer still new physics and phenomena, which is evident when we consider the new possibilities that emerge from the attempts to emulate the Kondo lattice model in diverse environments (**Silva-Valencia &**

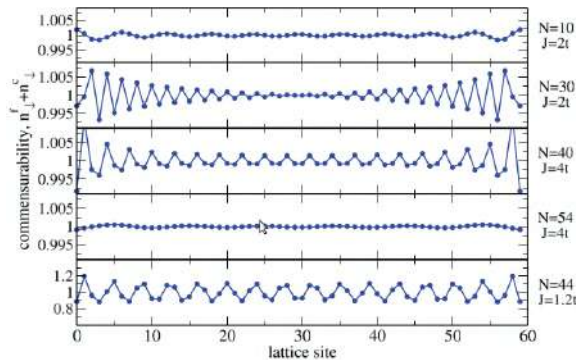


Figura 3. Local commensurability profile along the lattice for a 1D Kondo lattice model. A lattice with 60 sites was considered and each panel shows the evolution of the local commensurability for a specific ferromagnetic state characterized by the parameters on the right. Lines are a guide for the eye. Reproduced from (Peters *et al.*, 2012).

Souza, 2012a, 2012b; Caro *et al.*, 2020; Silva-Valencia & Miranda, 2001; Silva-Valencia *et al.*, 2001).

We remark that a spin-selective insulator also emerges in the spin-asymmetric Hubbard model in a partially filled Lieb lattice with spin-dependent electron band dispersions, which could be relevant to the electronic states at the LaAlO₃/SrTiO₃ interface (Faúndez *et al.*, 2018).

Bose-Fermi mixtures

Studying a system composed of a mixture of carriers that obey the Bose-Einstein and Fermi-Dirac statistics was a utopia until the emergence and evolution of the ultracold atom field, which has allowed verifying and extending several ideas and concepts in physics in clean and fully controllable setups (Bloch *et al.*, 2008; Esslinger, 2010; Bloch *et al.*, 2012; Gross & Bloch, 2017). Mixing fermionic and bosonic isotopes of the same or different atoms, experimentalists have created unimaginable mixtures, controlling the number of each kind of carrier, the interspecies and intraspecies interactions (Truscott *et al.*, 2001; Schreck *et al.*, 2001; Hadzibabic *et al.*, 2002; Roati *et al.*, 2002; Ott *et al.*, 2004; Silber *et al.*, 2005; Günter *et al.*, 2006; Ospelkaus *et al.*, 2006; Zaccanti *et al.*, 2006; McNamara *et al.*, 2006; Best *et al.*, 2009; Fukuhara *et al.*, 2009; Deh *et al.*, 2010; Tey *et al.*, 2010; Sugawa *et al.*, 2011; Schuster *et al.*, 2012; Tung *et al.*, 2013; Ferrier-Barbut *et al.*, 2014; DeLahaye *et al.*, 2015; Vaidya *et al.*, 2015; Yao *et al.*, 2016; Onofrio, 2016; Wu *et al.*, 2017; Roy *et al.*, 2017; Schäfer *et al.*, 2018). As expected, new and exciting phenomena have emerged, such as a Bose-Fermi superfluid mixture (Trautmann *et al.*, 2018), phase separation (Lous *et al.*, 2018), and attractive interaction between bosons mediated by fermions (DeSalvo *et al.*, 2019).

The description of mixtures of bosons and fermions, taking into account the interactions, leads us to the Bose-Fermi-Hubbard model, for which there is some level of approximation, and it has been widely studied using analytical and/or numerical techniques (Albus *et al.*, 2003; Cazalilla & Ho, 2003; Lewenstein *et al.*, 2004; Mathey *et al.*, 2004; Roth & Burnett, 2004; Frahm & Palacios, 2005; Batchelor *et al.*, 2005; Takeuchi & Mori, 2005; Pollet *et al.*, 2006; Mathey & Wang, 2007; Sengupta *et al.*, 2007; Mering & Fleischhauer, 2008; Suzuki *et al.*, 2008; Lühmann *et al.*, 2008; Rizzi & Imambekov, 2008; Orth *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2009; Sinha & Sengupta, 2009; Orignac *et al.*, 2010; Polak & Kopeć, 2010; Mering & Fleischhauer, 2010; Anders *et al.*, 2012; Masaki & Mori,

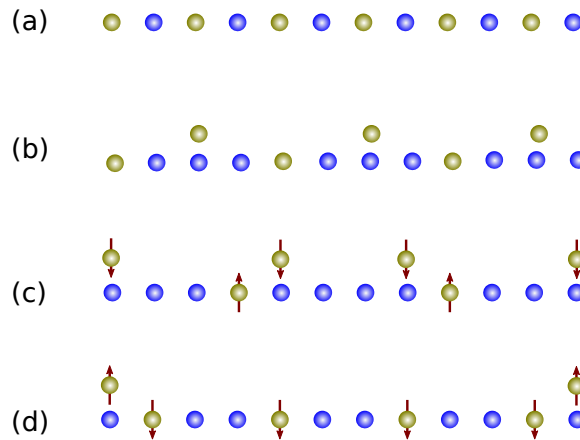


Figura 4. Sketches of possible distributions of fermions (golden) and bosons (blue) in a 12-sites lattice. (a) Mixed Mott insulator state, for which $\rho_F + \rho_B = 1$. (b) Mixed noncommensurate insulator for a balance mixture ($\rho_B + \frac{1}{2}\rho_F = 1$). (c) and (d) show insulators for an imbalanced mixture with $I = 1/3$. Adapted from (Guerrero-Suarez *et al.*, 2021).

2013; Bukov & Pollet, 2014; Ozawa *et al.*, 2014; Bilitewski & Pollet, 2015). Among the diverse ground states found, the mixed Mott insulator stands out and is characterized by the commensurability between the lattice size and the total number of carriers (bosons + fermions), which was predicted for a mixture of polarized bosons and fermions (Zujev *et al.*, 2008) and experimentally observed in a mixture of ytterbium atoms confined in a three-dimensional optical lattice (Sugawa *et al.*, 2011).

An intermediate approach for describing a Bose-Fermi mixture consists of taking into account the internal degrees of freedom of fermions and treating the bosons as scalars, whose Hamiltonian is given by

$$\hat{H}_{BF} = \hat{H}_F + \hat{H}_B + \hat{H}_I, \quad (3)$$

where \hat{H}_B , \hat{H}_F , and \hat{H}_I represent the contribution of bosons, fermions, and the interaction between fermions and bosons, respectively. Specifically, \hat{H}_F corresponds to the Fermi-Hubbard Hamiltonian, which is given by

$$\hat{H}_F = -t_F \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} \left(\hat{f}_{i\sigma}^\dagger \hat{f}_{j\sigma} + \text{H.c.} \right) + \frac{U_{FF}}{2} \sum_{i, \sigma \neq \sigma'} \hat{n}_{i,\sigma}^F \hat{n}_{i,\sigma'}^F. \quad (4)$$

Here, $\hat{f}_{i,\sigma}$ ($\hat{f}_{i,\sigma}^\dagger$) annihilates (creates) a fermion with spin $\sigma = \uparrow, \downarrow$ at the lattice site i , and $\hat{n}_{i,\sigma}^F = \hat{f}_{i,\sigma}^\dagger \hat{f}_{i,\sigma}$ is the local number operator for each kind of fermions, such that $\hat{n}_i^F = \hat{n}_{i,\uparrow}^F + \hat{n}_{i,\downarrow}^F$. The hopping parameter between nearest-neighbor sites ($\langle i, j \rangle$) for fermions is t_F , and U_{FF} quantifies the local fermion-fermion interaction. The global density for σ -fermions is defined as $\rho_F^\sigma = N_F^\sigma / L$, where N_F^σ is the number of fermions with spin σ . $\rho_F = \rho_F^\uparrow + \rho_F^\downarrow$ is the total fermionic density, which varies from zero to two, $\rho_F = 1$ being the half-filling configuration.

On the other hand, the Bose-Hubbard Hamiltonian \hat{H}_B corresponds to

$$\hat{H}_B = -t_B \sum_{\langle i,j \rangle} \left(\hat{b}_i^\dagger \hat{b}_j + \text{H.c.} \right) + \frac{U_{BB}}{2} \sum_i \hat{n}_i^B (\hat{n}_i^B - 1), \quad (5)$$

where the operator \hat{b}_i^\dagger (\hat{b}_i) creates (annihilates) a boson at the lattice site i , and $\hat{n}_i^B = \hat{b}_i^\dagger \hat{b}_i$ is the local number operator. The interaction between bosons is quantified for the parameter

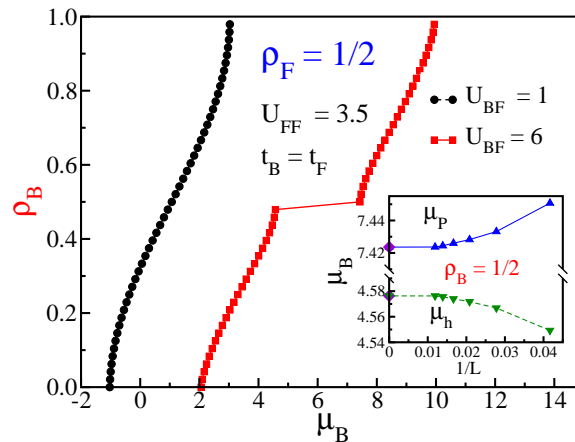


Figure 5. Evolution of the chemical potential μ_B with the bosonic density ρ_B , for a mixture with $\rho_F = 1$ (half-filling) and $U_{FF} = 3.5$. Two different values of the boson-fermion interaction $U_{BF} = 6$ (red) and $U_{BF} = 1$ (black) were considered. Inset: Chemical potential as a function of the inverse of the lattice size at the bosonic density $\rho_B = 1/2$. The diamonds determine a finite gap of $\Delta^B = 2.85$. The lines are visual guides. From (Avella *et al.*, 2019).

U_{BB} , while the hopping of the bosons is modulated by t_B . N_B is the number of bosonic atoms, and $\rho_B = N_B/L$ is the global density of bosons, which varies from zero to one.

Considering the above definitions, the interaction between two-color fermions and scalar bosons is described by

$$\hat{H}_I = U_{BF} \sum_{i=1}^L \hat{n}_i^B (\hat{n}_{i,\uparrow}^F + \hat{n}_{i,\downarrow}^F), \tag{6}$$

where U_{BF} is the boson-fermion interaction parameter.

A numerical study of Hamiltonian (3) requires fixing the energy scale ($t_F = t_B = 1$), and restricting the number of bosons per site, which is unbounded. It is common to consider the hard-core limit, which implies that each site can be occupied by at most one boson (which implies no interaction term in Eq. (5)), leading to the following local basis: $\frac{|F\rangle}{|B\rangle} =$

$$\frac{|0\rangle}{|0\rangle}, \frac{|\uparrow\rangle}{|0\rangle}, \frac{|\downarrow\rangle}{|0\rangle}, \frac{|\uparrow\downarrow\rangle}{|0\rangle}, \frac{|0\rangle}{|1\rangle}, \frac{|\uparrow\rangle}{|1\rangle}, \frac{|\downarrow\rangle}{|1\rangle}, \frac{|\uparrow\downarrow\rangle}{|1\rangle}.$$

Taking into account the above basis and using DMRG, we were able to explore the ground state of two-color fermions and scalar bosons in a one-dimensional lattice, for which we expected diverse configurations, as shown in Fig. 4. One possibility is the mixed Mott insulator, where the total number of carriers is commensurate with the lattice (Fig. 4 (a)), while the others drawn are yet to be established. Therefore, the ground-state energy $E(N_F^\uparrow, N_F^\downarrow, N_B)$, for N_B bosons, and N_F^\uparrow and N_F^\downarrow fermions is calculated for different sets of densities and parameters. Knowing how the system reacts to perturbations is crucial, which can be quantified by the bosonic chemical potential $\mu_B = E(N_F^\uparrow, N_F^\downarrow, N_B + 1) - E(N_F^\uparrow, N_F^\downarrow, N_B)$. In Fig. 5, we follow the evolution of the bosonic chemical potential at the thermodynamic limit as the number of bosons increases, considering fermionic density at half-filling ($\rho_F = 1$), fermion-fermion repulsion $U_{FF} = 3.5$, and two values for the boson-fermion coupling. Note that under the above parameters, there is no possible emergence of the mixed Mott insulator; hence any plateau in the curve implies a new insulator state to be characterized. A monotonous evolution of the bosonic chemical potential can be seen for $U_{BF} = 1$ (black dots), which implies that the bosonic excitations are for free. A different scenario happens for $U_{BF} = 6$ (red squares), where the continuous growth of the bosonic chemical potential is broken at

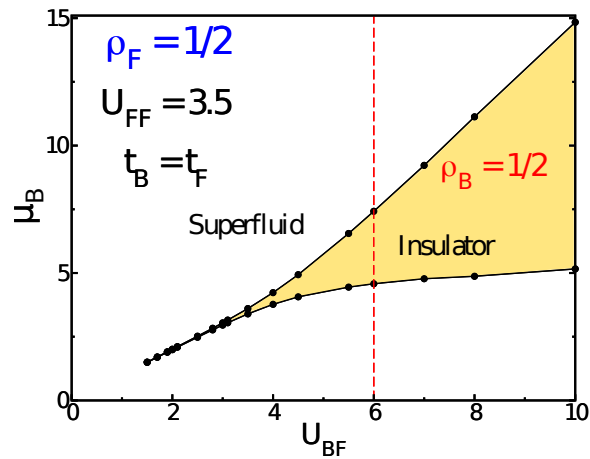


Figura 6. Bosonic chemical potential versus the boson-fermion repulsion at fermionic half-filling ($\rho_F = 1$) and fermion-fermion repulsion $U_{FF} = 3.5$. The yellow zone corresponds to an insulator phase for $\rho_B = 1/2$, while the white zone represents a superfluid. The vertical dashed line at $U_{BF} = 6$ corresponds to the curve in Fig. 5 (red squares). The lines are visual guides. Adapted from (Avella *et al.*, 2019).

the bosonic density $\rho_B = 1/2$, indicating the emergence of a finite gap to generate bosonic excitations, as can be seen in the inset. The plateau in Fig. 5 establishes a new kind of insulator state for Bose-Fermi mixtures, because the total number of particles is not commensurate with the lattice and the emergence of this insulator depends on interactions (Avella *et al.*, 2019). We found that this new noncommensurate insulator fulfills the condition $\rho_B + \frac{1}{2}\rho_F = 1$, and a possible distribution of carriers was sketched in Fig. 4 (b).

The progress of the noncommensurate insulator as a function of the boson-fermion coupling is depicted in Fig. 6 for a fixed fermion-fermion repulsion $U_{FF} = 3.5$ and a fermionic density $\rho_F = 1$. The insulator state (yellow area) is surrounded by the superfluid phase, and there is a critical value from which the insulator emerges and corresponds to $U_{BF}^* \approx 1.50$. This picture is similar for other values of the fermion-fermion repulsion, although the critical values change.

The interplay between fermions with internal degrees of freedom and scalar bosons led to a new insulator state characterized by the condition $\rho_B + \frac{1}{2}\rho_F = 1$, but this was for a balanced mixture, i.e. $\rho_F^\uparrow = \rho_F^\downarrow = \frac{1}{2}\rho_F$; therefore, we can surmise that this new insulator involves a commensurability relation between the bosons and one kind of fermion, but what happens to the other kind of fermions? To unveil this scenario, we need to get out of the balanced condition and consider a mixture where $\rho_F^\uparrow \neq \rho_F^\downarrow$.

Experimentalists in the cold-atom area can generate asymmetries in the spin populations (Zwierlein *et al.*, 2006; Partridge *et al.*, 2006; Liao *et al.*, 2010; Kinnunen *et al.*, 2018; Dobrzyniecki & Sowiński, 2020), making such systems ideal for searching for the elusive unconventional pairing mechanism suggested by Fulde, Ferrell, Larkin, and Ovchinnikov (FFLO) (Fulde & Ferrell, 1964; Larkin & Ovchinnikov, 1964). In a recent study, it was shown that the visibility of the FFLO state is enhanced as the interparticle strength grows in a Bose-Fermi mixture (Singh & Orso, 2020).

In Fig. 7, we show the thermodynamic limit value for the bosonic chemical as the number of bosons increases from zero for a mixture with a quarter fermionic density ($\rho_F = 1/2$), a repulsive fermionic interaction $U_{FF} = 6$, and a boson-fermion coupling $U_{BF} = 10$. The black dots correspond to a spin-balanced mixture, for which $\rho_F^\uparrow = \rho_F^\downarrow = \frac{1}{2}\rho_F$, and we observed

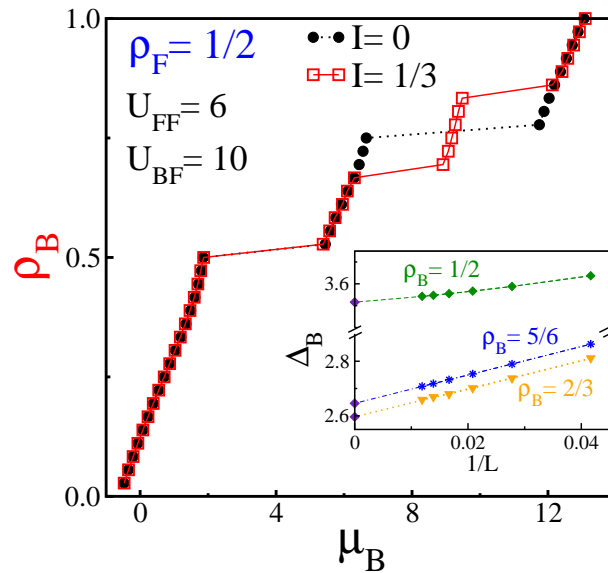


Figura 7. Bosonic density ρ_B versus the bosonic chemical potential μ_B (thermodynamic limit) for a mixture with a quarter fermionic filling ($\rho_F = 1/2$), fermion-fermion repulsion $U_{FF} = 6$ and inter-particle interaction $U_{BF} = 10$. A balanced $I = 0$ (black dots) and an imbalanced mixture $I = 1/3$ (red squares) were considered. Inset: Progress of the charge gap associated with the plateau as a function of the inverse of the lattice size, showing that it is nonzero at the thermodynamic limit. The lines are visual guides. Adapted from (Guerrero-Suarez *et al.*, 2021).

that the chemical potential grows monotonously for almost all densities, which indicates that there is no cost to generating excitations. However, at the bosonic densities $\rho_B = 1/2$ and $\rho_B = 3/4$, the chemical potential jumps, generating a plateau in the curve, which is associated with a rise of insulating states. The nature of the insulator state at $\rho_B = 1/2$ is obvious, because the total number of carriers will be commensurate with the lattice size, and this state corresponds to the mixed Mott insulator, for which $\rho_B + \rho_F = 1$, and we emphasize that in a mixture with spinor fermions the mixed Mott insulator also emerges. The previously-found noncommensurate insulator also arises in this case, at the bosonic density $\rho_B = 3/4$, and we corroborate that $\rho_B + \frac{1}{2}\rho_F = 1$.

To explore a spin-imbalanced mixture, we quantify the difference between the spin populations through $I = (N_F^\downarrow - N_F^\uparrow)/(N_F^\uparrow + N_F^\downarrow)$, and depict the case $I = 1/3$ (red squares) in Fig. 7. We observed that the imbalanced curve matches the balanced one over almost the entire range, indicating that the mixed Mott insulator will emerge regardless of the spin imbalance considered, which is an expected result. However, the main difference between the curves is the disappearance of the insulating state at $\rho_B = 3/4$ and the emergence of two new plateaus, which are separated by a superfluid state. The new plateaus are located at the bosonic densities $\rho_B = 2/3$ and $\rho_B = 5/6$, i.e. one below and one above the noncommensurate insulator of the balanced mixture. We show in the inset of Fig. 7 that there is a finite gap ($\Delta_B = E(N_F^\uparrow, N_F^\downarrow, N_B + 1) + E(N_F^\uparrow, N_F^\downarrow, N_B - 1) - 2E(N_F^\uparrow, N_F^\downarrow, N_B)$) at the thermodynamic for the plateaus, located at $\rho_B = 1/2$, $\rho_B = 2/3$ and $\rho_B = 5/6$, indicating insulator states for these densities. Note that the charge gaps for the plateaus at $\rho_B = 2/3$ and $\rho_B = 5/6$ are different, which establishes the first difference between these new insulating states (Guerrero-Suarez *et al.*, 2021).

Replicating the imbalanced curve of Fig. 7 for other values of U_{BF} , we obtained three insu-

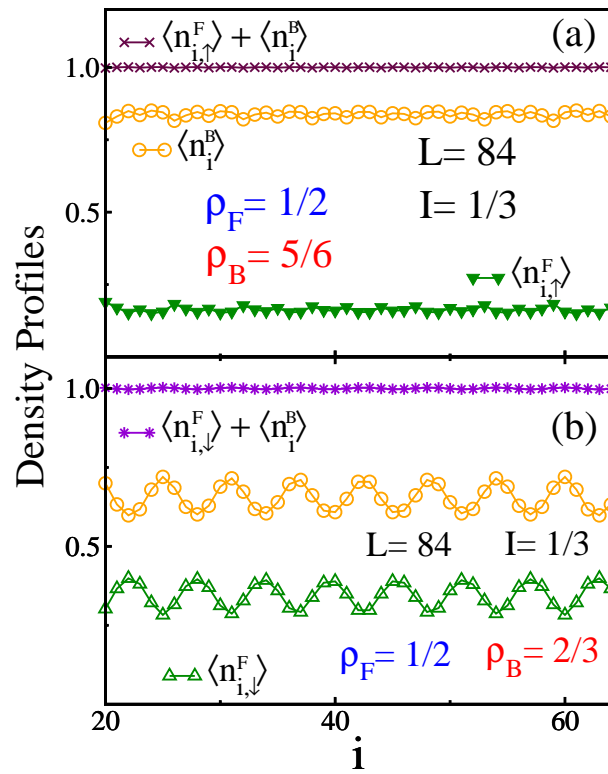


Figure 8. Density profiles of fermions and bosons in a mixture with a quarter fermionic filling ($\rho_F = 1/2$) and imbalance parameter $I = 1/3$, for which a spin-selective insulator emerges at $\rho_B = 5/6$ (a) and $\rho_B = 2/3$ (b). The lattice size is $L = 84$, the fermion-fermion repulsion is $U_{FF} = 6$, and the inter-species interaction is $U_{BF} = 10$. The lines are visual guides. Reproduced from (Guerrero-Suarez *et al.*, 2021).

lating lobes surrounded by a superfluid phase, which emerges from different critical values, depending on the fermion-fermion repulsion, the widths of these lobes increasing further as the boson-fermion coupling grows, similar to what was found in Fig. 6.

A mixture of two-color fermions and scalar bosons exhibits two insulator states that satisfy $\rho_B + \rho_F = 1$ and $\rho_B + \frac{1}{2}\rho_F = 1$; however, when considering a spin population imbalance, the noncommensurate insulator disappears, giving way to two new insulating states, located at $\rho_B = 2/3$ and $\rho_B = 5/6$ for $\rho_F = 1/2$ and $I = 1/3$. The new insulator states are located between the mixed Mott insulator and the trivial one (full lattice), which suggests the relation $\rho_B + \frac{1}{2}\rho_F(1 \pm I) = 1$, for locating the new insulators for any fermionic density and imbalanced parameter. Although we found a general relation to locate the new insulators, its physical origin is unclear. To gain more information, we explore the distribution of carriers at these insulators for a finite lattice (Fig. 8). Considering a lattice with $L = 84$ sites, a quarter fermionic density, and a spin population imbalance of $I = 1/3$, we display the density profiles of the spin-up fermions and bosons along the lattice for the insulator state with $\rho_B = 5/6$ (Fig. 8(a)). We observe that the expectation value of the local number of both bosons and fermions with spin up slightly oscillates around the values $\langle \hat{n}_i^B \rangle \approx 0.833$ and $\langle \hat{n}_{i,\uparrow}^F \rangle \approx 0.166$, respectively. These curious values lead us to consider the profile of $\langle \hat{n}_{i,\uparrow}^F \rangle + \langle \hat{n}_i^B \rangle$ along the lattice, obtaining one at each site, which suggests a commensurability relation between the bosons and the spin-up fermions. As expected, the local number

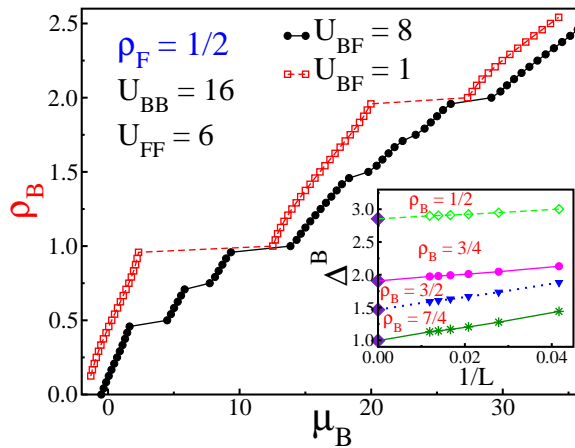


Figura 9. Progress of the bosonic chemical potential (μ_B) as a function of the bosonic density (ρ_B) for a mixture with a fixed fermionic density of $\rho_F = 1/2$ and two values of boson-fermion coupling. Here the boson-boson and fermion-fermion interactions are $U_{BB} = 16$ and $U_{FF} = 6$, respectively. In the inset, we show that the width of the non-trivial plateaus is finite at the thermodynamic limit. The lines are visual guides. Adapted from (Avella *et al.*, 2020).

of fermions with spin down varies around $\langle \hat{n}_{i,\downarrow}^F \rangle \approx 0.333$ (not shown), and remains in a gapless state, i.e., fixing bosonic density at $\rho_B = 5/6$ and $\rho_F^\uparrow = 1/6$, there is no energy cost to adding spin-down fermions around the density $\rho_F^\downarrow = 1/3$. In Fig. 8(b), we show the distribution of the carriers at the insulator state with $\rho_B = 2/3$, where a charge density wave is established for each carrier, marking a new difference from the other insulator. We see that the expectation value of spin-down fermions and bosons oscillates off phase and adjusts to meet local commensurability $\langle \hat{n}_{i,\downarrow}^F \rangle + \langle \hat{n}_i^B \rangle = 1$, while the spin-up fermions remain in a gapless state (Guerrero-Suarez *et al.*, 2021).

The above discussion suggests that the new insulator state involves a commensurability relation between the bosons and one kind of fermions, while the other remains in a gapless state. These spin-selective insulators must satisfy the relation $\rho_B + \rho_F^{\uparrow,(\downarrow)} = 1$, which is compatible with the relation $\rho_B + \frac{1}{2}\rho_F(1 \pm I) = 1$ found previously. We conclude that a mixture of two-color repulsive fermions and scalar bosons at the hard-core limit exhibits a mixed Mott insulator and two spin-selective insulators that fulfill the commensurability relations $\rho_B + \rho_F^{\uparrow,(\downarrow)} = 1$, in a gapless fermion polarized background.

The next question to be resolved is whether spin-selective states emerge if we relax the hard-core condition. It is well-known that the local number of bosons goes from zero to infinity, which forces us to perform a cutoff of the local number of bosons allowed. In our soft-core approximation, we restrict the number of bosons per site to a maximum of $\hat{n}_{max} = 3$, which leads us to a large but tractable local Hilbert space of dimension $d = 16$, allowing our results to remain unaffected if we increment \hat{n}_{max} (Pai *et al.*, 1996; Rossini & Fazio, 2012). Now the interaction term between the bosons will be relevant, and we expect that without the boson-fermion coupling ($U_{BF} = 0$), only the well-known Mott insulators (trivial) of each species will appear. In Fig. 9, we display the progress of the bosonic chemical potential at the thermodynamic limit as the number of bosons increases from zero for a mixture with a quarter fermionic filling ($\rho_F = 1/2$) and repulsion between bosons and fermions of $U_{BB} = 16$ and $U_{FF} = 6$, respectively. Two values of the boson-fermion interaction $U_{BF} = 1$ (open red squares) and $U_{BF} = 8$ (closed black dots) were considered,

obtaining that $U_{BF} = 1$ is a weak coupling between fermions and bosons because the chemical potential evolves continuously, undergoing jumps only at integer bosonic densities, which correspond to bosonic Mott insulators, an expected result in the absence of coupling between fermions and bosons. Comparing Fig. 9 with figures 5 and 7 for the hard-core approximation, it is clear that relaxing this condition leads to the emergence of trivial plateaus for larger integer values of the bosonic density.

As discussed throughout the paper, increasing the boson-fermion coupling will allow unearthing new discoveries, as can be seen in the closed black dot curve. Clearly, the trivial bosonic Mott insulators survive, but their width is strongly reduced; however, the most important thing is the emergence of two plateaus between trivial Mott insulator ones, which are due to the boson-fermion interaction and are located at the bosonic densities $\rho_B = 1/2, 3/4, 3/2$, and $7/4$. These non-trivial plateaus found for larger boson-fermion repulsion have a finite charge gap (Δ_B) at the thermodynamic limit, as can be seen in the inset, indicating insulator states. Now, we have to classify these states, and we quickly observe that the plateaus located at $\rho_B = 1/2$ and $\rho_B = 3/2$ correspond to mixed Mott insulators, since they fulfill the relation $\rho_B + \rho_F = n$, where n is an integer, namely $n = 1$ and 2 for the plateaus at $\rho_B = 1/2$ and $3/2$, respectively. Here, we considered a balanced mixture for which $\rho_F^\uparrow = \rho_F^\downarrow = \frac{1}{4}$, and taking into account that the other two non-trivial plateaus are located at $\rho_B = 3/4$ and $\rho_B = 7/4$, we conclude that the latter insulators are spin-selective ones that satisfy the commensurability relations $\rho_B + \rho_F^{\uparrow,(\downarrow)} = n$ ($n = 1, 2$), in a gapless fermion polarized background. Therefore, relaxing the hard-core approximation leads us to the emergence of one mixed Mott insulator and one spin-selective one between the trivial Mott insulators in a mixture of two-color fermions and scalar bosons (Avella *et al.*, 2020).

It is important to point out that state-of-the-art cold-atom setups allow creating mixtures of two-color fermions and scalar bosons. For instance, mixtures with isotopes ^{171}Yb and ^{174}Yb (^{170}Yb) have been tested (Takasu & Takahashi, 2009), and dual Bose-Einstein condensates of paired fermions and bosons with ^6Li and ^7Li have been achieved experimentally (Ikemachi *et al.*, 2017). This suggests that the search for the spin-selective insulators reviewed here is an intriguing challenge that can be addressed by experimentalists.

Other possible scenarios

Spin-selective insulators emerged initially in the Kondo lattice model, where two kinds of electrons interact, and then were found in mixtures of two-color fermions and scalar bosons; however, we believe that these peculiar insulators can arise in other scenarios, which we suggest below.

Periodic Anderson model

The standard model for studying the physics of heavy fermion materials is the periodic Anderson model (PAM), whose Hamiltonian is given by

$$\begin{aligned} \mathcal{H} = & - t \sum_{i,\sigma} \left(\hat{c}_{i\sigma}^\dagger \hat{c}_{i+1\sigma} + \hat{c}_{i+1\sigma}^\dagger \hat{c}_{i\sigma} \right) + E_f \sum_{i\sigma} \hat{n}_{i\sigma}^f \\ & + V \sum_{i,\sigma} \left(\hat{c}_{i\sigma}^\dagger \hat{f}_{i\sigma} + \hat{f}_{i\sigma}^\dagger \hat{c}_{i\sigma} \right) + U_f \sum_i \hat{n}_{i\uparrow}^f \hat{n}_{i\downarrow}^f, \end{aligned} \quad (7)$$

where $\hat{c}_{i\sigma}^\dagger$ ($\hat{f}_{i\sigma}^\dagger$) creates an electron in the conduction (localized) band at site i with spin $\sigma = \uparrow, \downarrow$. The local number operator with spin σ for the localized electrons is $\hat{n}_{i\sigma}^f = \hat{f}_{i\sigma}^\dagger \hat{f}_{i\sigma}$. The Coulomb repulsion between two localized electrons at the same site is quantified by U , t is the nearest-neighbor hopping integral, and V is the hybridization between the conduction

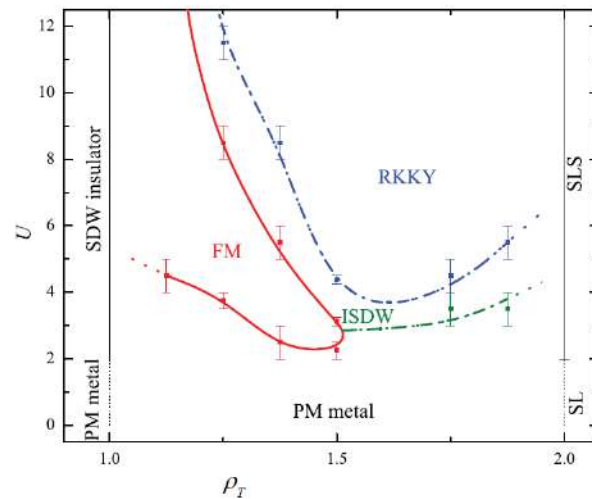


Figura 10. Phase diagram for the periodic Anderson model considering electron densities between a quarter and half-filling. The hybridization parameter is fixed at $V/t = 0.75$. The main phases shown in this diagram are: spin-density-wave (SDW), incommensurate spin-density-wave (ISDW), paramagnetic (PM), ferromagnetic (FM), and RKKY phase that consists of a SDW with momentum determined by the Fermi momentum of the conduction electrons. Also, we see a spin liquid (SL) and a spin liquid with strong antiferromagnetic fluctuations (SLS). Taken from (Bertussi *et al.*, 2011).

and the localized bands. Finally, $E_f = -U/2$ is the energy displacement of the localized band, which take this value in the symmetric case.

Since its appearance, this Hamiltonian (7) has been widely studied, using various analytical and numerical techniques; however, we still know little about it: for example, not even in one dimension do we know a complete phase diagram. For the specific case of $V/t = 3/4$, Bertussi *et al.* built the phase diagram shown in Fig. 10, where they considered electronic densities between $\rho_T = \rho_{F,c} + \rho_{F,f} = 1$ (quarter filling) and $\rho_T = 2$ (half filling) (Bertussi *et al.*, 2011). A metal-insulator transition from a paramagnetic metal to an insulator with an f -band spin-density wave was found at quarter filling, whereas at half-filling the ground state is always an insulating spin liquid. Between a quarter and half-filling the ground state is always metallic, exhibiting a very rich magnetic behavior; for instance, we found ferromagnetic, paramagnetic, RKKY, and incommensurate spin density wave (ISDW) regions.

Remembering that the ferromagnetic phase of the Kondo lattice model exhibits peculiar properties, such as that the minority conduction electrons form an insulating state, while the majority conduction electrons form a metallic state, which characterizes the spin-selective insulators, we expect that these insulators also emerge in the ferromagnetic phase of the periodic Anderson model.

The “ g - e ” model

The possibility of studying the interplay of charge and spin degrees of freedom in clean and fully controllable setups leads to considering the special features of alkaline-earth-like atoms (Yb and Sr) to confine them in traps (Honerkamp & Hofstetter, 2004; Cazalilla & Rey, 2014; Capponi *et al.*, 2016). Because these atoms can be confined in two different optical lattices, the description is given in terms of the two-orbital $SU(N)$ -symmetric Hubbard model, more commonly called the “ g - e ” model (Gorshkov *et al.*, 2010; Nonne *et al.*, 2011; Bois *et al.*, 2015). This model has allowed extending and revising other models, such as the Kugel-Khomskii model, the Kondo lattice model, and the periodic Anderson model,

as well as the discovery of several characteristics of the “*g-e*” model with $N > 2$. It has been shown that the high $SU(N)$ symmetry can lead to the emergence of exotic properties in quantum magnetism and pairing superfluidity and to the realization of symmetry-protected topological phase transitions (**Capponi et al.**, 2016; **Nakagawa & Kawakami**, 2017).

Alkaline-earth-like atoms have a long-lived metastable excited state 3P_0 ($|e\rangle$) coupled to the ground state 1S_0 ($|g\rangle$) via an ultranarrow doubly-forbidden transition, and at low temperatures, the spin-changing collisions are prohibited; hence four different scattering lengths for the states $|ee\rangle, |gg\rangle$, and $\frac{1}{\sqrt{2}}(|ge\rangle \pm |eg\rangle)$ arise. The description of these atoms confined in optical lattices can be done in terms of the following Hamiltonian (**Gorshkov et al.**, 2010):

$$\begin{aligned} \mathcal{H} = & - \sum_{m=g,e} t_m \sum_{i,\alpha} \left(\hat{c}_{m\alpha,i}^\dagger \hat{c}_{m\alpha,i+1} + \text{H.c.} \right) \\ & + \frac{U}{2} \sum_{m=g,e} \sum_i \hat{n}_{m,i} (\hat{n}_{m,i} - 1) + V \sum_i \hat{n}_{g,i} \hat{n}_{e,i} \\ & + V_{ex}^{g-e} \sum_{i,\alpha,\beta} \hat{c}_{g\alpha,i}^\dagger \hat{c}_{e\beta,i}^\dagger \hat{c}_{g\beta,i} \hat{c}_{e\alpha,i}, \end{aligned} \quad (8)$$

where, i varies along the sites of a one-dimensional lattice of size L , $\hat{c}_{m\alpha,i}^\dagger$ creates an atom at site i with orbital index $m = g, e$ and nuclear spin index $\alpha = \uparrow, \downarrow$. The local density operator for each species is $\hat{n}_{m,i} = \sum_{\alpha=\uparrow,\downarrow} \hat{c}_{m\alpha,i}^\dagger \hat{c}_{m\alpha,i}$. The strength parameters U and V quantify the local intra- and inter-species interactions, respectively, while V_{ex}^{g-e} measures the hybridization between the optical lattices. The hopping parameter for each species is t_m .

Analytical and numerical studies have shown a rich phase diagram at half-filling, where the spin Peierls, charge density wave, orbital density wave, and rung singlet phases predominate in the phase diagram for positive and negative hybridization between the lattices (**Nonne et al.**, 2011; **Bois et al.**, 2015). We believe that under an adequate set of parameters, the “*g-e*” model will exhibit the spin-selective insulators reviewed here.

Mixtures of spinor bosons and scalar fermions

At the heart of some spectacular phenomena in physics are the mediated interactions; for instance, conventional superconductivity is due to the fact that electrons can form Cooper pairs by interacting via phonons. Also, electrons act as mediators for interactions between magnetic impurities, leading to RKKY interaction, which is fundamental for the heavy fermion materials. A few years ago, attractive boson–boson interactions mediated by fermions were reported, which are expected to form new magnetic phases and super-solids (**DeSalvo et al.**, 2019; **Edri et al.**, 2020).

Another way to study Bose-Fermi mixtures is to consider spinor bosons and scalar fermions, which have been little studied so far. Recently, it was found that spin-dependent fermion-mediated interactions dramatically modify the properties of binary Bose-Einstein condensates (**Liao**, 2020). A mixture of spinor bosons and scalar fermions can be described by the following Hamiltonian:

$$\begin{aligned} \mathcal{H} = & - t_B \sum_{i,\sigma} \left(\hat{b}_{i\sigma}^\dagger \hat{b}_{i+1\sigma} + \text{H.c.} \right) + \frac{U_0^{BB}}{2} \sum_i \hat{n}_i^B (\hat{n}_i^B - 1) \\ & + \frac{U_2^{BB}}{2} \sum_{i,\sigma} \left(\hat{b}_{i\downarrow}^\dagger \hat{b}_{i\downarrow}^\dagger \hat{b}_{i\uparrow} \hat{b}_{i\uparrow} + \hat{b}_{i\uparrow}^\dagger \hat{b}_{i\uparrow}^\dagger \hat{b}_{i\downarrow} \hat{b}_{i\downarrow} \right) \\ & + (U_0^{BB} + U_2^{BB}) \sum_i \hat{n}_{i\uparrow}^B \hat{n}_{i\downarrow}^B - t_F \sum_i \left(\hat{f}_i^\dagger \hat{f}_{i+1} + \text{H.c.} \right) \\ & + U_{BF} \sum_{i=1}^L \hat{n}_i^F (\hat{n}_{i,\uparrow}^B + \hat{n}_{i,\downarrow}^B), \end{aligned} \quad (9)$$

where $\hat{b}_{i,\sigma}$ ($\hat{b}_{i,\sigma}^\dagger$) annihilates (creates) a boson with spin $\sigma = \uparrow, \downarrow$ at the lattice site i , and $\hat{n}_{i,\sigma}^B = \hat{b}_{i,\sigma}^\dagger \hat{b}_{i,\sigma}$ is the local number operator for each kind of bosons, such that $\hat{n}_i^B = \hat{n}_{i,\uparrow}^B + \hat{n}_{i,\downarrow}^B$. The operator \hat{f}_i^\dagger (\hat{f}_i) creates (annihilates) a fermion at the lattice site i , and $\hat{n}_i^F = \hat{f}_i^\dagger \hat{f}_i$ is the local number operator for fermions. The boson-fermion interaction is quantified for the parameter U_{BF} , the hopping of bosons (fermions) is modulated by t_B (t_F), and U_0^{BB} quantifies the spin-independent contact repulsion, while U_2^{BB} is the spin-dependent interaction coupling (de Forges de Parny *et al.*, 2010).

Exploring the Hamiltonian (9) will allow us to determine the dependence of the spin-selective insulators with the Pauli exclusion principle as well as effective mediated interactions and possible new ground states.

Conclusions

This paper presents some scenarios where particular spin-selective insulators arise, which appear in systems composed of two different kinds of carriers, one of them being fermions with two internal degrees of freedom, while the other could be localized spins or scalar bosons. Spin-selective insulators have a finite charge gap, and one kind of fermions remains in an insulator state, while the other one is in a gapless state.

The physical properties of heavy fermion materials involve electrons from two different bands, and the simplest model for describing some of them is the Kondo lattice model, which exhibits a rich phase diagram with Kondo insulator, spiral, ferromagnetic, and island phases. Namely, for the ferromagnetic phase it was found that the cooperation between a partial Kondo screening and ferromagnetism leads to a spin-selective insulator where the majority-spin conduction electrons are in a metallic state while the minority-spin ones remain in an insulator state, fulfilling the commensurability relation $\rho_{F,c}^\downarrow + \rho_{F,f}^\downarrow = 1$.

In a balanced mixture of two-color fermions and scalar bosons, two non-magnetic insulators surrounded by superfluids arise. The repulsive character of the interactions causes one of insulators to be a mixed Mott insulator, where the sum of the number of bosons and fermions are commensurate with the lattice, satisfying the relation $\rho_B + \rho_F = n$, where n is an integer. The other insulator corresponds to the spin-selective one, for which the total magnetization is zero and it satisfies the commensurability relation $\rho_B + \rho_F^\uparrow = \rho_B + \rho_F^\downarrow = n$, in a gapless fermion polarized background. Note that between trivial Mott insulators of the mixture, one mixed Mott insulator and one spin-selective insulator always appear.

If a spin population imbalance is generated in a mixture of two-color fermions and scalar bosons $\rho_F^\uparrow \neq \rho_F^\downarrow$, the mixed Mott insulator remains unaltered; however, the non-magnetic spin-selective insulator splits into two ferromagnetic spin-selective insulators that fulfill the relations $\rho_B + \rho_F^\uparrow = n$ and $\rho_B + \rho_F^\downarrow = n$.

Finally, we suggest new scenarios where the spin-selective insulator could arise, such as the periodic Anderson model, the “ g - e ” model, and a mixture of spinor bosons and scalar fermions.

We hope that this contribution may stimulate more investigation of these insulators and the search for them in diverse experimental setups.

Acknowledgments

J. Silva-Valencia acknowledges the support of the DIEB- Universidad Nacional de Colombia (Grant No. 51116), and expresses thanks to J. J. Mendoza-Arenas, R. Avella, R. Guerrero-Suarez, and R. Franco.

Authors contribution

The conception, writing and approach of this review correspond to the author of this contribution.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

References

- Albus, A., Illuminate, F., Eisert, J.** (2003). Mixtures of bosonic and fermionic atoms in optical lattices. *Physical Review A*, 68(2), 023606. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.68.023606>
- Anders, P., Werner, P., Troyer, M., Sigrist, M., Pollet, L.** (2012). From the cooper problem to canted supersolids in Bose-Fermi mixtures. *Physical Review Letters*, 109(20), 206401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.206401>
- Anisimov, V., Nekrasov, I., Kondakov, D., Rice, T., Sigrist, M.** (2002). Orbital-selective Mott-insulator transition in Ca_{2-x}Sr_xRuO₄. *The European Physical Journal B*, 25(2), 191. <https://doi.org/10.1140/epjb/e20020021>
- Avella, R., Mendoza-Arenas, J. J., Franco, R., Silva-Valencia, J.** (2019). Insulator phases of a mixture of spinor fermions and hard-core bosons. *Physical Review A*, 100(6), 063620. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.063620>
- Avella, R., Mendoza-Arenas, J. J., Franco, R., Silva-Valencia, J.** (2020). Mixture of scalar bosons and two-color fermions in one dimension: Superfluid-insulator transitions. *Physical Review A*, 102(3), 033341. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.033341>
- Basylko, S. A., Lundow, P. H., Rosengren, A.** (2008). One-dimensional Kondo lattice model studied through numerical diagonalization. *Physical Review B*, 77(7), 073103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.073103>
- Batchelor, M. T., Bortz, M., Guan, X. W., Oelkers, N.** (2005). Exact results for the one-dimensional mixed boson-fermion interacting gas. *Physical Review A*, 72(6), 061603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.72.061603>
- Bazzanella, M., Nilsson, J.** (2014). Ferromagnetism in the one-dimensional Kondo lattice: Mean-field approach via majorana fermion canonical transformation. *Physical Review B*, 89(3), 035121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.035121>
- Bertussi, P. R., Neto, M. B. S., Rappoport, T. G., Malvezzi, A. L., dos Santos, R. R.** (2011). Incommensurate spin-density-wave and metal-insulator transition 17 in the one-dimensional periodic Anderson model. *Physical Review B*, 84(7), 075156. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.075156>
- Best, T., Will, S., Schneider, U., Hackermüller, L., van Oosten, D., Bloch, I., Lühmann, D.-S.** (2009). Role of interactions in 87Rb-40K Bose-Fermi mixtures in a 3d optical lattice. *Physical Review Letters*, 102(3), 030408. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.030408>
- Bilitewski, T., Pollet, L.** (2015). Exotic superconductivity through bosons in a dynamical cluster approximation. *Physical Review B*, 92(18), 184505. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.184505>
- Bloch, I., Dalibard, J., Nascimbéne, S.** (2012). Quantum simulations with ultracold quantum gases. *Nat. Phys.*, 8(4), 267. <https://doi.org/10.1038/nphys2259>
- Bloch, I., Dalibard, J., Zwirger, W.** (2008). Many-body physics with ultracold gases. *Review of Modern Physics*, 80(3), 885. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.80.885>
- Bois, V., Capponi, S., Lecheminant, P., Moliner, M., Totsuka, K.** (2015). Phase diagrams of one-dimensional half-filled two-orbital SU(n) cold fermion systems. *Physical Review B*, 91(7), 075121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.075121>
- Bukov, M., Pollet, L.** (2014). Mean-field phase diagram of the Bose-Fermi Hubbard model. *Physical Review B*, 89(9), 094502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.094502>
- Capponi, S., Lecheminant, P., Totsuka, K.** (2016). Phases of one-dimensional SU(n) cold atomic Fermi gases—from molecular Luttinger liquids to topological phases. *Annals of Physics*, 367, 50. <https://doi.org/10.1016/j.aop.2016.01.011>
- Caprara, S., Rosengren, A.** (1997). Ground-state magnetic properties of the Kondo lattice model at low electron densities. *Europhysics Letters*, 39(1), 55. <https://doi.org/10.1209/epl/i1997-00313-4>

- Caro, R. C., Franco, R., Figueira, M. S., Silva-Valencia, J., Avignon, M.** (2020). Weak coupling magnetism of the ionic Kondo lattice model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 497, 165936. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165936>
- Cazalilla, M., Ho, A.** (2003). Instabilities in binary mixtures of one-dimensional quantum degenerate gases. *Physical Review Letters*, 91(15), 150403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.150403>
- Cazalilla, M. A., Citro, R., Giamarchi, T., Orignac, E., Rigol, M.** (2011). One dimensional bosons: From condensed matter systems to ultracold gases. *Review of Modern Physics*, 83(4), 1405. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.1405>
- Cazalilla, M. A., Rey, A. M.** (2014). Ultracold fermi gases with emergent SU(n) symmetry. *Reports on Progress in Physics*, 77(12), 124401. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/77/12/124401>
- Cheng, K., Wang, L., Xu, Y., Yang, F., Zhu, H., Ke, J., Lu, X., Xia, Z., Wang, J., Shi, Y., Yang, Y., Luo, Y.** (2019). Realization of Kondo chain in CeCo2Ga8. *Physical Review Materials*, 3(2), 021402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.021402>
- de Forges de Parny, L., Traynard, M., Herbert, F., Rousseau, V. G., Scalettar, R. T., Batrouni, G. G.** (2010). Phase diagram of spin-12 bosons in a one-dimensional optical lattice. *Physical Review A*, 82(6), 063602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.063602>
- Deh, B., Gunton, W., Klappauf, B. G., Li, Z., Semczuk, M., Dongen, J. V., Madison, K. W.** (2010). Giant feshbach resonances in 6Li-85Rb mixtures. *Physical Review A*, 82(2), 020701(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.020701>
- DeLahaye, M., Laurent, S., Ferrier-Barbut, I., Jin, S., Chevy, F., Salomon, C.** (2015). Critical velocity and dissipation of an ultracold Bose-Fermi counterflow. *Physical Review Letters*, 115(26), 265303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.265303>
- DeSalvo, B. J., Patel, K., Cai, G., Chin, C.** (2019). Observation of fermion-mediated interactions between bosonic atoms. *Nature*, 568(7750), 61. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1055-0>
- Dobrzyniecki, J., Sowiński, T.** (2020). Simulating artificial 1d physics with ultra-cold fermionic atoms: Three exemplary themes. *Advanced Quantum Technologies*, 3(6), 2000010.18 <https://doi.org/10.1002/qute.202000010>
- Edri, H., Raz, B., Matzliah, N., Davidson, N., Ozeri, R.** (2020). Observation of spin-spin fermion-mediated interactions between ultracold bosons. *Physical Review Letters*, 124(16), 163401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.163401>
- Esslinger, T.** (2010). Fermi-Hubbard physics with atoms in an optical lattice. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 1(1), 129. <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-070909-104059>
- Faúndez, J., Jorge, T. N., Craco, L.** (2018). Spin-selective electronic reconstruction in quantum ferromagnets: A view from the spin-asymmetric Hubbard model. *Physical Review B*, 97(11), 115149. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.115149>
- Ferrier-Barbut, I., DeLahaye, M., Laurent, S., Grier, A. T., Pierce, M., Rem, B. S., Chevy, F., Salomon, C.** (2014). A mixture of Bose and Fermi superfluids. *Science*, 345(6200), 1035. <https://doi.org/10.1126/science.1255380>
- Frahm, H., Palacios, G.** (2005). Correlation functions of one-dimensional Bose-Fermi mixtures. *Physical Review A*, 72(6), 061604. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.72.061604>
- Fukuhara, T., Sugawa, S., Takasu, Y., Takahashi, Y.** (2009). All-optical formation of quantum degenerate mixtures. *Physical Review A*, 79(2), 021601(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.021601>
- Fulde, P., Ferrell, R. A.** (1964). Superconductivity in a strong spin-exchange field. *Physical Review*, 135(3A), A550. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.135.A550>
- Garcia, D. J., Hallberg, K., Alascio, B., Avignon, M.** (2004). Spin order in one-dimensional Kondo and Hund lattices. *Physical Review Letters*, 93(17), 177204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.177204>
- Garcia, D. J., Hallberg, K., Batista, C. D., Avignon, M., Alascio, B.** (2000). New type of charge and magnetic order in the ferromagnetic Kondo lattice. *Physical Review Letters*, 65(17), 3720. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3720>
- Garcia, D. J., Hallberg, K., Batista, C. D., Capponi, S., Poilblanc, D., Avignon, M., Alascio, B.** (2002). Charge and spin inhomogeneous phases in the ferromagnetic Kondo lattice model. *Physical Review B*, 65(13), 134444. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.134444>
- Gegenwart, P., Si, Q., Steglich, F.** (2008). Quantum criticality in heavy-fermion metals. *Nature Physics*, 4(3), 186. <https://doi.org/10.1038/nphys892>
- Gorshkov, A.V., Hermele, M., Gurarie, V., Xu, C., Julienne, P.S., Ye, J., Zoller, P., Demler, E., Lukin, M.D., Rey, A.M.** (2010). Two-orbital SU(N) magnetism with ultracold alkaline-earth atoms. *Nature Physics*, 6(4), 289. <https://doi.org/10.1038/nphys1535>

- Gross, C., Bloch, I.** (2017). Quantum simulations with ultracold atoms in optical lattices. *Science*, 357(6355), 995. <https://doi.org/10.1126/science.aal3837>
- Grüner, G.** (1988). The dynamics of charge-density waves. *Review of Modern Physics*, 60(4), 1129. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.60.1129>
- Grüner, G.** (1994). The dynamics of spin-density waves. *Review of Modern Physics*, 66(1), 1. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.66.1>
- Guan, X.-W., Batchelor, M. T., Lee, C.** (2013). Fermi gases in one dimension: From Bethe ansatz to experiments. *Review of Modern Physics*, 85(4), 1633. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.1633>
- Guerrero-Suárez, R., Mendoza-Arenas, J. J., Franco, R., Silva-Valencia, J.** (2021). Spin-selective insulators in Bose-Fermi mixtures. *Physical Review A*, 103(2), 023304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.103.023304>
- Gulacsi, M.** (2004). The one-dimensional Kondo lattice model at partial band filling. *Advances in physics*, 53(7), 769. <https://doi.org/10.1080/00018730412331313997>
- Günter, K., Stöferle, T., Moritz, H., Köhl, M., Esslinger, T.** (2006). Bose-Fermi mixtures in a three-dimensional optical lattice. *Physical Review Letters*, 96(18), 180402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.180402>
- Hadzibabic, Z., Stan, C. A., Dieckmann, K., Gupta, S., Zwierlein, M. W., Görlitz, A., Ketterle, W.** (2002). Two-species mixture of quantum degenerate Bose and Fermi gases. *Physical Review Letters*, 88(16), 160401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.160401>
- Hasan, M. Z., Kane, C. L.** (2010). Colloquium: Topological insulators. *Review of Modern Physics*, 82(4), 3045. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.3045>
- Hewson, A.** (1997). *The Kondo Problem to Heavy Fermions*. Cambridge University Press.
- Honerkamp, C., & Hofstetter, W.** (2004). Ultracold fermions and the SU(n) Hubbard model. *Physical Review Letters*, 92(17), 170403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.170403>
- Honner, G., Gulacsi, M.** (1997). One-dimensional Kondo lattice at partial band filling. *Physical Review Letters*, 78(11), 2180. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2180>
- Ikemachi, T., Ito, A., Aratake, Y., Chen, Y., Koashi, M., Kuwata-Gonokami, M., Horikoshi, M.** (2017). All-optical production of dual Bose-Einstein condensates of paired fermions and bosons with 6Li and 7Li. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 50(1), 01LT01. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/50/1/01LT01>
- Imada, M., Fujimori, A., Tokura, Y.** (1998). Metal-insulator transitions. *Review of Modern Physics*, 70(4), 1039. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.70.1039>
- Kinnunen, J. J., Baarsma, J. E., Martikainen, J.-P., Törmä, P.** (2018). The Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov state for ultracold fermions in lattice and harmonic potentials: a review. *Reports on Progress in Physics*, 81(4), 046401. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/aaa4ad>
- Larkin, A. I., Ovchinnikov, Y. N.** (1964). Nonuniform state of superconductors. *Journal of Experimental and Theoretical Physics. (USSR)*, 47, 1136.
- Lewenstein, M., Santos, L., Baranov, M. A., Fehrmann, H.** (2004). Atomic Bose-Fermi mixtures in an optical lattice. *Physical Review Letters*, 92(5), 050401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.050401>
- Liao, Y., Rittner, A. S. C., Paprotta, T., Li, W., Partridge, G. B., Hulet, R. G., Baur, S.K., Mueller, E. J.** (2010). Spin-imbalance in a one-dimensional Fermi gas. *Nature*, 467(7315), 567. <https://doi.org/10.1038/nature09393>
- Liao, R.** (2020). Ultracold Bose mixtures with spin-dependent fermion-mediated interactions. *Physical Review Research*, 2(4), 043218. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.043218>
- Lous, R. S., Fritsche, I., Jag, M., Lehmann, F., Kirilov, E., Huang, B., Grimm, R.** (2018). Probing the interface of a phase-separated state in a repulsive Bose-Fermi mixture. *Physical Review Letters*, 120(24), 243403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.243403>
- Lühmann, D.-S., Bongs, K., Sengstock, K., Pfannkuche, D.** (2008). Self-trapping of bosons and fermions in optical lattices. *Physical Review Letters*, 101(5), 050402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.050402>
- Masaki, A., Mori, H.** (2013). Mott transition of Bose-Fermi mixtures in optical lattices induced by attractive interactions. *Journal of the Physical Society of Japan*, 82(7), 074002. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.82.074002>
- Mathey, L., Wang, D.-W.** (2007). Phase diagrams of one-dimensional Bose-Fermi mixtures of ultracold atoms. *Physical Review A*, 75(1), 013612. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.75.013612>
- Mathey, L., Wang, D.-W., Hofstetter, W., Lukin, M. D., Demler, E.** (2004). Luttinger liquid of polarons in one-dimensional boson-fermion mixtures. *Physical Review Letters*, 93(12), 120404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.120404>

- McCulloch, I. P., Juozapavicius, A., Rosengren, A., Gulacsi, M.** (2002). Localized spin ordering in Kondo lattice models. *Physical Review B*, 65(5), 052410. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.052410>
- McNamara, J. M., Jelts, T., Tychkov, A. S., Hogervorst, W., Vassen, W.** (2006). Degenerate Bose-Fermi mixture of metastable atoms. *Physical Review Letters*, 97(8), 080404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.080404>
- Mering, A., Fleischhauer, M.** (2008). One-dimensional Bose-Fermi-hubbard model in the heavy-fermion limit. *Physical Review A*, 77(2), 023601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.77.023601>
- Mering, A., Fleischhauer, M.** (2010). Fermion-mediated long-range interactions of bosons in the one-dimensional Bose-Fermi-hubbard model. *Physical Review A*, 81(1), 011603(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.011603>
- Mizukami, Y., Shishido, H., Shibauchi, T., Shimozawa, M., Yasumoto, S., Watanabe, D., Yamashita, M., Ikeda, H., Terashima, T., Kontani, H., Matsuda, Y.** (2011). Extremely strong-coupling superconductivity in artificial two-dimensional Kondo lattices. *Nature Physics*, 7(11), 849. <https://doi.org/10.1038/nphys2112>
- Mott, N. F.** (1968). Metal-insulator transition. *Review of Modern Physics*, 40(4), 677. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.40.677>
- Nakagawa, M., Kawakami, N.** (2017). Symmetry-protected topological phase transition in one-dimensional Kondo lattice and its realization with ultracold atoms. *Physical Review B*, 96(15), 155133. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.155133>
- Nonne, H., Boulat, E., Capponi, S., Lecheminant, P.** (2011). Phase diagram of one-dimensional earth-alkaline cold fermionic atoms. *Modern Physics Letters B*, 25(12n13), 955. <https://doi.org/10.1142/S0217984911026668>
- Ono, K., Kobayashi, J., Amano, Y., Sato, K., Takahashi, Y.** (2019). Antiferromagnetic interorbital spin-exchange interaction of 171Yb. *Physical Review A*, 99(3), 032707. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.032707>
- Onofrio, R.** (2016). Physics of our days: Cooling and thermometry of atomic Fermi gases. *Physics–Uspekhi*, 59(11), 1129. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.07.037873>
- Orignac, E., Tsuchiizu, M., Suzumura, Y.** (2010). Competition of superfluidity and density waves in one-dimensional Bose-Fermi mixtures. *Physical Review A*, 81(5), 053626. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.053626>
- Orth, P. P., Bergman, D. L., Hur, K. L.** (2009). Supersolidity of cold-atom Bose-Fermi mixtures in optical lattices. *Physical Review A*, 80(2), 023624. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.80.023624>
- Ospelkaus, S., Ospelkaus, C., Wille, O., Succo, M., Ernst, P., Sengstock, K., Bongs, K.** (2006). Localization of bosonic atoms by fermionic impurities in a three-dimensional optical lattice. *Physical Review Letters*, 96(18), 180403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.180403>
- Ott, H., de Mirandes, E., Ferlaino, F., Roati, G., Modugno, G., Inguscio, M.** (2004). Collisionally induced transport in periodic potentials. *Physical Review Letters*, 92(16), 160601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.160601>
- Ozawa, T., Recati, A., Delehay, M., Chevy, F., Stringari, S.** (2014). Chandrasekhar-Clogston limit and critical polarization in a Fermi-Bose superfluid mixture. *Physical Review A*, 90(4), 043608. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.90.043608>
- Pai, R. V., Pandit, R., Krishnamurthy, H. R., Ramasesha, S.** (1996). One-dimensional disordered bosonic Hubbard model: A density-matrix renormalization group study. *Physical Review Letters*, 76(16), 2937. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.2937>
- Partridge, G. B., Li, W. H., Kamar, R. I., Liao, Y. A., Hulet, R. G.** (2006). Pairing and phase separation in a polarized Fermi gas. *Science*, 311(5760), 503. <https://doi.org/10.1126/science.1122876>
- Peters, R., Kawakami, N.** (2012). Ferromagnetic state in the one-dimensional Kondo lattice model. *Physical Review B*, 86(16), 165107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.165107>
- Peters, R., Kawakami, N., Pruschke, T.** (2012). Spin-selective Kondo insulator: Cooperation of ferromagnetism and the Kondo effect. *Physical Review Letters*, 108(8), 086402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.086402>
- Polak, T. P., Kopeć, T. K.** (2010). Zero-temperature phase diagram of Bose-Fermi gaseous mixtures in optical lattices. *Physical Review A*, 81(4), 043612.21. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.043612>
- Pollet, L., Troyer, M., Houcke, K. V., Rombouts, S.** (2006). Phase diagram of Bose-Fermi mixtures in one-dimensional optical lattices. *Physical Review Letters*, 96(19), 190402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.190402>

- Qi, X.-L., Zhang, S.-C.** (2011). Topological insulators and superconductors. *Review of Modern Physics*, 83(4), 1057. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.1057>
- Riegger, L., Oppong, N. D., Höfer, M., Fernandes, D. R., Bloch, I., Fölling, S.** (2018). Localized magnetic moments with tunable spin exchange in a gas of ultracold fermions. *Physical Review Letters*, 120(14), 143601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.143601>
- Rizzi, M., Imambekov, A.** (2008). Pairing of one-dimensional Bose-Fermi mixtures with unequal masses. *Physical Review A*, 77(2), 023621. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.77.023621>
- Roati, G., Riboli, F., Modugno, G., Inguscio, M.** (2002). Fermi-Bose quantum degenerate 40K-87Rb mixture with attractive interaction. *Physical Review Letters*, 89(15), 150403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.150403>
- Rossini, D., Fazio, R.** (2012). Phase diagram of the extended Bose-Hubbard model. *New Journal of Physics*, 14(6), 065012. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/6/065012>
- Roth, R., Burnett, K.** (2004). Quantum phases of atomic boson-fermion mixtures in optical lattices. *Physical Review A*, 69(2), 021601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.69.021601>
- Roy, R., Green, A., Bowler, R., Gupta, S.** (2017). Two-element mixture of Bose and Fermi superfluids. *Physical Review Letters*, 118(5), 055301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.055301>
- Schäfer, F., Mizukami, N., Yu, P., Koibuchi, S., Bouscal, A., Takahashi, Y.** (2018). Experimental realization of ultracold yb-7Li mixtures in mixed dimensions. *Physical Review A*, 98(5), 051602(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.051602>
- Schreck, F., Khaykovich, L., Corwin, K. L., Ferrari, G., Bourdel, T., Cubizolles, J., Salomon, C.** (2001). Quasipure Bose-Einstein condensate immersed in a Fermi sea. *Physical Review Letters*, 87(8), 080403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.080403>
- Schuster, T., Scelle, R., Trautmann, A., Knoop, S., Oberthaler, M. K., Haverhals, M. M., Goosen, M. R., Kokkelmans, S. J. J. M. F., Tiemann, E.** (2012). Feshbach spectroscopy and scattering properties of ultracold Li + Na mixtures. *Physical Review A*, 85(4), 042721. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.85.042721>
- Sengupta, K., Dupuis, N., Majumdar, P.** (2007). Bose-Fermi mixtures in an optical lattice. *Physical Review A*, 75(6), 063625. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.75.063625>
- Shibata, N., Ueda, K.** (1999). The one-dimensional Kondo lattice model studied by the density matrix renormalization group method. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 11(2), R1. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/11/2/002>
- Shimozawa, M., Goh, S. K., Shibauchi, T., Matsuda, Y.** (2016). From Kondo lattices to Kondo superlattices. *Reports on Progress in Physics*, 79(7), 074503. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/7/074503>
- Shishido, H., Shibauchi, T., Yasu, K., Kato, T., Kontani, H., Terashima, T., Matsuda, Y.** (2010). Tuning the dimensionality of the heavy fermion compound CeIn₃. *Science*, 327(5968), 980. <https://doi.org/10.1126/science.1183376>
- Silber, C., Günther, S., Marzok, C., Deh, B., Courteille, P. W., Zimmermann, C.** (2005). Quantum-degenerate mixture of fermionic lithium and bosonic rubidium gases. *Physical Review Letters*, 95(17), 170408. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.170408>
- Silva-Valencia, J., Miranda, E.** (2001). Magnetization plateaus and Luttinger liquid behavior in XXZ chains with superlattice structure. *Physical Review B*, 65(2), 024443. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.024443>
- Silva-Valencia, J., Miranda, E., Santos, R. R. D.** (2001). Luttinger liquid superlattices. *J. Phys.: Condens. Matter*, 13(27), L619. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/13/27/102>
- Silva-Valencia, J., Souza, A. M. C.** (2012a). Entanglement of alkaline-earth-metal fermionic atoms confined in optical lattices. *Physical Review A*, 85(3), 033612. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.85.033612>
- Silva-Valencia, J., Souza, A. M. C.** (2012b). Ground state of alkaline-earth fermionic atoms in one-dimensional optical lattices. *The European Physical Journal B*, 85(1), 5. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2011-20671-2>
- Singh, M., Orso, G.** (2020). Enhanced visibility of the Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov state in one-dimensional Bose-Fermi mixtures near the immiscibility point. *Physical Review Research*, 2(2), 023148. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.023148>
- Sinha, S., Sengupta, K.** (2009). Phases and collective modes of a hardcore Bose-Fermi mixture in an optical lattice. *Physical Review B*, 79(11), 115124. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.115124>
- Sugawa, S., Inaba, K., Taie, S., Yamazaki, R., Yamashita, M., Takahashi, Y.** (2011). Interaction and filling-induced quantum phases of dual Mott insulators of bosons and fermions. *Nature Physics*, 7(8), 642. <https://doi.org/10.1038/nphys2028>

- Suzuki, K., Miyakawa, T., Suzuki, T.** (2008). p-wave superfluid and phase separation in atomic Bose-Fermi mixtures. *Physical Review A*, 77(4), 043629. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.77.043629>
- Takasu, Y., Takahashi, Y.** (2009). Quantum degenerate gases of ytterbium atoms. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 78(1), 012001. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.78.012001>
- Takeuchi, Y., & Mori, H. (2005). Mixing-demixing transition in one-dimensional boson-fermion mixtures. *Physical Review A*, 72(6), 063617. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.72.063617>
- Tey, M. K., Stellmer, S., Grimm, R., Schreck, F.** (2010). Double-degenerate Bose-Fermi mixture of strontium. *Physical Review A*, 82(1), 011608(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.011608>
- Trautmann, A., Ilzhöfer, P., Durastante, G., Politi, C., Sohmen, M., Mark, M. J., Ferlaino, F.** (2018). Dipolar quantum mixtures of erbium and dysprosium atoms. *Physical Review Letters*, 121(21), 213601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.213601>
- Truscott, A. G., Strecker, K. E., McAlexander, W. I., Partridge, G. B., Hulet, R. G.** (2001). Observation of Fermi pressure in a gas of trapped atoms. *Science*, 291(5513), 2570. <https://doi.org/10.1126/science.1059318>
- Tsunetsugu, H., Sigrist, M., Ueda, K.** (1997). The ground-state phase diagram of the one-dimensional Kondo lattice model. *Review of Modern Physics*, 69(3), 809. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.69.809>
- Tung, S. K., Parker, C., Johansen, J., Chin, C., Wang, Y., Julienne, P. S.** (2013). Ultracold mixtures of atomic 6Li and 133Cs with tunable interactions. *Physical Review A*, 87(1), 010702(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.87.010702>
- Vaidya, V. D., Tiamsuphat, J., Rolston, S. L., Porto, J. V.** (2015). Degenerate Bose-Fermi mixtures of rubidium and ytterbium. *Physical Review A*, 92(4), 043604. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.043604>
- Wu, Y.-P., Yao, X.-C., Chen, H.-Z., Liu, X.-P., Wang, X.-Q., Chen, Y.-A., Pan, J.-W.** (2017). A quantum degenerate Bose-Fermi mixture of 41K and 6Li. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 50(9), 094001. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aa658b>
- Xavier, J. C., Pereira, R. G., Miranda, E., Affleck, I.** (2003). Dimerization induced by the RKKY interaction. *Physical Review Letters*, 90(24), 247204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.247204>
- Yan, B., Felser, C.** (2017). Topological materials: Weyl semimetals. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 8(1), 337. <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031016-23025458>
- Yao, X.-C., Chen, H.-Z., Wu, Y.-P., Liu, X.-P., Wang, X.-Q., Jiang, X., Deng, Y., Chen, Y.-A., Pan, J.-W.** (2016). Observation of coupled vortex lattices in a mass imbalance Bose and Fermi superfluid mixture. *Physical Review Letters*, 117(14), 145301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.145301>
- Yi, M., Liu, Z.-K., Zhang, Y., Yu, R., Zhu, J.-X., Lee, J., Moore, R.G., Schmitt, F.T., Li, W., Riggs, S.C., Chu, J.-H., Lv, B., Hu, H., Hashimoto, M., Mo, S.-K., Hussain, Z., Mao, Z.Q., Chu, C.W., Fisher, I.R., Si, Q., Shen, Z.-X., Lu, D.** (2015). Observation of universal strong orbital-dependent correlation effects in iron chalcogenides. *Nature Communications*, 6(1), 7777. <https://doi.org/10.1038/ncomms8777>
- Yin, X., Chen, S., Zhang, Y.** (2009). Yang-Yang thermodynamics of a Bose-Fermi mixture. *Physical Review A*, 79(5), 053604. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.053604>
- Zaccanti, M., D'Errico, C., Ferlaino, F., Roati, G., Inguscio, M., Modugno, G.** (2006). Control of the interaction in a Fermi-Bose mixture. *Physical Review A*, 74(4), 041605(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.74.041605>
- Zujev, A., Baldwin, A., Scalettar, R. T., Rousseau, V. G., Denteneer, P. J. H., Rigol, M.** (2008). Superfluid and Mott-insulator phases of one-dimensional Bose-Fermi mixtures. *Physical Review A*, 78(3), 033619. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.78.033619>
- Zwierlein, M. W., Schirotzek, A., Schunck, C. H., Ketterle, W.** (2006). Fermionic superfluidity with imbalanced spin populations. *Science*, 311(5760), 492. <https://doi.org/10.1126/science.1122318>

Ciencias Físicas

Ensayo

A propósito del premio nobel de física 2022: ¿comprender la naturaleza es asunto de la razón, de la intuición o de la tecnología?

Regarding the Physics Nobel Prize 2022: Is nature understanding a matter of reason, intuition or technology?

El 4 de octubre, la Real Academia Sueca de Ciencias anunció el otorgamiento del premio Nobel 2022 a Alain Aspect (1947), profesor de la Universidad de París – Saclay y de la Escuela Politécnica de Palaiseau (Francia), John Clauser (1942), de la firma J.F. Clauser and Assoc. (Estados Unidos) y Anton Zeilinger (1945), profesor de la Universidad de Viena (Austria) “for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science” (**Press release of The Royal Swedish Academy of Sciences**, 4 October 2022). Una distinción que muchos, en la comunidad científica de los físicos, esperaban desde hace algún tiempo, porque el *entrelazamiento* (Ing. *entanglement*) es un fenómeno peculiar, difícil de aceptar pero que, más rápido de lo esperado, se ha instalado definitivamente en nuestro paisaje tecnológico.

La peculiaridad del fenómeno no tiene que ver con su descripción matemática, que no es particularmente compleja o truculenta, sino con su carácter enigmático para la intuición, que hace del entorno natural un escenario de rasgos inesperados e incómodos. Es por ello sorprendente que, apenas transcurridos unos setenta años desde que Einstein y sus colaboradores Podolsky y Rosen (EPR por sus iniciales) lo denunciaran como un defecto, una limitación o al menos una paradoja de la Mecánica Cuántica (**Einstein et al**, 1935), el entrelazamiento se haya convertido en la piedra angular de la tendencia de desarrollo tecnológico donde quizá se hayan puesto las mayores apuestas: las telecomunicaciones cuánticamente encriptadas, la computación cuántica y la teleportación. La historia de esa “*spooky action at a distance*”, como calificó Einstein al entrelazamiento, ha sido la de un

Citación: Castañeda R. A propósito del premio nobel de física 2022: ¿comprender la naturaleza es asunto de la razón, de la intuición o de la tecnología?. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):899-901, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1788>

Editor: Elizabeth Castañeda

Correspondencia:

Román Castañeda;
rcastane@unal.edu.co

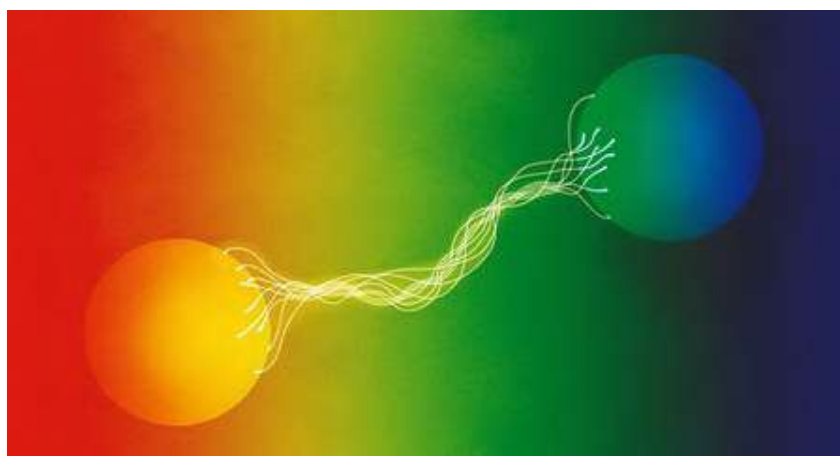
Recibido: 9 de octubre de 2022

Aceptado: 9 de octubre de 2022

Publicado en línea: 14 de octubre de 2022



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



Representación conceptual del entrelazamiento. Tomado de *The Nobel Prize in Physics 2022. Popular Science Background. The Royal Swedish Academy of Science.* <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/popular-information/>

profundo debate sobre la comprensión de la naturaleza que, en ciertos momentos, pudo motivar expresiones, quizá desesperadas, como “*shut up and calculate*” que se popularizó en la segunda mitad del siglo 20 en el ámbito de la Mecánica Cuántica.

El estigma que Einstein dedicó al entrelazamiento parece apoyarse en un rasgo atribuido a los fenómenos naturales, concordante con nuestras percepciones y nuestra intuición: la noción de que un sistema físico sólo interactúa con otros que se encuentran en su entorno cercano y, en los casos en los que “cercano” significa una distancia finita, como la que hay entre la tierra y la luna, la interacción se comunica entre ellos a una velocidad no mayor a la velocidad de la luz en el vacío. El entrelazamiento causa un comportamiento completamente diferente: sistemas físicos entrelazados, arbitrariamente distantes entre sí, interactúan de manera instantánea; tal rasgo lo hace un verdadero reto para la intuición y un enigma para la interpretación. Imaginemos que, en un juego de billar, una bola blanca y dos rojas están dispuestas, en un triángulo amplio, sobre la mesa, y que la blanca es impulsada por el taco para hacer una carambola con las dos rojas. Siempre se ha visto (y, por lo tanto, siempre se espera) que, luego de ser impulsada por el taco, la bola blanca deberá golpear una de las rojas primero y luego, por efecto de ese choque, deberá golpear a la segunda bola roja para completar la carambola. Sin embargo, si las bolas estuvieran entrelazadas, las rojas saldrían disparadas apenas el taco golpee a la blanca, algo que nunca hemos visto y que consideramos descabellado, aunque podamos imaginarlo al menos en un contexto mágico.

A partir del artículo de EPR, los hitos que marcan el debate del entrelazamiento son muy significativos en el desarrollo de la física del siglo XX. Entre 1935 y 1972, año en que Stuart Freedman (fallecido en 2012) y John Clauser (**Freedman & Clauser, 1972**) reportaron la primera evidencia experimental del entrelazamiento cuántico, las discusiones fueron esencialmente teóricas, incluyendo la epistemología y la filosofía de la física, debido a que no se disponía de tecnología apropiada para la generación de sistemas entrelazados. En esa etapa sobresalen tres hitos. El primero, también de 1935, es la famosa parodia del gato vivo y muerto al tiempo, que Erwin Schrödinger imaginó para describir, tal vez irónica y jocosamente, lo que en Mecánica Cuántica se denomina superposición de estados y colapso de la función de onda, aspectos íntimamente relacionados con el entrelazamiento. El segundo, lo constituyen dos artículos, publicados en 1952 (**Bohm, 1952 a, b**), en los que David Bohm expuso una teoría de “variables ocultas”: propiedades no explícitas de los fenómenos, cuya no consideración en los modelos provoca la apariencia de esa “espeluznante acción a distancia”. Y el tercero, señalado por otro par de artículos, uno de ellos publicado por Bohm con coautoría de su doctorando Yakir Aharonov (**Bohm & Aharonov, 1957**), en el que propone un posible experimento para probar la solución de la paradoja EPR en los términos de su teoría de “variables ocultas”, y el otro publicado por John Bell (**Bell, 1964**) en 1964, en el que, a partir del manejo estadístico de los datos que podrían obtenerse en un experimento como el propuesto por Bohm y Aharonov, dedujo una desigualdad que permite dirimir entre los escenarios de “variables ocultas” y de entrelazamiento cuántico: el cumplimiento de la desigualdad confirmaría el escenario de “variables ocultas”, mientras que su violación confirmaría la existencia de entrelazamiento. Al parecer, Bell albergaba la expectativa de que su desigualdad estuviera del lado de EPR, favoreciendo el escenario de “variables ocultas” de Bohm.

Todo estaba preparado. Solo había que esperar la tecnología apropiada para adelantar las pruebas. Y esta llegó a las manos de Freedman y Clauser como una fuente de cascada atómica de calcio que emitía fotones entrelazados en polarización. Sus resultados, convincentes, pero no concluyentes, violaron la desigualdad de Bell mostrando que el escenario natural parecía el del entrelazamiento cuántico, justamente el que tanto reta a la intuición perceptual con su “espeluznante acción a distancia”. Una década más tarde, Alain Aspect, Jean Dalibard y Gerard Roger (**Aspect *et al.*, 1982**) reportaron las pruebas experimentales que demuestran, de manera concluyente, la existencia del entrelazamiento cuántico. En el marco de la Mecánica Cuántica, el entrelazamiento halló un nicho seguro (**Aspect, 2015**), aunque todavía no haya claridad completa ni acuerdo generalizado sobre las potencias naturales de las que surge ese peculiar fenómeno físico.

Desde finales del siglo XX, el entrelazamiento cuántico ha trascendido su carácter de peculiaridad del microcosmos para irrumpir en la tecnología con impacto significativo. Las fuentes de sistemas físicos entrelazados, particularmente fotones, se han diversificado y múltiples experimentos con fotones entrelazados se han adelantado en campos fuertemente promisorios como los ya mencionados. Anton Zeilinger ha sido un protagonista indiscutido del trazado de esas tendencias tecnológicas contemporáneas, particularmente con su demostración de la teleportación (**Bouwmeester et al.**, 1997), un procedimiento que permite transferir un estado cuántico de una partícula a otra, situada a una distancia significativa de la primera. Es una expectativa amplia y generalizada que estas tendencias cambiarán radicalmente nuestro paisaje tecnológico en relativo corto plazo. Como afirmó Anders Irbäck, presidente del comité de premio Nobel de física “*It has become increasingly clear that a new kind of quantum technology is emerging. We can see that the laureates’ work with entangled states is of great importance, even beyond the fundamental questions about the interpretation of quantum mechanics.*” (**Press release of The Royal Swedish Academy of Sciences**, 4 October 2022).

✉ **Román Castañeda**

Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

Referencias

- Aspect, A.** (2015) Closing the Door on Einstein and Bohr’s Quantum Debate. *Physics*, 8, 123 (4pp).
- Aspect, A., Dalibard, J., Roger G.** (1982) Experimental test of Bell’s inequalities using time varying analyzers. *Physical Review Letters*, 49, 1804-1807.
- Bell, J.S.** (1964) On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics*, 1, 195-200.
- Bohm, D.** (1952) A suggested interpretation of the Quantum Theory in terms of “Hidden” Variables. I. *Physical Review*, 85, 166-179.
- Bohm, D.** (1952) A suggested interpretation of the Quantum Theory in terms of “Hidden” Variables. II. *Physical Review*, 85, 180-193.
- Bohm, D., Aharonov, Y.** (1957) Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky. *Physical Review*, 108, 1070-1076.
- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N.** (1935) Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47, 777-780.
- Freedman, S.J., Clauser J.F.** (1972) Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories. *Physical review Letters*, 28, 938-941.
- Bouwmeester, D., Pan J-W, Mattle, K., Eibl, M., Weinfurter, H, Zeilinger, A.** (1997) Experimental quantum teleportation. *Nature*, 390, 575-579.

Original article

Confinement and spatial entanglement: phenomenology of a new interference principle

Confinamiento y entrelazamiento espacial: la fenomenología de un nuevo principio de interferencia

 Román Castañeda

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia

Abstract

Recently, the novel confinement principle in spatially-structured Lorentzian wells was reported to describe in a unified way the interference of classical waves and singular quantum particles in a causal framework in ordinary space. The phenomenology derived from this principle offers significant advantages over the conventional classical and quantum formalisms of interference founded on wave superposition. This paper presents a conceptual analysis of such a principle and its main implications indicating its fundamental differences from the standard descriptions.

Keywords: Interference; Diffraction; Geometric potential; Confinement; Entanglement.

Resumen

Recientemente se reportó el novedoso principio de confinamiento en pozos lorentzianos espacialmente estructurados para describir, de manera unificada, la interferencia de ondas clásicas y partículas cuánticas singulares en un marco causal en el espacio ordinario. La fenomenología derivada de este principio ofrece ventajas significativas frente a las formulaciones clásica y cuántica convencionales de la interferencia fundadas en la superposición de ondas. En este artículo se presenta un análisis conceptual de dicho principio y sus principales implicaciones, indicando sus diferencias fundamentales con la descripción estándar.

Palabras clave: Interferencia; Difracción; Potencial geométrico; Confinamiento; Entrelazamiento.

Introduction

The term interference refers to peculiar spatial characteristics of the distribution of light energy propagating in free space or the quantum particles moving in field-free regions. In such environments, light waves and single massive (non-relativistic) particles, respectively, obey the classical wave equation and the Schrödinger equation (**Born & Wolf, 1993; Mandel & Wolf, 1995; Feynman *et al.*, 1965; Feynman & Hibbs, 1965**). However, it is well known that interference is exhaustively described by the spatial (or time-independent) components of these equations regardless of the differences between their time propagators.

The Helmholtz equation describes the spatial components of both the classical wave equation in free space and the Schrödinger equation for field-free regions. The classical or quantum context for the Helmholtz equation is specified by its eigenvalue, i.e., it involves the wave frequency in the case of light but the momentum in the case of massive particles. This mathematical generality of interference implies that its phenomenology (i.e., its description in ordinary space, which is the environment of the corresponding experiments) in any classical and quantum contexts should be supported by a unique principle.

Although wave superposition is widely accepted as a fundamental principle of physics, in the case of interference with massive particles, it does not refer to ordinary space but to a mathematical environment called Hilbert space (**Feynman *et al.*, 1965**). As a consequence,

Citation: Castañeda R. Confinement and spatial entanglement: phenomenology of a new interference principle. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):902-919, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1695>

Editor: María Sagrario Millán García-Varela

Corresponding autor:
Román Castañeda;
rcastane@unal.edu.co

Received: May 26, 2022

Accepted: November 1, 2022

Published on line: November 20, 2022



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

in quantum interference, the wave superposition cannot provide a phenomenological description but only a predictive estimation of the experimental outcomes. The prediction accuracy of the interference patterns with massive particles, strongly supported by the experimental outcomes (Matteucci, 2011; Bach *et al.*, 2013; Tavabi *et al.*, 2019), cannot hide the lack of phenomenological generality of the wave superposition.

An alternative notion, i.e., the confinement in spatially-structured Lorentzian wells, overcomes this limitation of wave superposition by maintaining the mathematical accuracy of the classical and quantum interference predictions. Indeed, this notion leads to the description of interference with waves and single massive particles in ordinary space. Its mathematical and physical features have been discussed in detail (Castañeda & Matteucci, 2017; Castañeda *et al.*, 2021) and illustrated with predictions of experimental patterns obtained specifically with single electrons and molecules (Castañeda *et al.*, 2016a, 2016b; Castañeda & Matteucci, 2017). For this reason, the confinement in spatially-structured Lorentzian wells has been proposed as the unique general principle of interference (Castañeda *et al.*, 2021).

A conceptual discussion of confinement phenomenology is pertinent and necessary to clearly appreciate its differences and advantages as compared with the standard optical and quantum formalisms. In this paper, the confinement ability of space is discussed and special attention is paying to its spatial structuration. It has been shown that nonlocality prepared on a mask triggers the build-up of interference patterns (Castañeda & Matteucci, 2019). Subsequently, the geometric nature of the prepared nonlocality is contrasted with the standard notion that conceives it as a physical property of waves or particle beams moving in the setup, and a very special feature of the spatially structured confinement under strong nonlocality, called spatial entanglement, is discussed. Such a feature ensures disjoint distributions of the confinement zones whose cross-sections account for the highly contrasted interference patterns. A summary of the analysis and the conclusions is then presented at the end of the paper.

For an appropriate analysis, symbolic mathematics and illustrations are used while the discussions are focused on the meaning of the expressions rather than on their algebraic definitions and developments, which are not included here but can be revisited in several previous papers (Castañeda & Matteucci, 2017, 2019; Castañeda *et al.*, 2016a, 2016b, 2021).

¿Can free-space confine?

In the standard interference formalisms, free space is a Newtonian concept, i.e., a uniform, isotropic, and passive scenario where physical phenomena take place. Accordingly, interference features are completely attributed to the properties of waves and particles, which leads to a phenomenological description of wave interference in ordinary space but only as far as the prediction of single-particle interference in the Hilbert space is concerned.

Nevertheless, it has been shown that a general phenomenological description of interference in ordinary space both with waves and single particles can be accurately formulated by regarding free space from a non-Newtonian perspective, i.e., as a physical system with a geometrical behavior (Castañeda & Matteucci, 2017, 2019; Castañeda *et al.*, 2021). To analyze it, let us start by considering the configuration of a non-paraxial interference setup as conceptually depicted in **figure 1**. In the preparation and measurement (P&M) scheme, it is realized by three planes (labeled S, M, and D) that delimit two consecutive stages in the setup, i.e., the preparation (SM) stage between S and M separated by a distance z' , and the measurement (MD) stage between M and D at a distance z from each other. The reduced coordinates $(\mathbf{r}'_A, \mathbf{r}'_D)$ and (ξ_A, ξ_D) (Castañeda *et al.*, 2020) are defined at the S and M planes, respectively, to determine univocally pairs of points on them, which are denoted as $\mathbf{r}'_{\pm} = \mathbf{r}'_A \pm \mathbf{r}'_D/2$ and $\xi_{\pm} = \xi_A \pm \xi_D/2$, while individual points at the D plane are determined by the coordinate \mathbf{r}_A .

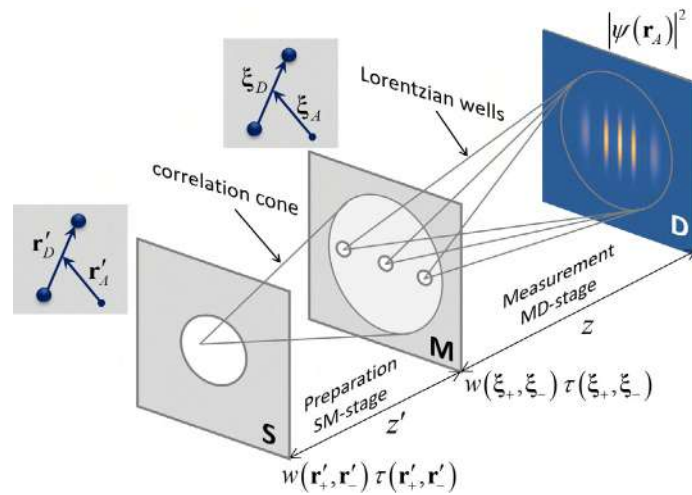


Figure 1. Conceptual sketch of the interference setup in the P&M scheme. S: source plane, M: mask plane, and D: detector plane. The reduced coordinates at the S and M planes are indicated, A correlation cone is depicted in the preparation SM stage, and individual spatially-structured Lorentzian wells are depicted in the measurement MD stage. The mathematical expressions are explained in the text.

The spatial components of both the classical wave equation in free space and the Schrödinger equation for field-free regions are given by the Helmholtz equation $\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0$ where ψ is the eigenfunction of the Laplacian operator at any point in the setup, with eigenvalue $-k^2$, and $k = \omega/c$ for frequency waves ω and $k = p/\hbar$ for particles of momentum p . The universal constants c, \hbar are respectively the light speed in a vacuum and Planck's constant divided by 2π . It has been shown (Castañeda & Matteucci, 2019) that products $\psi(\mathbf{r}'_{\pm}) t(\mathbf{r}'_{\pm})$ and $\psi(\xi_{\pm}) \tau(\xi_{\pm})$ realize the boundary conditions for the SM and the MD stages, respectively, with $t(\mathbf{r}'_{\pm})$ and $\tau(\xi_{\pm})$ being the complex transmission functions at the S and M planes, respectively.

The exact solution of the Helmholtz equation for any point in the setup can be obtained by applying Green's theorem (Arfken, 1970), which leads to the eigenfunction at the D plane in terms of the expansion (Castañeda *et al.*, 2020)

$$\psi(\mathbf{r}_A) = \int_M d^2 \xi_A \psi(\xi_A) t(\xi_A) \Theta(\xi_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k), \quad (1)$$

where $\Theta(\xi_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)$ denotes Green's functions defined in the volume of the MD stage, a set of orthogonal, geometrical, time-independent, deterministic, and complex valued eigenfunctions of the Laplacian operator. Indeed, Green's functions connect each ξ_A point on the M plane with any \mathbf{r}_A point on the D plane, as pointed out by their arguments. The explicit mathematical form of $\Theta(\xi_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)$ is deduced in Castañeda & Matteucci (2019).

The aim of the setup in **figure 1** is to measure the spatial distribution of the optical field irradiance or the single particle arrivals at the D plane by attaching a square modulus detector there. Such measurements are proportional to the physical observable $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = \psi(\mathbf{r}_A) \psi^*(\mathbf{r}_A)$, so Eq. (1) allows expressing it straightforwardly in terms of the expansion:

$$|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = \int_M \int_M d^2 \xi_A d^2 \xi_D w(\xi_+, \xi_-) \tau(\xi_+, \xi_-) \Phi(\xi_+, \xi_-, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \quad (2)$$

over the geometric, deterministic, time-independent, and complex-valued kernel

$$\Phi(\xi_+, \xi_-, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) = \Theta(\xi_+, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Theta^*(\xi_-, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \quad (3)$$

defined in the volume of the MD stage. In Eq. (2), it is worth noting that the measurement of the physical observable at the D plane explicitly implies the requirement of nonlocality prepared as a boundary condition at the M plane, which is formalized by the product of the non-locality function (Castañeda *et al.*, 2021).

$$w(\xi_+, \xi_-) = \psi(\xi_+) \psi^*(\xi_-) = |w(\xi_+, \xi_-)| \exp(i\alpha(\xi_+, \xi_-)) \quad (4)$$

and the non-local transmission function (Castañeda *et al.*, 2021)

$$\tau(\xi_+, \xi_-) = t(\xi_+) t^*(\xi_-) = |\tau(\xi_+, \xi_-)| \exp(i\phi(\xi_+, \xi_-)). \quad (5)$$

The term “nonlocal(ity)” refers to the dependence on pairs of points (ξ_+, ξ_-) in the ordinary space of the functions defined in Eqs. (3) to (5). Additionally, these functions have Hermitic symmetry related to the permutation of such points, i.e., $\Phi(\xi_+, \xi_-, \mathbf{r}, \mathbf{z}, k) = \Phi^*(\xi_-, \xi_+, \mathbf{r}, \mathbf{z}, k)$, $w(\xi_+, \xi_-) = w^*(\xi_-, \xi_+)$, and $\tau(\xi_+, \xi_-) = \tau^*(\xi_-, \xi_+)$. They also include local components determined for $\xi_+ = \xi_- = \xi_A$, i.e. $\xi_D = 0$, which take respectively the forms $\Phi(\xi_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) = |\Theta(\xi_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)|^2$, i.e., real-valued and positive definite local-kernel modes, $w(\xi_A, \xi_A) = |\psi(\xi_A)|^2$, the physical observable that describes the spatial distribution of the light irradiance or the quantum probability of single particle arrivals at the M plane, and $\tau(\xi_A, \xi_A) = |t(\xi_A)|^2$ with $0 \leq |t(\xi_A)|^2 \leq 1$, the transmittance placed at the M plane.

For the phenomenology, it is crucial to separate the local and non-local contributions from the M plane in Eq. (2). It is straightforwardly performed by manipulating the integration limits appropriately, thus expressing the physical observable at the D plane as

$$|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = |\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2 + A(\mathbf{r}_A), \quad (6)$$

with

$$|\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2 = \int_M d^2 \xi_A |\psi(\xi_A)|^2 |t(\xi_A)|^2 \Phi(\xi_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \quad (7)$$

a real-valued and positive-definite function, i.e., a physical observable defined at the D plane, and

$$A(\mathbf{r}_A) = 2 \int_M \int_{\xi_D \neq 0} d^2 \xi_A d^2 \xi_D |w(\xi_+, \xi_-)| |\tau(\xi_+, \xi_-)| \\ \times \text{Re} [\Phi(\xi_+, \xi_-, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \exp(i\alpha(\xi_+, \xi_-) + i\phi(\xi_+, \xi_-))] \quad (8)$$

with Re denoting the real part, which is obtained by considering the Hermitic symmetry of the integrand and by adding the contributions due to the two degrees of freedom in the orientation of the separation vectors realized by the permutation of the pair of points, i.e., $\xi_D \leftrightarrow -\xi_D$. The real-valued function $\Lambda(\mathbf{r}_A)$ in Eq. (8) takes on positive and negative values to achieve $|\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2 \geq |\Lambda(\mathbf{r}_A)|$ for $|\Lambda(\mathbf{r}_A)| < 0$.

It is important to discuss at this point some features of the expressions above. The nonlocality function differs from the two-point spatial correlation (called in optics the cross-spectral density) (Born & Wolf, 1993) in that the first does not involve the ensemble average over a great enough number of experimental realizations that the second does. The nonlocality function denotes a single component of the ensemble corresponding to an individual experimental realization. This term refers to the event that begins with a local emission of a wave disturbance or a single particle at the S plane and ends with its local detection at the D plane. Consequently, Eq. (2) describes the detection of a local and instantaneous value of light energy or the arrival of a single particle to the detector.

This formalization of the individual experimental realizations is not explicitly considered in the standard interference formalisms. In optics, the light is regarded as a stochastic process (Mandel & Wolf, 1995) and the detector averages its energy fluctuations during the integration time. Such time average equals the ensemble average because of the ergodicity of light (Mandel & Wolf, 1995). The ensemble average of Eq. (2) leads to the conventional description of the cross-spectral density propagation (Mandel & Wolf, 1995). However, the current technology is capable of single photon detection, so Eq. (2) has become experimentally feasible in optics with no need for averaging.

In quantum mechanics, a single particle moves randomly in field-free regions of ordinary space while Eq. (2) is regarded as the prediction calculation of the experimental outcomes in the Hilbert space. From this point of view, Eq. (2) cannot account for the phenomenological description of the single particle behavior in the setup. Furthermore, the ensemble average of Eq. (2) is required because the predicted interference pattern is built up after recording a great enough number of random individual particle arrivals to the detector.

As shown in the next section, the stochastic fluctuations of light, as well as the random appearance of the interference build-up with single particles, are closely related to the emission properties of the source. However, the preparation of the non-locality function $w(\xi_+, \xi_-)$ is profoundly geometric and related to the SM stage configuration. This feature, together with the geometric definition of the non-local kernel $\Phi(\xi_+, \xi_-, \mathbf{r}, \mathbf{z}, k)$, related to the MD stage configuration, suggests that Eq. (2) can actually describe the phenomenology of individual experimental realizations of interference with light and single particles in ordinary space.

Interference is a conservative phenomenon. Consequently, the conservation law of the light energy, as well as the normalization of the quantum probabilities at the M and D planes, lead to the condition

$$\int_D d^2 r_A |\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = \int_M d^2 \xi_A |\psi(\xi_A)|^2 |t(\xi_A)|^2. \quad (9)$$

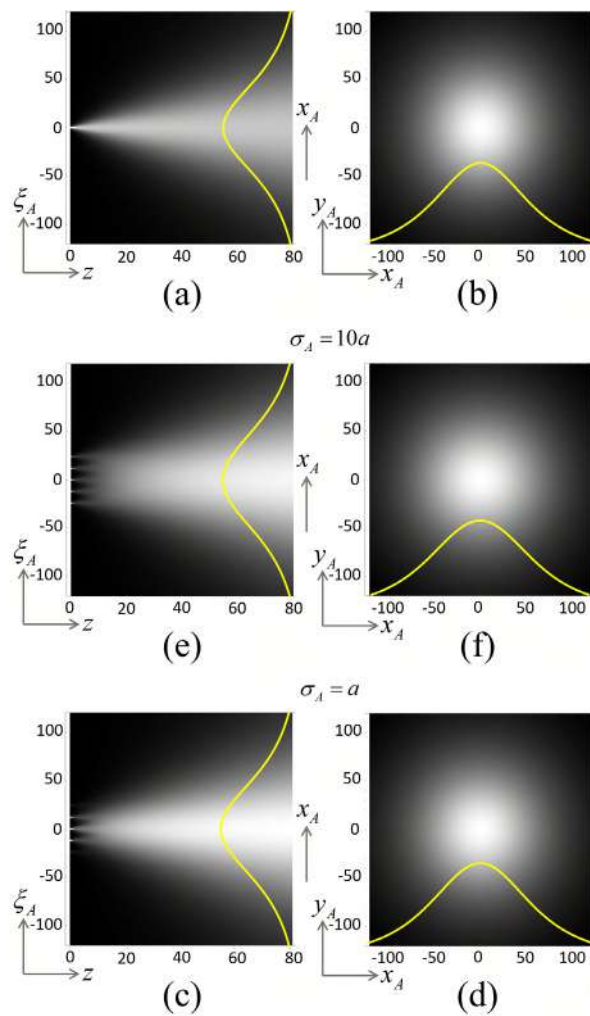


Figure 2. Axial sections for $0 \leq z \leq 20\lambda$ (where $\lambda = 4pm$ is the de Broglie wavelength for single matter particles and $\lambda = 4\mu m$ is the wavelength for light waves) on the left column and cross-sections at $z = 20\lambda$ on the right column of $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2$ for a mask whose transmission function has a linear regular array of five point-openings with a spacing of $a = 3\lambda$ at the M plane (left extreme of the axial sections). A Gaussian boundary condition $|\psi(\xi_A)|^2 \propto \exp[-|\xi_A|^2/(2\sigma_A^2)]$ is established at this plane with variable standard deviation whose values ensure the isolation of the central opening in (a) and (b), the inclusion of three openings in (c) and (d), and the covering of the complete array in (e) and (f). The axes units are pm for single matter particles and μm for light waves.

The replacement of Eqs. (6) to (8) in (9) leads straightforwardly to

$$\int_D d^2 r_A \Phi(\xi_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) = \int_D d^2 r_A |\Theta(\xi_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)|^2 = 1 \quad (10)$$

and $\int_D d^2 r_A \mathcal{A}(\mathbf{r}_A) = 0$, which implies

$$\int_D d^2 r_A \Phi(\xi_+, \xi_-, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) = 0, \quad (11)$$

at any distance $z \geq 0$ from the M plane.

To discuss the phenomenological meaning and implications of these results, let us look at the graphs $|\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2$ in **figure 2** and $\mathcal{A}(\mathbf{r}_A)$ in **figure 3** for specific but representative examples. According to the specifications in the **figure 2** caption, the boundary condition (a Gaussian light irradiance distribution or a Gaussian quantum probability at the M plane) determines the number of array openings at which the light disturbance or a single particle can enter the MD stage depending on the value of the standard deviation σ_A . In (a), (b), it isolates the central opening at $\xi_A = 0$, thus reducing Eq. (7) to $|\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2 = |\psi(0)|^2 |\iota(0)|^2 \Phi(0, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)$ and Eq. (8) to null. Consequently, the observable recorded by the detector is $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = |\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2$. The same result is obtained by blocking all the openings around the central one. It seems, then, that two or more openings should remain open and be crossed by light disturbances or single particles to obtain non-null values for Eq. (8), although only one opening is crossed in each individual realization.

The kernel mode $\Phi(0, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)$ describes the cone in the MD stage with the vertex at $\xi_A = 0$ (**Figure 2a**), and rotation symmetric cross-section with Lorentzian profile at any distance z from the vertex (**Figure 2b**). The boundary condition $|\psi(0)|^2 |\iota(0)|^2$ denotes the local value of the light energy or the quantum probability of the single particle that emerges from the mask at the cone vertex. The physical observable $|\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2$ i.e., the cross-section of the cone at the D plane, denotes the spatial distribution of the light energy, as well as the quantum probability over the detection area. The normalization in Eq. (10) indicates that: (i) the light energy entering the cone at its vertex will distribute completely in the cone cross-section at any distance from the vertex, or (ii) the single particle that crosses the mask at the cone vertex will move to the D plane within the cone. In other words, the light energy, as well as the single particle, will be confined in the cone volume, so that the cone is actually a well. The Lorentzian cross-section of the well indicates that the light energy concentrates or the single particle moves preferably around the well axis.

In **figure 2c-d**, σ_A grows to cover three openings of the mask placed at $\xi_A = -\mathbf{a}, 0, \mathbf{a}$ so the Lorentzian wells $\Phi(\xi_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)$, with vertices at these three points, appear in the volume of the MD stage. If the nonlocality function at the mask plane nullifies, then the physical observable at the D plane is described by

$$|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = |\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2 = |\psi(-\mathbf{a})|^2 |\iota(-\mathbf{a})|^2 \Phi(-\mathbf{a}, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) + |\psi(0)|^2 |\iota(0)|^2 \Phi(0, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) + |\psi(\mathbf{a})|^2 |\iota(\mathbf{a})|^2 \Phi(\mathbf{a}, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k).$$

This means that the light disturbances or the single particles at the vertex of each well, represented by the boundary condition $|\psi(\xi_A)|^2 |\iota(\xi_A)|^2$, will be confined only within the respective well even if the wells overlap. It should be highlighted that the cross-section of the complete well at a long enough distance from the mask plane in the overlapping region becomes Lorentzian too.

Because of the independent confinements, the set of individual Lorentzian wells is separable. This means that the physical observable $|\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2$ at a given point \mathbf{r}_A on the D plane results by adding the values of the light energy or the single particles confined in each individual well arriving to \mathbf{r}_A , as expressed by Eq. (7). Furthermore, the total light energy or single particles recorded by the detector must equal the energies of the light disturbances or the single particles confined in each individual Lorentzian well (i.e., those that cross their vertices), as expressed by Eq. (9).

This analysis is confirmed by the graphs in **figure 2e-f**, where σ_A is wide enough to cover the complete array, and individual Lorentzian wells with vertices at $\xi_A = -2\mathbf{a}, -\mathbf{a}, 0, \mathbf{a}, 2\mathbf{a}$ should be considered.

Summarizing, the component $|\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2$ of the physical observable $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2$ is also a physical observable at the D plane that allows characterizing the propagation of the light disturbances and the single particles in the MD stage in terms of their confinement in individual Lorentzian wells. These wells are mathematically formalized by the kernel modes $\Phi(\xi_A, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)$, independently from the nature (wave or particle) of the confined physical entity, so that all the Lorentzian wells have the same geometry.

This suggests that the Lorentzian wells are a fundamental geometric behavior of space that is related to the propagation of waves in free space and to single massive particles in field-free regions, which can be observed by measuring the physical observable $|\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2$. The measurement is feasible by completely removing the prepared nonlocality. This observable is the local component of $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2$ in the sense that it relates the wave disturbance or the single particle that crosses the mask only at the vertex of the Lorentzian well with its local detection at any point of the well cross-section at the D plane.

It should be emphasized that the Lorentzian wells cannot mutually modulate spatially, as illustrated in **figure 2c-f**, which means that the overlapping of wells with vertices at different mask openings is not a condition for interference. To produce the interference modulation, the term $\Lambda(\mathbf{r}_A)$ must be added to $|\psi(\mathbf{r}_A)|_R^2$, as expressed in Eq. (6). This relates the nonlocality prepared at the boundary of the MD-stage: $w(\xi_+, \xi_-) \tau(\xi_+, \xi_-)$ with the local detection of light energy or single particles at any point of the well cross-section. In this

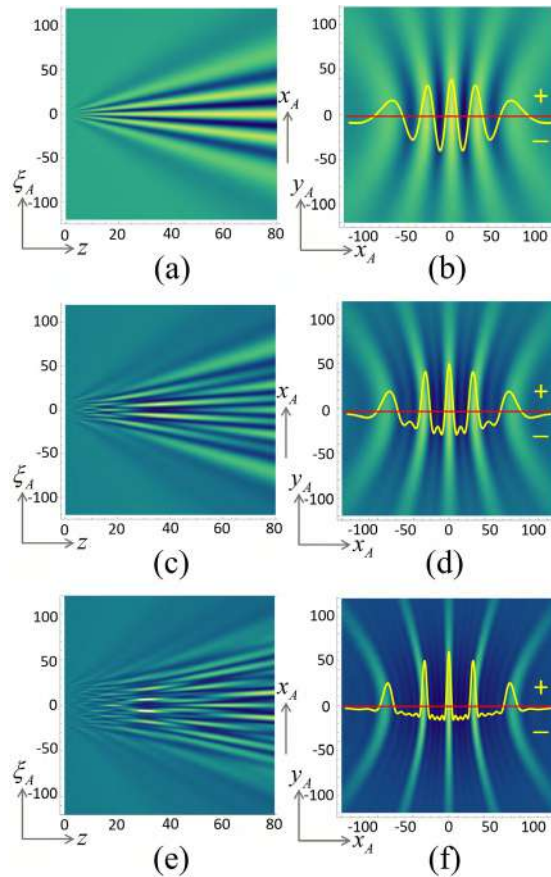


Figure 3. Axial sections for $0 \leq z \leq 20\lambda$ ($\lambda = 4\mu m$ for single matter particles and $4\mu m$ for light waves) on the left column and cross-sections at $z = 20\lambda$ on the right column of $A(\mathbf{r}_A)$ for linear regular arrays of (a), (b) two, (c), (d) three, and (e), (f) five point-openings with a spacing of $a = 3\lambda$ at the M plane (left extreme of the axial sections) under the boundary condition $w(\xi_+, \xi_-) \tau(\xi_+, \xi_-) = 1$. The axes units are pm for single matter particles and μm for light waves.

sense, $\Lambda(\mathbf{r}_A)$ denotes the non-local component of $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2$. More precisely, the prepared nonlocality triggers the spatial oscillations of $\Lambda(\mathbf{r}_A)$ in the volume of the MD stage according to the geometry of the non-local kernel $\Phi(\xi_+, \xi_-, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)$ in Eq. (8), as illustrated in **figure 3**.

Therefore, the prepared nonlocality is the necessary and sufficient condition for interference because it causes the spatial modulation of the individual Lorentzian wells, thus determining specific distributions of confinement zones in their volumes oriented in space by the non-local phase $\alpha(\xi_+, \xi_-) + \phi(\xi_+, \xi_-)$ (Castañeda & Matteucci, 2017, 2019,

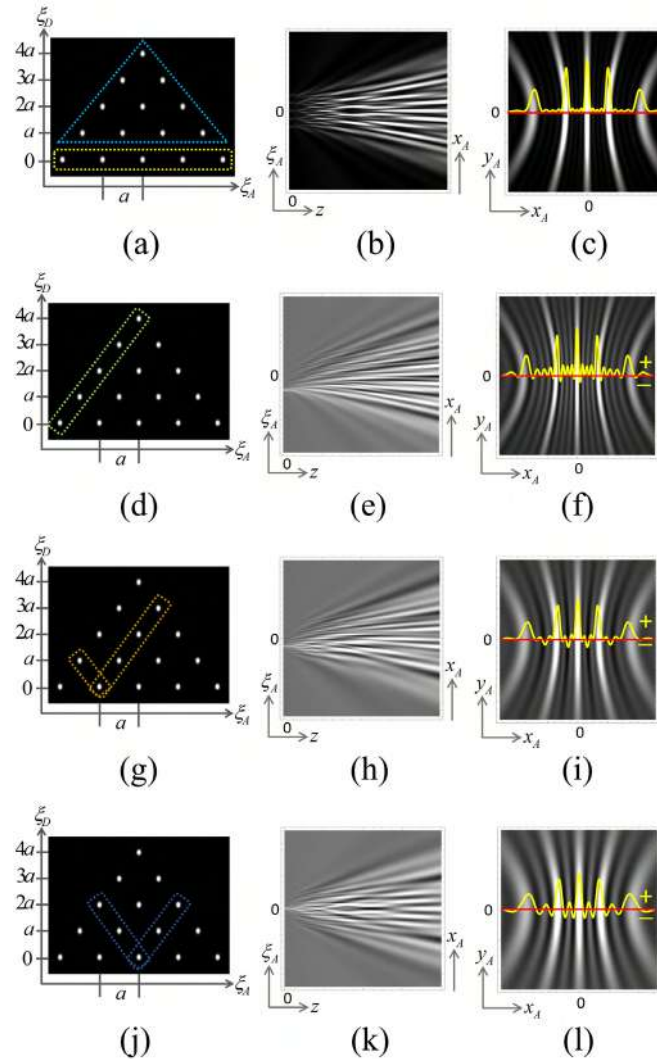


Figure 4. The spectrum of classes of point emitters on the left column for the Lorentzian wells in Figure 2(e), (f) and the geometric potential in Fig. 3 (e), (f). Axial and cross-sections (at $z = 10^3 \lambda$) of spatially-structured Lorentzian wells on the middle and right columns. In (a) the dotted line rectangle for $\xi_D = 0$ encloses the vertices of the individual Lorentzian wells for a mask with a linear array of point openings with a spacing of $a = 3\lambda$ while the triangle encloses the vertices of the 10 geometric potential modes ($\xi_D \neq 0$) under strong nonlocality covering all the mask openings. Graphs (b) and (c) describe the complete well resulting from the overlapping of the five individual spatially-structured wells, three of them, with vertices at $\xi_A = -2a, -a, 0$, are depicted in graphs (d)-(l). The rectangles in the spectra of classes of point emitters in (d), (g), and (j) show the specific subset of four geometric potential modes that modulate the individual Lorentzian well whose vertex is enclosed in the rectangles. Consequently, the resulting individual spatially-structured Lorentzian wells in (e)-(l) exhibit different modulations.

Castañeda et al., 2021). Consequently, the light energy and the single particles will be concentrated in such confinement zones, so that the interference pattern is observed at the cross-section on the D plane of the complete spatially-structured Lorentzian well as it is illustrated in **figure 4**.

Nevertheless, $\mathcal{A}(\mathbf{r}_A)$ is not directly measurable by a squared modulus detector because it is not a positive-definite function and should fulfill the condition in Eq. (11) at any cross-section of the Lorentzian well. Therefore, its only role is to confer a spatial structure to the wells, so that the cross-section of the resulting spatially-structured Lorentzian well at the D plane determines the physical observable denoted by $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2$.

It should be underlined that the non-local kernel is determined by the non-paraxial Green's functions for the MD stage, which depend on the stage configuration independently from the physical and statistical properties of the waves or particles moving in it. In other words, $\Phi(\xi_+, \xi_-, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)$ should be considered as a geometric condition imposed by the setup configuration on the Lorentzian wells. For this reason, the integrand of Eq. (8) is called the "geometric potential" (**Castañeda et al.**, 2020), whose cross-section at the D plane is $\mathcal{A}(\mathbf{r}_A)$.

It is opportune to clarify that the geometric potential differs from the quantum potential introduced by Bohm and Hiley (**Bohm & Hiley**, 1984) in that the quantum potential is specifically deduced from the Schrödinger equation after applying the notion of quantum active information coined by them, while the geometric potential is based only on the geometrical features of the non-paraxial Green's functions of the Helmholtz equation.

It is worth noting that, depending on the vertex positions, the individual Lorentzian wells are modulated by specific subsets of geometric potential modes. This may be appreciated accurately by introducing an analysis tool called the spectrum of classes of point emitters (**Castañeda**, 2016). It is a dot diagram with coordinates (ξ_A, ξ_D) where the dots at positions $(\xi_A, 0)$ represent the vertices of the individual Lorentzian wells while the points at positions $(\xi_A, \xi_D \neq 0)$ represent the vertices of the geometric potential modes associated with each pair of points on the M plane, with the separation vector ξ_D , and the midpoint between them at ξ_A , as shown in **figure 4a**.

In this example, a mask with a linear array of five-point openings is under strong nonlocality covering the array completely, thus activating the maximal number of geometric potential modes, i.e., ten. However, different subsets of only four modes modulate each individual spatially-structured well, as shown by the spectra in (a), (g), and (j).

The vertices of three of the individual wells at $\xi_A = -2\mathbf{a}, -\mathbf{a}, 0$ can be appreciated in their axial sections near the mask at $z = 0$. The positive maxima of their cross-sections in the far field depict the main confinement zones of each individual well separated by secondary positive maxima that depict low confinement zones and by negatively valued zones forbidden for confinement. Indeed, only the positive definite zones in the cross-sections of the individual spatially-structured Lorentzian wells characterize the physical observable measurable by a squared modulus detector that describes the arrivals of the light energy or the single particle that entered the well at its vertex. The important phenomenological role of the forbidden confinement zones is discussed later.

The individual wells with vertices at $\xi_A = \mathbf{a}, 2\mathbf{a}$ are not shown in **figure 4** because they are in mirror symmetry with respect to the optical axis of the wells with vertices at $\xi_A = -\mathbf{a}, -2\mathbf{a}$. The overlapping of the five individual spatially-structured Lorentzian wells renders the complete spatially-structured Lorentzian well whose sections are shown in (b) and (c). The five vertices are apparent in the axial section near the mask and the cross-section profile in the far field has the expected distributions of main confinement regions (the main maxima) separated by three regions of very low confinement (the secondary maxima). It has a discrete set of zeroth points which are the only forbidden points for confinement, i.e., light irradiance or single particles should not be detected at such points. The cross-section of the complete well at any distance $z \geq 0$ is a physical observable that can be measured by the detector.

Summarizing, from the point of view of the confinement principle, the free space (or the free-field regions delimited by the setup) is not Newtonian. Actually, it is a physical system whose geometric states, i.e., the spatially-structured Lorentzian wells, confine the light energy and the single particles. In this sense, the ordinary space acts as an external agent on the light and the particles so the confinement phenomenology is completely causal.

It should be underlined that, in the case of single particles, the confinement principle does not contradict Heisenberg’s uncertainty principle (Feynman *et al.*, 1965), although this subject is beyond this paper and, thus, is not treated here.

¿Is the prepared nonlocality a property of waves and particles?

Usually, nonlocality is described as the spatial-correlation attributes of the optical field called spatial coherence (Born & Wolf, 1993; Mandel & Wolf, 1995) or the quantum wave functions of single particles (Feynman *et al.*, 1965) (Feynman & Hibbs, 1965). In contrast, in the context of the confinement principle, it has been shown that nonlocality at the M plane is a geometric condition prepared in the volume of the SM stage in accordance with the stage configuration (Castañeda *et al.*, 2020, 2021). Indeed, by applying the same reasoning as in Eq. (1), the eigenfunction at each point on the mask plane can be expressed as

$$\psi(\xi_{\pm}) = \int_S d^2 r' \psi(\mathbf{r}'_{\pm}) t(\mathbf{r}'_{\pm}) \Theta(\mathbf{r}'_{\pm}, \xi_{\pm}, \mathbf{z}', k), \quad (12)$$

so that Eq. (4) yields

$$w(\xi_+, \xi_-) = \int_S \int_S d^2 r'_A d^2 r'_D w(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) \tau(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) \Phi(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-, \xi_+, \xi_-, \mathbf{z}', k) \quad (13)$$

for the prepared nonlocality at the M plane, with $\tau(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = t(\mathbf{r}'_+) t^*(\mathbf{r}'_-)$ as the non-local and usually deterministic complex transmission of the S plane, and

$$\Phi(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-, \xi_+, \xi_-, \mathbf{z}', k) = \Theta(\mathbf{r}'_+, \xi_+, \mathbf{z}', k) \Theta^*(\mathbf{r}'_-, \xi_-, \mathbf{z}', k)$$

as the non-local kernel defined for the volume of the SM-stage, which has the Hermitic symmetry

$$\Phi(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-, \xi_+, \xi_-, \mathbf{z}', k) = \Phi^*(\mathbf{r}'_-, \mathbf{r}'_+, \xi_-, \xi_+, \mathbf{z}', k).$$

Therefore, the non-local kernel $\Phi(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-, \xi_+, \xi_-, \mathbf{z}', k)$ is a geometric, time-independent, and deterministic function defined in the SM stage connecting the pairs of points $(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$ at the S plane with the pairs of points (ξ_+, ξ_-) at the M plane. Such a connection is established in accordance with the stage configuration that determines the corresponding Green’s functions and is independent from the non-local product $w(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) \tau(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$ at the S plane. The explicit mathematical form of $\Phi(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-, \xi_+, \xi_-, \mathbf{z}', k)$ is deduced in detail by Castañeda & Matteucci (2019).

Consequently, the overlapping of the kernel modes in Eq. (13), weighted by the non-local product $w(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) \tau(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$ at the S plane, determines a geometrical structure in the SM stage whose cross-section at the M plane is the nonlocality function there.

It is worth noting that the nonlocality function $w(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = \psi(\mathbf{r}'_+) \psi^*(\mathbf{r}'_-)$ at the S plane involves the spatial correlation of the effective source as a boundary condition for the SM stage, i.e., its physical and statistical emission properties which, in turn, yield the statistical appearance of the interference pattern buildup at the D plane. The local component of this nonlocality function, $w(\mathbf{r}'_A, \mathbf{r}'_A) = |\psi(\mathbf{r}'_A)|^2$ for $\mathbf{r}'_D = 0$, denotes the physical observable representing the light irradiance at each point of the effective source, as well as the quantum probability for particle emission at such points.

Equation (13) points out that the non-local product $w(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) \tau(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$ behaves only as a modal filter on the non-local kernel, thus selecting the kernel modes for the pairs of points $(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$ for which $w(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) \tau(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) \neq 0$. Moreover, it also indicates that the spatial correlation of the effective source is not a condition to prepare nonlocality at the mask plane. Indeed, for complete uncorrelated sources, the nonlocality function reduces to its local component and, therefore, the prepared nonlocality at the mask plane becomes

$$w(\xi_+, \xi_-) = \int_S d^2 r' |\psi(\mathbf{r}'_A)|^2 |t(\mathbf{r}'_A)|^2 \Phi(\mathbf{r}'_A, \xi_+, \xi_-, \mathbf{z}', k), \quad (14)$$

with $0 \leq |t(\mathbf{r}'_A)|^2 \leq 1$ being the transmittance of the S plane. In optics, the ensemble average of Eq. (14) is known as the (non-paraxial) Van Cittert-Zernike theorem (**Mandel & Wolf, 1995**) and is conventionally interpreted as the prediction of the spatial coherence gain of an incoherent optical field due to its propagation in free space. In quantum mechanics, this expression seems to refer to a calculation in the Hilbert space instead of a phenomenon in ordinary space. In contrast with optics, the phenomenological quantum description of the particle behavior in ordinary space is significantly limited, and, to some extent, exotic assumptions are assumed for justifying the accuracy of the predictions of experimental outcomes calculated in Hilbert space. Specifically, it is usually assumed that the nonlocality function $w(\xi_+, \xi_-)$ calculated in Eq. (14) indicates the delocalization of the particle when it arrives at the mask in the ordinary space, regardless of the fact that, in accordance with the local boundary condition $|\psi(\mathbf{r}'_A)|^2 |t(\mathbf{r}'_A)|^2$ and the observable $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2$ to be measured by the detector, the particle is considered a local entity at both its emission point on the S plane and its arrival point on the D plane.

The standard interpretation of the Van Cittert-Zernike theorem in optics, as well as the assumption of delocalization of the particle representation in quantum mechanics, have the peculiarity that they are non-causal hypotheses in the sense that they assume changes in the physical attributes of the optical field and the single particles without the action of a physical cause (understanding the term “cause” as an external agent).

However, in the framework of the proposed confinement principle, a unique causal interpretation of Eq. (14) in ordinary space can be formulated to describe in the same way the preparation of nonlocality at the mask for light and single particles. Let us consider the single particle interference where the effective source is completely uncorrelated and the nonlocality preparation at the M plane is as described in Eq. (14). If the effective source is an ideal point source, with $\mathbf{r}'_A = \mathbf{r}'_0$ being the emission point, then $|\psi(\mathbf{r}'_0)|^2 |t(\mathbf{r}'_0)|^2 = 1$ equals to null for $\mathbf{r}'_A \neq \mathbf{r}'_0$, and Eq. (14) reduces to

$$w(\xi_+, \xi_-) = \Phi(\mathbf{r}'_0, \xi_+, \xi_-, \mathbf{z}', k). \quad (15)$$

It has been shown that the kernel mode in Eq. (15) has a conical shape, and is a geometrical and deterministic function in the SM stage called the correlation cone (**Castañeda et al., 2020**). Its vertex is placed at the emission point, its basis covers a region of pairs of points (ξ_+, ξ_-) on the mask and exhibits a Lorentzian cross-section at any distance from the S plane (**Figure 5a, b**). It is apparent in Eq. (15) that the geometric attributes of the correlation cone are due to the non-paraxial Green's functions for the SM stage and are independent of the physical and statistical attributes of the effective source.

It is worth noting that the physical observable describing the arrival of the single particle at a given point of the M plane is the quantum probability

$$w(\xi_A, \xi_A) = |\psi_A(\xi)|^2 = \Phi(\mathbf{r}'_0, \xi_A, \mathbf{z}', k), \quad (16)$$

i.e., the local component of the prepared nonlocality. The kernel mode in Eq. (16) is a Lorentzian well with a vertex at the emission point whose geometrical shape is like that shown in **figure 2a, b**. Therefore, we can conclude that the correlation cone is a geometric deterministic condition established in the volume of the SM stage determined by its configuration. Its cross-section at the M plane gives the prepared nonlocality there independently of the single particle arriving at that plane, so once a single particle is locally emitted at the source plane, its movement towards the M plane (no matter the path it follows) is confined in the Lorentzian well in Eq. (16) and is also contained in the correlation cone in Eq. (15). Consequently, it arrives locally to any point in the cross-section of the Lorentzian well at the M plane, which is non-locally linked only with the other points enclosed by the cross-section of the correlation cone there. Given such specifically prepared non-local links, the corresponding geometric potential modes are activated in the MD stage. Thus, if a mask opening is placed at the arrival point, the geometric potential modes spatially modulate the individual Lorentzian well in the MD stage with the vertex at the mask opening. After crossing it, the particle movement toward the detector will be confined in such a spatially-structured Lorentzian well, and, therefore, the particle delocalization hypothesis is unnecessary.

An extended effective source is composed of a set of emission points with a quantum probability distribution that depends on the emission properties of the source. Each emission point is the vertex of an individual Lorentzian well and of a correlation cone, both in the SM stage. According to Eq. (14), the prepared nonlocality at the M plane results from the overlapping of all the correlation cones, no matter that only one emission point is active in each individual realization. Therefore, the size of the prepared nonlocality support at the M plane is reduced as the effective source size increases, as illustrated by the examples in **figure 5 c-f**. Because of this reduction in the size of the prepared nonlocality support, modes of the geometric potential in the MD stage are filtered out, so that the confinement zones in this stage will not be strongly modulated and contrasted. This was evident in the experimental results of interference with single electrons (**Matteucci et al., 2013**) as a loss of the pattern visibility with single fullerene molecules (**Nairz et al., 2003**) with a cosine-like shape in the interference pattern, although a grating was attached at the

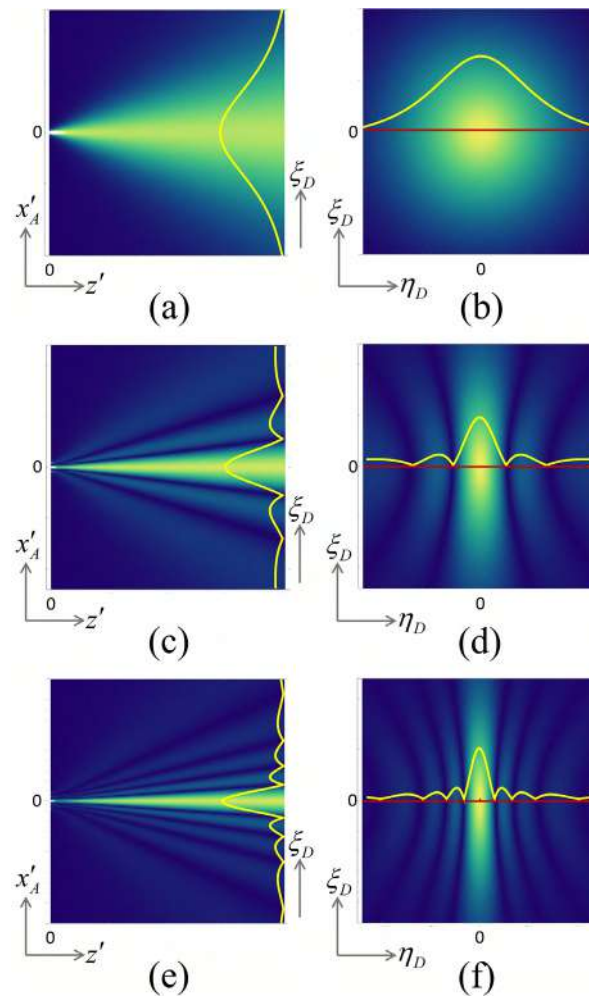


Figure 5. Correlation cones in the SM stage for spatially incoherent optical sources or uncorrelated single massive particle sources attached at the S plane. Axial sections for $0 \leq z \leq 10\lambda$ ($\lambda = 4\mu\text{m}$ for single matter particles and $4\mu\text{m}$ for light waves) on the left column and cross-sections at $z = 10\lambda$ on the right column for (a), (b) a point source, (c), (d) a source with two emission points, and (e), (f) an extended source with a regular array of five equivalent emission points with a spacing of $a = \lambda/2$. (ξ_D, η_D) are the Cartesian coordinates of the separation vectors at the M plane. The nonlocality support is mainly determined by the central main maximum of the profiles and is centred in all cases at $\xi_A = 0$. The axes units are pm for single matter particles and μm for light waves.

M plane, and with other molecules (**Juffmann *et al.*, 2012**) as a strong loss of contrast in the interference pattern. The analysis of these results in the framework of the current model was reported by **Castañeda & Matteucci (2017)**.

This description is also valid for spatially incoherent optical fields, although all the emission points of the extended effective source can be continuously and simultaneously active, as fairly established by Wolf in his spatial coherence theory (**Born & Wolf, 1993; Mandel & Wolf, 1995**). Therefore, the Lorentzian well is completely filled by the source emissions, so that $|\psi(\mathbf{r}'_A)|^2$ and $|\psi(\xi_A)|^2$ describe the irradiance distributions over the effective source and the mask, respectively.

This analysis emphasizes that the prepared nonlocality at the M plane seems not to be a physical or statistical property of the light or the single particles, but a condition established by the setup configuration. The influence of the spatial correlation properties of the effective source on the nonlocality preparation restricts to specifying and weighing the set of the non-local kernel modes in the integrand of Eq. (13).

Additionally, the local component of Eq. (13) specifies the physical observable $w(\xi_A, \xi_A) = |\psi(\xi_A)|^2$ that describes the prepared distribution of the light irradiance or the single particles arriving at the M plane. It is the cross-section of the spatially-structured Lorentzian wells overlapped in the SM stage. The nonlocality properties of the effective source denoted by $w(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$ activate the geometric potential that modulates the wells in the same way as in the MD stage with the prepared nonlocality at the mask. By following the same reasoning as in Eq. (6) and setting $\xi_D = 0$, Eq. (13) yields $|\psi(\xi_A)_R|^2 = |\psi(\xi_A)_R|^2 + A(\xi_A)$, with

$$|\psi(\xi_A)_R|^2 = \int_S d^2r'_A |\psi(\mathbf{r}'_A)|^2 |t(\mathbf{r}'_A)|^2 \Phi(\mathbf{r}'_A, \xi_A, \mathbf{z}', k)$$

and

$$A(\xi_A) = 2 \int_S \int_S d^2r'_A d^2r'_D |w(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)| |\tau(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)| \\ \times \text{Re} [\Phi(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-, \xi_A, \mathbf{z}', k) \exp[i \alpha(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) + i \phi(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)]],$$

whose phenomenological meanings in the context of the confinement principle for the SM stage are similar to those of the corresponding expressions for the MD stage given respectively by Eqs. (7) and (8).

Summarizing, the nonlocality function is geometrically prepared at the mask plane, i.e., its shape and size are closely related to the kernel modes, which are determined by the non-paraxial Green's functions for the SM stage, independently from the physical and statistical emission properties of the effective source. Nevertheless, such source features confer a statistical appearance to the recording of single particle arrivals and light irradiance by the detector without altering the geometry of the correlation cones and the spatially-structured confinement in the wells. This phenomenology in ordinary space clearly differs from the standard formalisms that describe nonlocality features in terms of the spatial correlation functions attributed to the light in free space or the representation of the particle beams in the Hilbert space.

¿Is the confinement entangled?

Since the notion of entanglement of quantum states was pointed out as a paradox by Einstein, Podolsky, and Rosen in a celebrated paper (**Einstein *et al.*, 1935**), it has motivated strong discussions in different contexts of physics. For instance, it inspired the formulation of a hidden-variable theory (**Bohm, 1952 a, b**), a theorem to verify the existence of entanglement from experimental data (**Bell, 1964**), experiments to demonstrate its existence (**Bohm & Aharonov, 1957; Freedman & Clauser, 1972; Aspect *et al.*, 1982; Aspect, 2015**), and contemporary technological perspectives (**Paneru *et al.*, 2020**) including quantum computation, teleportation, quantum encryption, and telecommunications. In all these topics, as well as in the multiple scenarios in which different types of entanglement have been identified (**Paneru *et al.*, 2020**), the notion of entanglement denotes non-separable

quantum states of physical systems, such as photons and massive particles, for which the measurement on one state affects the other states without interaction between the systems (Bhaumik, 2018; Paneru *et al.*, 2020), a behavior that Einstein called the “spooky action at a distance” (Born, 1971).

From the perspective of the proposed confinement principle for interference, the spatially-structured Lorentzian wells have been characterized as the behavior of free space related to (but independent from) the propagation of waves and massive particles between specific planes. More precisely, the Lorentzian wells are the behavior of ordinary space in the absence of prepared nonlocality at the input plane so the geometric potential is not activated. In the presence of prepared nonlocality, the activated geometric potential modulates the Lorentzian wells, thus establishing the spatially-structured wells.

Therefore, free space is regarded as a physical system that is able to confine the propagation of light energy as well as of single particles in spatially-structured wells. Furthermore, such wells characterize the geometrical states of free space whose attributes can be controlled by means of the prepared nonlocality. Consequently, a mask establishes a set of free-space geometrical states in the volume of the MD stage, each one corresponding to an individual Lorentzian well which is spatially structured by the subset of geometric potential modes activated by the prepared nonlocality. A peculiar feature of these states seems to approach the entanglement scenarios.

Let us consider the individual spatially-structured Lorentzian wells under strong nonlocality. As shown in section 2, each well must have forbidden regions (Figure 4) that reduce the confinement in the other wells, even to null at specific points. Thus, independent confinement regions are established in the complete spatially-structured well whose cross-section at the D plane gives a highly contrasted interference pattern. In other words, because of the spatial distribution of the forbidden regions in the individual wells, the set of free-space states is not separable, and the confinement in each one is affected by the other ones.

This can be clearly appreciated by considering the Young interference with a double pinhole mask with a separation vector \mathbf{a} . Each individual Lorentzian well and the corresponding geometric potential are given, respectively, by the integrands of Eqs. (7) and (8), which can be denoted as $|\Gamma(\pm\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)|^2$ and

$$(1/2)(\Gamma(\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Gamma^*(-\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) + \Gamma^*(\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Gamma(-\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)),$$

with

$$\Gamma(\pm\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) = \psi(\pm\mathbf{a}/2) t(\pm\mathbf{a}/2) \Theta(\pm\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k).$$

So, the cross-section of each individual spatially-structured Lorentzian well at the D plane is given by

$$\begin{aligned} L(\pm\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A) &= |\Gamma(\pm\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)|^2 \\ &+ (1/2) (\Gamma(\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Gamma^*(-\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \\ &+ \Gamma^*(\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Gamma(-\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)). \end{aligned} \quad (17)$$

Equation (17) has remarkable mathematical and physical features. It is a non-factorable expression that is measurable at the points \mathbf{r}_A on the D plane and fulfills the condition $L(\pm\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A) \geq 0$, in the sense that a squared modulus detector can record the confined light energy or the single particles at such points. The points \mathbf{r}_A for which $L(\pm\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A) < 0$ determines forbidden regions and the squared modulus detector cannot record light energy or single particles there. So, the “measurability” of $L(\pm\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A)$ is ensured by the condition

$$\begin{aligned} |\Gamma(\pm\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)|^2 &\geq 1/2 |\Gamma(\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Gamma^*(-\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \\ &+ \Gamma^*(\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Gamma(-\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)| \end{aligned} \quad (18)$$

with

$$(\Gamma(\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Gamma^*(-\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) + \Gamma^*(\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k) \Gamma(-\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A, \mathbf{z}, k)) < 0$$

Nevertheless, the physical observable

$$|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 = L(\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A) + L(-\mathbf{a}/2, \mathbf{r}_A) \geq 0 \quad (19)$$

is always measurable by a squared modulus detector. This indicates that the two individual spatially-structured Lorentzian wells $L(\pm a/2, \mathbf{r}_A)$ are non-separable to ensure the measurement of the interference pattern at the D plane and, additionally, $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 < L(\pm a/2, \mathbf{r}_A)$ for $L(\mp a/2, \mathbf{r}_A) < 0$. This means that the forbidden regions of everyone well overlap the confinement regions of the other well. Consequently, the negative values of the forbidden zones of every well reduce the confinement in the other well.

Therefore, a peculiar behavior can be predicted. Let us start with a weak enough prepared nonlocality at the M plane, so that the forbidden zones are removed in the individual spatially-structured wells and $L(\pm a/2, \mathbf{r}_A) > 0$. Under this condition, the two wells are separable in the sense that $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2$ can be determined by separated positive definite contributions measured at everyone well. The predicted outcome is a low contrasted interference pattern at the D plane for which $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2 > L(\pm a/2, \mathbf{r}_A)$. Now, let us increase the prepared nonlocality at the M plane. The geometry of the geometric potential mode remains invariant, but at the time when the forbidden zones appear in one of the individual wells, the confinement in the other well is reduced at the same place of the forbidden zone and in the same amount. This simultaneous effect in two different spatially-structured wells is caused by an action applied at a distant place, actually at the S plane of the SM stage, where the prepared nonlocality at the M plane is controlled. Furthermore, because of the mirror symmetry of the individual spatially-structured Lorentzian wells, the same reduction in confinement occurs symmetrically in both wells because of the appearance of symmetrical forbidden zones in them induced by the same geometric potential mode. Thus, the measurement of the reduced confined light energy or the single particles at a given point in one of the individual wells should reveal the simultaneous reduction of the confined light energy or the single particles by the same amount at the symmetric point in the other individual well.

This behavior of the Young interference is illustrated in **figure 6a, c**. The dotted line profiles are the cross-sections of the individual spatially-structured Lorentzian wells given by Eq. (17), and the continuous line profile results from their overlapping, as denoted in Eq. (19). Near the mask, the forbidden zones in both individual wells are denoted by the negative values of their profiles. It is worth noting that the confinement of each well

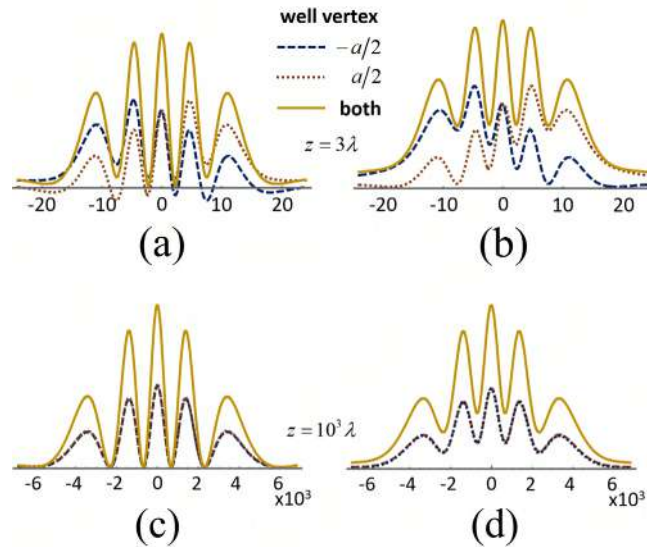


Figure 6. Spatial entanglement in Young interference. The cross-sections of the individual spatially-structured Lorentzian wells and their overlapping are shown (a) near the M plane and (c) in the far field. Removing the spatial entanglement by weakening the prepared nonlocality (b) near the M plane and (d) in the far field. The units are arbitrary.

is reduced in the segment coinciding with the forbidden zones of the other well, so that $|\psi(\mathbf{r}_A)|^2$ takes on values between the individual profiles. In the far field, the forbidden zones reduce to null points of the profiles at the same positions on the D plane. It should be emphasized that this crucial feature of the geometric states of the space has not been explicitly described in the standard interference formalisms.

The forbidden zones can be removed by weakening the nonlocality suitably, as shown in **figure 6 b, d**. Consequently, the mutual influence on the confinement in each individual well disappears and the geometric states of the free space become separable, i.e., the confinement in each well only depends on its own spatial structure.

The analysis above suggests that a new type of entanglement involves the two spatially-structured Lorentzian wells that we call spatial entanglement. Such entanglement is controlled from outside the MD stage and manifests as the symmetrical reduction of the confinement in each well because of the forbidden zones in the other well. It should be noted that spatial entanglement is not a condition to build-up interference, but it is required for high-contrasted interference.

Physical observables describing the exact predictions of the confinement in the individual spatially-entangled wells can be obtained by simply adjusting the confinement zones in accordance with the forbidden zones as illustrated in **figure 7**. The predictions (continuous-line profiles) are compared with the original profiles of $L(\pm a/2, \mathbf{r}_A)$ (dotted-line profiles). Near the mask in (a) and (b), the forbidden zones of each $L(\pm a/2, \mathbf{r}_A)$ are set to null in the prediction profile, and their negative values are added to the confinement zones of the other well, so that the predicted values there become smaller than the profile values of $L(\pm a/2, \mathbf{r}_A)$. Outside the forbidden zones, the values of $L(\pm a/2, \mathbf{r}_A)$ predict the confinement in the well. This coincidence is complete in the far field, (c) and (d), where the forbidden zones of the individual wells reduce to only the null points of their cross-sections.

The measurement of the predicted confinement in spatially-entangled wells, as those illustrated in **figure 7**, should be regarded as a strong experimental challenge, not only because of the requirement of non-paraxial technology but also (and more importantly) because it involves measurements on the cross-section of each individual spatially-structured Lorentzian well. To make it possible, an experimental procedure different from the quantum eraser (Scully & Zubairy, 1997) should be implemented as this experiment precludes the simultaneous determination of the mask opening crossed by a

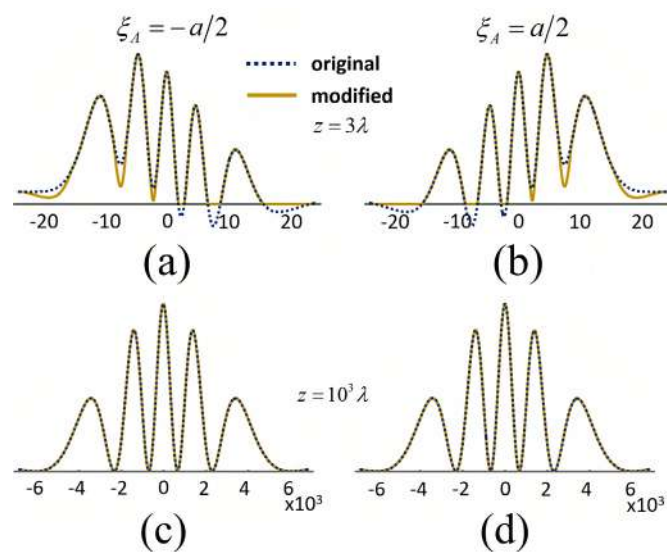


Figure 7. Effective confinement predictions obtained by modifying the individual spatially-entangled wells in accordance with the distribution of the forbidden zones (a), (b) near the M plane, and (c), (d) in the far field. The units are arbitrary.

particle, specifically a photon, and the detection of the interference pattern by the detector. Therefore, the quantum eraser setups are not suitable to verify the predictions depicted in **figure 7**, which renders this measurement extremely challenging.

Summary and conclusions

The phenomenology based on the novel principle of confinement in spatially-structured Lorentzian wells was discussed in detail. Its main advantage is to offer a unified and causal description of interference with classical waves and single massive particles in ordinary space. Instead of characterizing interference with waves and single particles by conferring them certain physical features, we assume the free space (or the field-free regions delimited by a setup) as a physical system with geometrical states capable of confining the light energy and the single particles in volumetric spatial structures whose cross-sections determine the interference patterns.

In contrast with the standard formalisms, this model accounts for individual experimental realizations where the emission, the crossing through the mask, and the detection are local events for both waves and particles. Nevertheless, a peculiar geometric feature of free space, called nonlocality, appears as the cause of interference. Instead of an attribute of the waves or the particles, nonlocality is prepared by the configuration of the setup. Furthermore, by strongly prepared nonlocality, the free-space geometrical states seem to become spatially entangled, i.e., the forbidden zones of each individual spatially-structured Lorentzian well affect the confinement in the other individual wells, thus ensuring the build-up of high-contrasted interference patterns. The spatial entanglement is removed by suitably weakening the prepared nonlocality.

It should be emphasized that this model is rigorously based on the solution of the Helmholtz equation (i.e., the spatial component of both the classical wave equation for free space and the Schrödinger equation for field-free regions) using Green's theorem, and relates Green's function to the geometric states of free space. It seems to be the starting point of its departure from the standard classical and quantum formalisms of interference without affecting its accuracy in predicting experimental outcomes.

So, in the phenomenology of the confinement in spatially-structured Lorentzian wells, duality hypotheses like particle delocalization and self-interference are unnecessary. A further important feature of the proposed model is the simultaneous presence of the Lorentzian wells and the correlation cones in the volume of the preparation stage of the setup. Following the same reasoning, it can also be established in the measurement stage. It should be underlined that this feature questions the requirement of wave function "collapse" as the local measurement of the arrival of a single particle at the detector is performed. Indeed, squared modulus detectors perform local measurements only on the cross-section of the Lorentzian well without affecting the nonlocality in the detection area and demand that the eigenfunction does not nullify when the local measurement is performed.

Acknowledgements

The author is in debt with Giorgio Matteucci (Università degli Studi di Bologna, Italy), Jaime Moreno, and Julián Laverde (*Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín*) for discussing this paper.

Conflicts of interest

The author declares that he does not have any conflict of interest.

References

- Aspect, A., Dalibard, J., Roger, G. (1982) Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review*, 49, 1804-1807.
- Aspect, A. (2015) Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate. *Physics*, 8, 123.
- Arfken, G. (1970) *Mathematical Methods for Physicists* (2nd ed. New York: Academic Press).

- Bach, R., Pope, D., Sy-Hwang L., Batelaan, H.** (2013) Controlled double-slit electron diffraction. *New Journal of Physics* 15, 033018.
- Bhaumik, M.L.** (2018) How Does Nature Accomplish Spooky Action at a Distance? *Quanta*, 7, 111-117.
- Bell, J.S.** (1964) On the Einstein, Podolsky and Rosen paradox. *Physics*, 1, 195-200.
- Bohm, D.** (1952) A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. I. *Physical Reviews*, 85, 166-179.
- Bohm, D.** (1952) A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. II. *Physical Reviews*, 85, 180-193.
- Bohm, D., Aharonov, Y.** (1957) Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen and Podolsky. *Physical Reviews*, 108, 1070-1076.
- Bohm, D., Hiley, B.J.** (1984). Measurement understood through the quantum potential approach. *Foundations of Physics*, 14, 255-274.
- Born, M.** (ed.) (1971). The Born Einstein Letters 221 (London: Macmillan).
- Born, M., Wolf, E.** (1993) Principles of Optics (6th ed.). Oxford: Pergamon Press.
- Castañeda, R.** (2016). Spectrum of classes of point emitters of electromagnetic wave fields. *Journal Optical Society of America, A* 33, 1769-1776.
- Castañeda, R., Matteucci, G.** (2017). New physical principle for interference of light and material particles. Hawkes, P.H. editor, Advances in Imaging and Electron Physics, Vol. 204, London: Elsevier – Academic Press, Ch. 1.
- Castañeda, R., Matteucci, G.** (2019). Geometric model for interference and diffraction with waves and particles. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43, 177-192.
- Castañeda, R., Matteucci, G., Capelli, R.** (2016). Interference of Light and of Material Particles: A Departure from the Superposition Principle. Hawkes, P.H. editor, Advances in Imaging and Electron Physics, Vol. 197, Burlington: Academic Press, p. 1-43.
- Castañeda, R., Matteucci, G., Capelli, R.** (2016). Quantum Interference without Wave-Particle Duality. *Journal of Modern Physics*, 7, 375-389.
- Castañeda R., Moreno, J., Colorado, D., Laverde, J.** (2020). 3D non-paraxial kernel for two-point correlation modelling in optical and quantum interference at the micro and nano- scales. *Physica Scripta*, 95, 065502.
- Castañeda, R., Bedoya, P., Matteucci, G.** (2021). Non-locality and geometric potential provide the phenomenology of the double-hole single massive particle and light interference. *Physica Scripta*, 96, 125036.
- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N.** (1935). Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47, 777.
- Feynman, R., Leighton, R., Sands, M.** (1965). The Feynman Lectures on Physics vol. 3 (Menlo Park: Addison–Wesley).
- Feynman, R., Hibbs, A.** (1965). Quantum Mechanics and Path Integrals (New York: McGraw-Hill).
- Freedman, S.J., Clauser, J.F.** (1972). Experimental test of local hidden-variable theories. *Physical Review*, 28, 938-941.
- Juffmann, T., Milic, A., Muellneritsch, M., Asenbaum, P., Tsukernik, A., Tuexen, J., Arndt, M.** (2012). Real-time single-molecule imaging of quantum interference. *Nature Nanotechnology*, 7, 297-300.
- Mandel, L., Wolf, E.** (1995). Optical Coherence and Quantum Optics (Cambridge: Cambridge University Press).
- Matteucci, G.** (2011). On the presentation of wave phenomena of electrons with the Young–Feynman experiment. *European Journal of Physics*, 32, 733-738.
- Matteucci, G., Pezzi, M., Pozzi, G., Alberghi, G., Giorgi F., Gabrielli, A., Gazzadi, G.** (2013). Build-up of interference patterns with single electrons. *European Journal of Physics*, 34, 511-517.
- Nairz, O., Arndt, M., Zeilinger, A.** (2003). Quantum interference experiments with large molecules. *American Journal of Physics*, 71, 319-325.
- Tavabi, A.H., Boothroyd, C.B., Yücelen, E., Frabboni, S., Gazzadi, G.C., Dunin-Borkowski, R.E., Pozzi, G.** (2019). The Young-Feynman controlled double-slit electron interference experiment. *Scientific Reports*, 9, 10458.
- Paneru, D., Cohen, E., Fickler, R., Boyd, R.W., Karimi, E.** (2020). Entanglement: quantum or classical? *Report Progress in Physics*, 83, 064001.
- Scully, M.O., Zubairy, S.** (1997). Quantum Optics (Cambridge: Cambridge University Press).

Artículo de revisión

Óptica y fotónica: ciencia y tecnología de la luz

Optics and photonics: Light science and light technology

Angela María Guzmán Hernández

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

Artículo presentado como requisito para ser admitida como académica de número

Resumen

Este artículo de revisión presenta el panorama actual de las múltiples tecnologías basadas en la luz que se han hecho indispensables en nuestra vida diaria y que seguirán teniendo impacto en ella y en la economía mundial. Con el objetivo de motivar la formulación de un plan nacional de desarrollo de la investigación y apropiación de la tecnología fotónica en Colombia, se presentan los propósitos generales de algunas iniciativas regionales y nacionales de investigación y desarrollo en óptica y fotónica.

Palabras clave: Óptica; Fotónica; Óptica cuántica; Óptica atómica; Plasmónica.

Abstract

This review article presents an overview of the many light-based technologies that have become indispensable in our daily lives and will continue to impact them, as well as the world economy. To motivate the formulation of a national plan for the development of the research and appropriation of photonics technology in Colombia, the general purposes of some regional and national research and development initiatives in optics and photonics are presented.

Keywords: Optics; Photonics; Quantum optics; Atom optics; Plasmonics.

Citación: Guzmán Hernández AM.
Óptica y fotónica: ciencia y tecnología de la luz. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):920-938, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1748>

Editor: Román Eduardo Castañeda-Sepúlveda

Correspondencia:
Angela María Guzmán Hernández;
amguzmanh@unal.edu.co

Recibido: 14 de agosto de 2022
Aceptado: 4 de noviembre de 2022
Publicado en línea: 25 de noviembre de 2022

Introducción

La luz, su naturaleza y su manipulación han intrigado desde siempre la mente humana. Cada avance en nuestra habilidad de controlar y utilizar la luz ha dado origen a nuevas áreas del conocimiento y al desarrollo de tecnologías innovadoras. Es difícil imaginar nuestra vida diaria sin las tecnologías nacidas de la ciencia de la luz, la óptica y la fotónica. Según la definición de Photonics21 (**Photonics21**, 2019), la fotónica incluye las ciencias y las técnicas de generación, emisión, detección, recolección, transmisión, modulación y amplificación de haces de fotones desde la banda de THz (mínimo: 200 GHz) a los rayos X.

El láser, fuente artificial de luz con propiedades de coherencia e intensidad sin parangón en las fuentes de luz naturales, cambió nuestra concepción sobre la coherencia y la interacción de la luz con la materia. Roy Glauber elaboró la teoría cuántica de la coherencia óptica (**Glauber**, 1963) partiendo del concepto clásico de coherencia de primer orden para arribar a la coherencia de campo en todos los órdenes característica del láser. Con ello sentó las bases de la óptica cuántica y se hizo acreedor al Premio Nobel de Física en el 2005.

En 1931, Maria Göppert-Mayer (segunda mujer en recibir el Premio Nobel de Física por el modelo de capas nucleares en 1963), calculó en su tesis de doctorado la probabilidad de absorción y emisión de dos fotones (**Göppert-Mayer**, 1931) y concluyó que con las fuentes de luz disponibles entonces tales transiciones eran extremadamente improbables. Peter Franken comprendió que con la intensidad del láser tales procesos deberían ser observables y logró en 1961 la generación del segundo armónico del láser de



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

rubí (**Franken et al.**, 1961). Casi simultáneamente, Nicolaas Bloembergen (Premio Nobel de Física 1981) y sus colaboradores desarrollaron la teoría de los procesos no lineales, en particular la mezcla de ondas para generar luz coherente en un amplio rango de frecuencias incluyendo el infrarrojo y el ultravioleta. Así nacieron la óptica no lineal y sus aplicaciones en espectroscopía.

Con el láser y su gran direccionalidad nació también la posibilidad de manipular átomos y iones con luz, en lo que hoy conocemos como óptica atómica (**Guzmán**, 1998), cuyos inicios se dieron con las técnicas de enfriamiento de átomos mediante láser. En 1984 se realizó la “Primera Conferencia Internacional de enfriamiento láser”, a la cual asistí como estudiante de doctorado. La foto de la **figura 1** de los participantes en este evento fue tomada por William Phillips, quien la incluyó en su conferencia de aceptación del Premio Nobel (**Phillips**, 1998), y publicada en el libro de los Premios Nobel 1997 (**Phillips**, 1997).

En esa ocasión, dos futuros Premios Nobel, William Phillips y Claude Cohen-Tannoudji, discutían con otros participantes los procesos físicos involucrados en el enfriamiento de átomos con láser. Yo estaba terminando entonces mi tesis de doctorado sobre procesos no lineales en vapores atómicos bombeados mediante una transición de dos fotones (**Guzmán de García**, 1984) y asistía al nacimiento de una nueva área de la física, la cual condujo al descubrimiento de un nuevo estado de la materia, el condensado de Bose-Einstein (**Davis et al.**, 1995) y, más recientemente, a la concreción experimental de la condensación continua de Bose-Einstein o láser de átomos (**Chen et al.**, 2022).

El Premio Nobel de Física de 1997 fue otorgado conjuntamente a Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji y William D. Phillips “por el desarrollo de métodos para enfriar y atrapar átomos con luz láser”. Su trabajo permitió incrementar apreciablemente la precisión metrológica del tiempo con el desarrollo de relojes atómicos que trabajan con fuentes de átomos fríos, así como la precisión en la medición de distancias, lo que ha hecho posible el sistema actual de posicionamiento global (GPS).

Este año el premio Nobel de Física fue otorgado a Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger, “por sus experimentos con fotones imbricados, estableciendo la violación de las desigualdades de Bell y siendo pioneros en la ciencia de la información cuántica”. La historia comienza en 1935, cuando Einstein, Podolsky y Rosen publicaron su famoso artículo titulado “¿Puede considerarse completa la descripción cuántica de



Figura 1. Participantes en la “Primera Conferencia Internacional de Enfriamiento Laser” organizada por Stig Stelholm en Tvärmine, Finlandia, en marzo de 1984. En la fila de atrás de izquierda a derecha: Juha Javanainen, Markus Lindberg, Stig Stenholm, Matti Kaivola, Nis Bjerre, (no identificado), Erling Riis, Rainer Salomaa, Vladimir Minogin. En la primera fila: Jürgen Mlynek, Angela Guzmán, Peter Jungner, Wolfgang Ertmer, Birger Ståhlberg, Olli Serimaa, Jean Dalibard, Claude Cohen-Tannoudji, Victor Balykin. Reproducida con licencia RNP/22/SEP/058488 de la APS.

la realidad física?” (**Einstein et al.**, 1935), que dio origen a una búsqueda de décadas de las denominadas variables ocultas que permitirían determinar con certeza, y no solo probabilísticamente, el resultado de una medición en sistemas cuánticos imbricados (entrelazados). Si los conceptos de realidad y localidad de las propiedades físicas de un sistema fuesen válidos, a la mecánica cuántica le faltaría considerar tales variables y por ello sería una teoría incompleta.

Durante décadas no se vislumbró una forma de confrontar experimentalmente las predicciones de las teorías de variables ocultas con las de la mecánica cuántica. En la década de 1960, John Stewart Bell desarrolló una desigualdad matemática para las teorías de variables ocultas (HVT), la cual impone un límite a la correlación entre resultados de un gran número de mediciones, y sería violada por la mecánica cuántica. **Clauser et al.** (1969) propusieron un experimento real para probar las HVT y formularon una desigualdad de Bell en términos de coincidencias de detección de pares de fotones en un estado imbricado de polarización originado en una transición atómica de dos fotones. Los fotones viajan en direcciones opuestas, cada uno atraviesa un polarizador y se miden las coincidencias de detección del par de fotones en diferentes configuraciones de la orientación de los polarizadores.

A comienzos de la década de 1980, **Aspect et al.** (1982) realizaron una serie de experimentos que zanjaron la discusión, mostrando inequívocamente la violación de la desigualdad de Bell, incluso cambiando la orientación de los polarizadores después de la emisión del par de fotones para evitar la justificación de que el átomo pudiera tener conocimiento del arreglo experimental antes de la emisión. Entonces yo iniciaba mi doctorado y mi primera charla científica de doctorado fue sobre este tema.

Anton Zeilinger, Daniel Greenberger y Michael Horne introdujeron en 1990 (**Bouwmeester et al.**, 1999) los estados imbricados de tres fotones, o estado de Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ), abriendo el camino para la nueva era de tecnologías basadas en la información cuántica que requiere estados imbricados de múltiples qubits: teleportación, computación y criptografía cuánticas. El 29 de septiembre de 2017 se realizó la primera videoconferencia segura con encriptación cuántica entre Viena y Beijing como resultado de un proyecto iniciado en el 2013 que utiliza un satélite chino para realizar experimentos de física cuántica entre la Tierra y el espacio.

Es innegable que la ciencia de la óptica y la fotónica ha cambiado nuestra visión de la naturaleza y nuestra concepción del universo y ha hecho posible la confrontación y corroboración experimental de las teorías físicas fundamentales, constituyéndose simultáneamente en la base de una miríada de tecnologías modernas.

Esta revisión versa sobre las múltiples tecnologías y aplicaciones de la óptica y la fotónica y, especialmente, su impacto en la economía mundial, que ha conducido a la formulación de algunas iniciativas regionales y nacionales en óptica y fotónica. Se presentan sus objetivos primordiales, así como una propuesta justificada de elaboración de un plan nacional de desarrollo en óptica y fotónica adecuado a las necesidades de Colombia.

Tecnologías basadas en la luz

La óptica y la fotónica, además de haber originado nuevas tecnologías e industrias, provee herramientas fundamentales que facilitan y hacen posible el desarrollo de otras ciencias e ingenierías. En áreas sin aparente aplicación comercial directa, pero fundamentales para el avance de la física y la química, tenemos los pulsos láser ultracortos (femto-segundos) para la observación (**B. Guo et al.**, 2019) y el control (**Jiang et al.**, 2017) de la dinámica de electrones en micro y nanofabricación y la ciencia de attosegundos para la obtención de imágenes de procesos electrónicos (**Calegari et al.**, 2016) en física atómica, molecular y de estado sólido. La luz también tiene un papel preponderante en la definición de nuestras unidades de medida de tiempo y espacio y, por ende, en la tecnología del GPS.

Según la Sociedad Internacional de Óptica y Fotónica, SPIE (**SPIE**, 2022), solo el 6,2 % de los profesionales en óptica y fotónica pertenece a la disciplina de la física, en tanto que el 64 % corresponde a ingenieros (**Figura 2**).

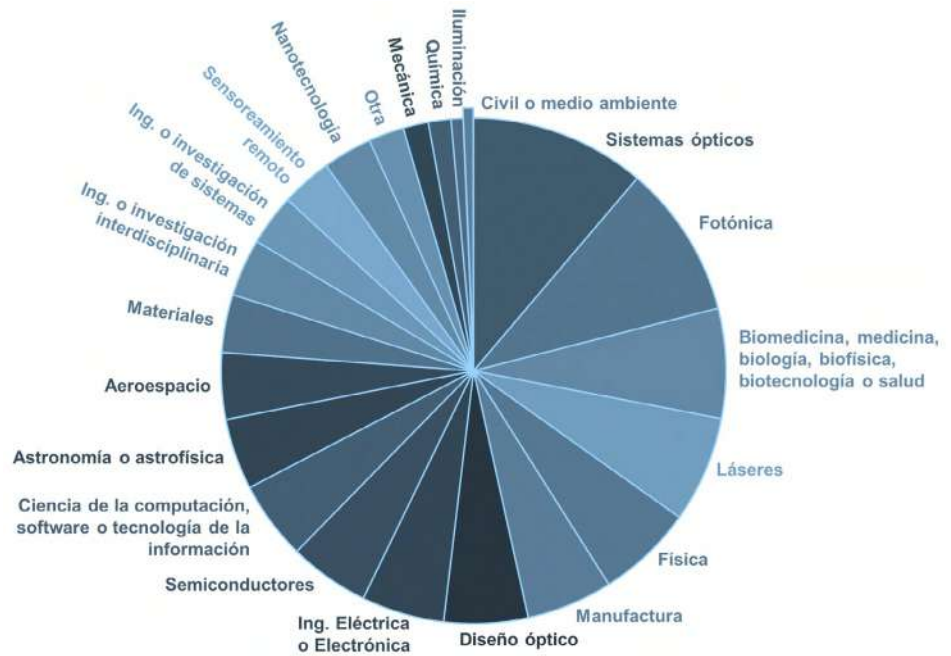


Figura 2. Disciplina primaria de profesionales de la óptica y la fotónica. Datos tomados de SPIE (2022).

La óptica y la fotónica están convirtiéndose en una disciplina *per se*. Los centros de investigación más relevantes en este campo en los Estados Unidos ofrecen programas de pregrado en esta área: The College of Optics and Photonics-CREOL de la Universidad de Florida Central ofrece el título de *Bachelor of Science* en ciencias e ingeniería fotónica; el James C. Wyant College de Ciencias Ópticas de la Universidad de Arizona lo ofrece en ciencias ópticas e ingeniería, y el Instituto de Óptica e Ingeniería Óptica de la Universidad de Rochester en óptica e ingeniería óptica. Por ello resalto aquí la importancia que ha adquirido la óptica en la ciencia y la tecnología a partir del descubrimiento del láser, y su carácter multidisciplinario e interdisciplinario. La fotónica está presente en la iluminación de bajo consumo, las cámaras, las imágenes satelitales, la fabricación aditiva, la cirugía láser, la detección, la comunicación, el entretenimiento, los sensores, el control, la aviación y muchos más dispositivos. Sin la fotónica no tendríamos internet de alta velocidad, ni cámaras en los celulares, ni grandes pantallas de televisión.

La posibilidad de miniaturización de elementos ópticos, su integración en chips de óptica integrada y la fabricación de microestructuras y nanoestructuras fotónicas nos han dotado de diversas fuentes de luz, instrumentos y métodos de medición de alta precisión y resolución, sensores biológicos y de monitoreo del medio ambiente, además de equipos de telecomunicación de gran capacidad y máxima seguridad. En la **figura 3** presentamos las principales áreas de aplicación de la óptica y la fotónica (SPIE, 2022).

A continuación, el lector encontrará una descripción de las contribuciones de la óptica y la fotónica a algunas de estas aplicaciones y las referencias de las publicaciones que permiten tener una visión general de la ciencia y la tecnología involucradas en cada aplicación.

Ciencias de la vida

Las aplicaciones de la biofotónica en medicina y oftalmología (Jelínková, 2013), y en el sector de salud en general, conforman, según este análisis, el 18,6 %. La biofotónica es un área de alto impacto científico y tecnológico en el campo de la salud. Emplea luz para el estudio de procesos biológicos a nivel molecular, celular y de tejidos, así como para

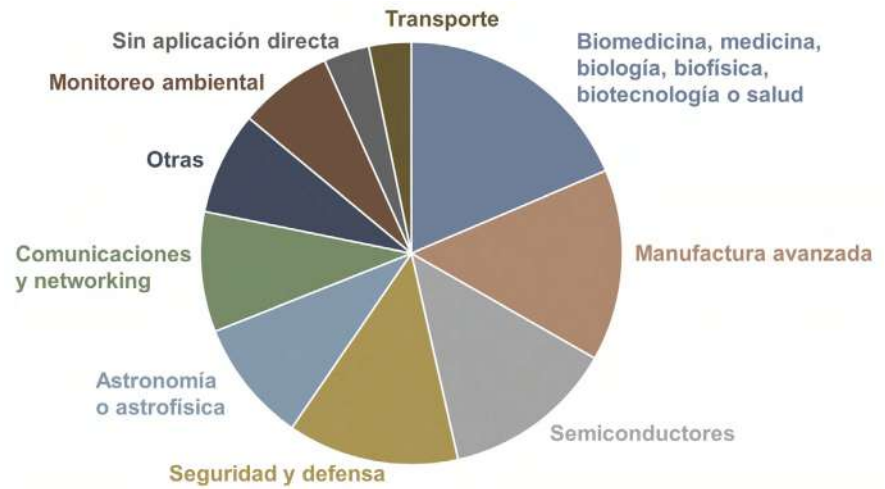


Figura 3. Áreas de aplicación de la óptica y la fotónica. Datos tomados de SPIE (2022)

el diagnóstico, tratamiento y cura no invasiva de enfermedades. Es claramente un área de carácter multidisciplinario, pues su avance requiere del trabajo conjunto de físicos, químicos, biólogos, ingenieros y médicos, entre otros.

Las herramientas fotónicas incluyen el equipo óptico para microcirugía, láseres para intervenciones quirúrgicas y dermatológicas y herramientas para la industria de productos farmacéuticos, la detección de virus, el tratamiento de aguas y la desinfección. Un avance científico de excepcional relevancia es la microscopía de superresolución en vivo (Godin *et al.*, 2014; Schermelleh *et al.*, 2019) y las imágenes médicas, incluidas aquellas en tiempo real que permiten distinguir tejido canceroso de tejido sano durante una cirugía.

Se espera que las nuevas herramientas fotónicas tengan gran aplicación en el campo de la salud personalizada y la medicina regenerativa, y permitan la secuenciación de ADN en menos de 10 minutos combinando la proteómica, la genómica y la metabolómica en tiempo real.

Manufactura avanzada

La fotolitografía es la principal tecnología de impresión de circuitos integrados; permite incorporar en ellos estructuras tridimensionales complejas, como los transistores, e interconexiones entre diversos dispositivos. El uso de láseres en el ultravioleta con la óptica UV, necesaria para proyectar patrones litográficos, permite crear circuitos a escala nanométrica y ha contribuido a su miniaturización.

Los láseres permiten realizar cortes, perforaciones y soldaduras de gran precisión en diversos materiales (Bogue, 2015). En las líneas de maquinado y fabricación también se utilizan diversos sensores ópticos. Las aplicaciones en la manufactura (14,7 %) incluyen las nuevas tecnologías de impresión en 3D (Chua *et al.*, 2017), o la fabricación aditiva, las cuales permiten minimizar el material de desecho producido con tecnologías sustractivas y el uso de los pulsos láser ultracortos (femtosegundos) para el control (Jiang *et al.*, 2017) de la dinámica de electrones en microfabricación y nanofabricación.

Semiconductores

La ciencia y la tecnología de semiconductores se ha desarrollado paralelamente con la óptica y la fotónica. Los avances en la ciencia y la tecnología de semiconductores han permitido el desarrollo de la optoelectrónica con nuevas fuentes láser, los LED, los puntos cuánticos y los fotodetectores. Asimismo, las nuevas fuentes láser son herramientas fundamentales para la fabricación con alta precisión de dispositivos semiconductores

integrados y miniaturizados. Por ello, un 13,2 % de los investigadores en óptica y fotónica trabaja en la ciencia y la tecnología de semiconductores, que también incluye la investigación en la fabricación de celdas fotovoltaicas de gran eficiencia.

Seguridad y defensa

La óptica y la fotónica tienen múltiples aplicaciones en seguridad y defensa (13,1 %), pues la mayoría de los sistemas de defensa se basan en la tecnología de imágenes, el uso de sensores remotos, detectores de agentes químicos y biológicos, cámaras de visión nocturna, comunicaciones y armamento antimisiles.

En cuanto a las aplicaciones civiles, un ejemplo son los hologramas de seguridad (Müller & Krehel, 2020), el reconocimiento biométrico dactilar, facial o del iris y los sistemas ópticos de seguridad mediante codificación óptica, en tanto que los códigos unidimensionales de barras verticales son de uso común en los supermercados y los códigos bidimensionales de respuesta rápida o códigos QR (Barrera *et al.*, 2013) se han popularizado enormemente gracias a la alta seguridad que ofrecen y a su tolerancia al ruido. Se usan masivamente, entre otros, en transacciones bancarias y en el comercio electrónico, en el transporte público de pasajeros, en medicina, para uso informativo en museos y sitios patrimoniales y como medio de acceso fácil a enlaces de comunicación.

Exploración del universo: astronomía y astrofísica

La observación de las estrellas y galaxias siempre ha fascinado a la humanidad, pero nuestra capacidad para lograr observaciones más detalladas ha ido avanzando de la mano de los desarrollos en la óptica y la fotónica desde el telescopio de Galileo hasta nuestros poderosos telescopios terrestres y espaciales. La ciencia de la óptica y la fotónica ha hecho posibles los avances en la astrofísica y en nuestra comprensión del universo y han contribuido a la comprobación de la teoría de la relatividad general de Einstein brindando herramientas metrológicas de gran precisión.

En la década de 1960, Joseph Weber inició la construcción de detectores de ondas gravitacionales usando grandes cilindros o barras de aluminio que vibraban al paso de estas. Eduardo Posada Flórez, físico y científico colombiano especializado en bajas temperaturas, criogénesis y superconductividad, reconocido, además, como uno de los padres de las políticas de ciencia y tecnología del país, quería construir uno de esos detectores en Colombia. Tales experimentos no fueron exitosos y la idea de usar una técnica interferométrica se abrió paso. En 1972, Kip S. Thorne y su grupo publicaron el primero de una serie de artículos que, a lo largo de varias décadas, recogieron las estimaciones de las intensidades y frecuencias de onda que producirían los agujeros negros, las estrellas de neutrones y las supernovas. En 1975, se comenzaron a desarrollar tres prototipos de interferómetros con brazos de decenas de metros en el MIT, Glasgow y Garching, Alemania. Dado que las ondas gravitacionales distorsionan a su paso el espacio-tiempo, producen compresiones y estiramientos alternados de la longitud de los dos brazos en L de interferómetros como el del Laser Interferometer Gravitational Observatory (LIGO), de 4 km de largo. La diferencia de longitud a medir entre los dos brazos es del orden de una milmillonésima de la longitud de onda de la luz usada en el interferómetro. Por ello, durante varias décadas la precisión experimental de la interferometría óptica usada para la detección de ondas gravitacionales aumentó en más de diez órdenes de magnitud. En el 2017 el Premio Nobel de Física fue otorgado precisamente a Kip S. Thorne, Rainer Weiss y Barry C. Barish por “contribuciones decisivas al detector de LIGO y la observación de ondas gravitacionales”.

En el 2020 el Premio Nobel se otorgó en reconocimiento de los trabajos de predicción y comprobación de la existencia de un agujero negro en el centro de nuestra galaxia. Por más de dos décadas los grupos de Reinhard Genzel (director del Instituto Max Planck de Astrofísica en Garching, Alemania) en el European Southern Observatory (ESO) en Chile, y de Andrea Ghez (fundadora y directora del grupo del Centro Galáctico de la Universidad de California en Los Angeles, UCLA, Estados Unidos) con el telescopio Keck en Hawai, realizaron por separado observaciones de la posición y velocidad radial de estrellas

cercanas al centro de la Vía Láctea. La precisión de sus observaciones fue avanzando con los desarrollos de la óptica adaptativa para telescopios en el infrarrojo y la resolución de los espectrofotógrafos para la medición de la velocidad radial de esas estrellas. Sus observaciones permitieron inferir la presencia de un agujero negro supermasivo en el centro de nuestra galaxia y medir su masa. Vale destacar que Andrea Ghez es la cuarta mujer en ser galardonada con el Premio Nobel de Física.

La óptica y la fotónica nos han permitido explorar el espacio desde los telescopios terrestres con la óptica adaptativa en su versión extrema (Guyon, 2018) y desde el espacio con los telescopios espaciales Hubble (NASA, 2021), que orbita la Tierra desde 1990, y James Webb (JWST) (NASA, 2022a), cuyas primeras imágenes fueron publicadas el 12 de julio del 2022. El telescopio Hubble ha tomado espectros en el ultravioleta cercano, en el visible y en el infrarrojo cercano (0,1 μm - 1,7 μm) y ha contribuido al desarrollo de nuestra visión cosmológica investigando nuestro propio sistema solar, otras estrellas y sus exoplanetas, nebulosas, galaxias, agujeros negros, ondas y lentes gravitacionales.

El magnífico telescopio James Webb (JWST) orbita el Sol cerca al punto de Lagrange Sol-Tierra L2, aproximadamente a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra. Por ello, a diferencia del Hubble, cuya óptica pudo ser reparada por astronautas, todos sus mecanismos debían funcionar a la perfección desde su lanzamiento. El JWST observa en un rango de frecuencia más bajo, desde la luz visible en el rojo hasta el infrarrojo medio (0,6 μm - 28,3 μm), lo que nos da imágenes de las galaxias más lejanas, como la HD1, que se estima nació solo 330 millones de años después del Big Bang y se encuentra a una distancia aproximada de 33 mil millones de años luz. Está compuesto por 18 espejos hexagonales de berilio enchapado en oro de aproximadamente 20 kilos cada uno que deben alinearse con la precisión de un diezmilésimo del espesor de un cabello humano para actuar al unísono como un gran espejo de 6,5 m de diámetro (NASA, 2022b). Por trabajar en el infrarrojo, el telescopio debe mantenerse a una temperatura inferior a 50 K (-223°C), de modo que su propia radiación térmica no solape la luz recogida. Su protector solar de cinco capas de kapton recubiertas con aluminio es una maravilla de la tecnología moderna. El kapton es un material (poliimida) desarrollado por Dupont en la década de los 60 resistente a temperaturas entre los 4 y 700 K. Las dos capas exteriores tienen, además, un revestimiento reflectante de silicio dopado con conductor para evitar cargas espaciales.

Comunicaciones

La óptica y la fotónica literalmente mantienen la comunicación por internet y gran parte de las tecnologías de la información. El crecimiento de la Internet y el aumento notable de su velocidad ha sido posible gracias a la fibra óptica (Willner, 2019) y al desarrollo de láseres de alta monocromaticidad para la multiplexación de la información y su transmisión en forma digital. La máxima capacidad de transmisión reportada en laboratorio es de 50 Tb/s a 240 km utilizando 50 canales multiplexados en una fibra monomodal (Kobayashi *et al.*, 2022). Pero la comunicación óptica no se limita a las comunicaciones transoceánicas submarinas y otras de larga distancia por fibra. La fibra óptica se utiliza también en redes locales y en centros de datos para la interconexión rápida de componentes periféricos (PCIe) en supercomputadoras (Taubenblatt, 2012) a velocidades de cientos de Gb/s (Ajima, 2022). La supercomputadora Frontier del Laboratorio Nacional Oak Ridge del Departamento de Energía de Estados Unidos usa interconexión óptica, y en mayo de este año fue clasificada como la más rápida del mundo, capaz de ejecutar 10^{18} operaciones por segundo (ORNL, 2022). La óptica también se utiliza en memorias y almacenamiento de datos (Lian *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022).

Pantallas, monitores, realidad virtual

La tecnología de pantallas es crítica para la información y el entretenimiento (Huang *et al.*, 2010). Las pantallas de cristal líquido (LCD) se usan en los celulares, tabletas, computadores y televisores y se basan en la manipulación de la polarización de la luz

proveniente de una fuente exterior (actualmente luz LED) que ilumina la pantalla. Las pantallas OLED usan diodos emisores de luz orgánicos en cada pixel, con lo cual se elimina la necesidad de una fuente exterior de luz y ofrecen la posibilidad de tener pantallas flexibles (plegables y enrollables). Las pantallas QLED usan una película de puntos cuánticos que al ser iluminados por luz LED azul emiten luz verde o roja según su tamaño. Cada vez las pantallas son de mayor tamaño, tienen mayor resolución y mejor calidad de color.

Las tecnologías de visualización y pantallas en 3D (**Pastoor & Wöpking**, 1997), así como las tecnologías emergentes de realidad virtual y realidad aumentada (**Yin et al.**, 2021), tienen multiplicidad de aplicaciones novedosas que van desde la educación inmersiva (**Hamilton et al.**, 2021), la herencia cultural (**Teeng et al.**, 2022) y el entretenimiento, hasta el entrenamiento médico (**Samadbeik et al.**, 2018), la manufactura (**Choi et al.**, 2015) y la agricultura (**de Oliveira & Corrêa**, 2020).

Imágenes y sensores

La técnica de detección y localización con luz (*light detection and ranging*, LIDAR) ha evolucionado considerablemente desde su introducción en 1961, demostrando su utilidad en la prospección aérea de la topografía de la superficie terrestre y la marina, o el monitoreo de la polución ambiental. Puede ser bidimensional o tridimensional, terrestre o con vehículos aéreos, tripulados o no. Además de ser útil en la cartografía y la obtención de las características de los edificios en zonas urbanas, es muy útil en arqueología, pues puede escanear el paisaje y captar detalles difíciles de ver a simple vista, lo que ayuda en la detección de fósiles y huesos escondidos bajo la superficie. La LIDAR se emplea actualmente en los iPhone e iPad más modernos, que ya cuentan con un escáner LIDAR en 3D. El teléfono proyecta luz infrarroja sobre los objetos a escanear y la luz retrodispersada es detectada por un sensor, conjuntamente con su retraso temporal, a partir del cual se determinan las distancias. De este modo, el sistema LIDAR permite percibir la forma y la profundidad de los objetos y generar imágenes de ellos en 3D.

La espectroscopía láser para análisis elemental y molecular es otra forma de obtener imágenes y determinar la composición de materiales en arte y arqueología (**Nevin et al.**, 2012). Se han usado en el Mars Rover para determinar la composición de materiales en el suelo marciano. Actualmente ya se comercializan los sistemas de mapeo móviles en drones, que utilizan luz UAV y portan, además de los sensores LIDAR, sensores de color RGB y espectroscopios, por lo cual se adaptan a una gran diversidad de aplicaciones. También se comercializan los equipos LIDAR portátiles y manuales que trabajan en el azul con precisión milimétrica, por lo cual tienen múltiples aplicaciones en ciencia, educación, arte e ingeniería, y en salud para el diseño de prótesis. En los procesos de manufactura de precisión se usan máquinas ópticas de medición de perfiles, cuya precisión se mide en micrómetros.

Sin duda una de las aplicaciones de mayor relevancia en el futuro es el uso de sensores basados en LIDAR para la visión diurna y nocturna en 3D de robots, vehículos autónomos (**Royo & Ballesta-García**, 2019) y máquinas industriales inteligentes. En un futuro más lejano, será posible el diseño de ropa inteligente que pueda monitorear nuestra salud, nuestra postura y movimientos, sentir el medio ambiente y recolectar energía mediante fibras multimaterial que realicen las mismas funciones de los equipos electrónicos actuales pero integrados en un hilo de grosor ligeramente mayor que el de un cabello (**Schneegass & Amft**, 2017).

Monitoreo ambiental

El monitoreo ambiental tiene un papel central en el diagnóstico del impacto de las actividades humanas y el clima en los sistemas naturales, particularmente en los recursos hídricos y agrícolas, y permite pronosticar, e incluso prevenir, desastres naturales. Dos tecnologías ópticas son de gran utilidad en este campo: la LIDAR y los sensores de fibra óptica. La primera tiene múltiples aplicaciones ecológicas (**Q. Guo et al.**, 2021),

pues permite hacer inventario de bosques, vegetación, detección de algas y diagnóstico atmosférico (Hering *et al.*, 2010), así como evaluar el riesgo y el daño posterior de deslizamientos de tierra e inundaciones y tsunamis (Chan & Toth, 2018). Los sensores de fibra óptica pueden trabajar en instalaciones subterráneas o submarinas a altas temperaturas y presiones sin interferencia electromagnética (Joe *et al.*, 2018) y tienen múltiples aplicaciones en ingeniería civil, ingeniería agrícola, ingeniería de petróleos y minería. En todas estas actividades, el monitoreo ambiental es esencial para detectar los cambios ambientales producidos por instalaciones y procesos industriales y garantizar el uso de tecnologías verdes.

El láser, usualmente de Er:YAG, que trabaja a 2.940 nm en el infrarrojo (IR), ha sido muy útil en la restauración de obras de arte y la limpieza de edificios históricos. El láser elimina la suciedad de la superficie, el barniz amarillento, el exceso de pintura e, incluso, los retoques de una restauración anterior, hasta una micra de la superficie de la pintura (Lizzeretti *et al.*, 2011; Moretti *et al.*, 2010).

También es importante mencionar las nuevas tecnologías de iluminación LED para cultivos en invernaderos (Berkovich *et al.*, 2017) y la agrofotónica, en la que la LIDAR permite monitorear la salud del suelo y la hidrología, predecir los niveles de proteína en las cosechas de granos y determinar cuándo recoger la fruta. También hay múltiples aplicaciones de la fotónica en cultivos hidropónicos y acuicultura para analizar la calidad del agua y verificar la salud de las poblaciones de peces.

Iluminación

La luz LED (Khan, 2014) ha reemplazado los bombillos incandescentes por su eficiencia y durabilidad, y los fluorescentes, por no contener materiales peligrosos como el mercurio. Es común actualmente el usar luz LED blanca para la iluminación domiciliaria, por su bajo consumo energético y gran brillo. La creación de luz blanca para iluminación requiere una combinación de luz roja, verde y azul. Mientras que el primer LED verde fue patentado por Rubin Braunstein y Egon Loebner de la RCA en 1958, y Nick Holonyak Jr. de la GE inventó el primer LED rojo en 1962, los LED azules requirieron de dos décadas de investigación y de una tecnología mucho más avanzada. En vez de la tecnología del GaAs, el ingrediente clave de los LED azules es el nitruro de galio dopado con grandes cantidades de magnesio.

Durante las décadas de 1980 y 1990, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura desarrollaron la ciencia y la tecnología necesarias para fabricar los LED azules (Figura 4). Por ello fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en el 2014. Por su brillo, sus aplicaciones se han extendido a la iluminación en automóviles, semáforos, decoraciones en las ciudades, espectáculos (Daukantas, 2010), y obras de arte luminoso (Kirkland, 2022).



Figura 4. Clausura del Año Internacional de la Luz en 2016. De izquierda a derecha: Banderlei Bagnato, Shuji Nakamura y Ángela Guzmán

Energía solar

Lograr celdas solares de alta eficiencia y bajo costo ha sido uno de los objetivos primordiales de la investigación en fotovoltaicos. Las celdas solares de silicio absorben solo la parte del espectro solar comprendido entre los 400 y los 1.100 nm. Por ello tienen una eficiencia teórica máxima de 32 % y han alcanzado en la práctica una eficiencia aproximada de 25 %. Una estrategia para aumentar la eficiencia de las celdas solares para que abarquen el espectro solar, es apilar materiales semiconductores fabricados con diferentes bandas prohibidas, optimizadas utilizando aleaciones de semiconductores III-V. Otra estrategia es el uso de concentradores solares mediante dispositivos ópticos para enfocar la energía del sol y elevar así la energía incidente en la celda. Hasta el 2020 el récord mundial de eficiencia lo tenía una estructura de seis junturas sobre un sustrato de GaAs: 39,2 % bajo un sol y 47,1 % bajo concentración equivalente a 143 soles (**Geisz et al.**, 2020). Actualmente el récord mundial lo tiene una estructura de triple juntura, con una celda intermedia de GaInAs/GaAsP de pozo cuántico (QW) entre una celda superior de GaInP y una celda inferior de GaInAs. Sin concentración óptica, su eficiencia es de 39,5 % del espectro global, lo que incluye el cielo azul y el suelo circundante (**France et al.**, 2022).

Debido a la abundancia y bajo costo del silicio, la integración heteroepitaxial de celdas solares de multijunturas de semiconductores III-V de alta eficiencia en un sustrato de silicio (celdas multijuntura III-V basadas en silicio) es actualmente de gran interés y podría constituirse en la próxima generación de celdas fotovoltaicas (**Yamaguchi et al.**, 2021).

La tecnología de concentradores solares para la producción de energía eléctrica (CPS) se utiliza también en plantas termosolares para elevar la temperatura de un líquido y producir electricidad impulsando una turbina de vapor. El complejo termosolar más grande del mundo, IVANPAH, produce 377 MW y está ubicado en el desierto de Mojave, Estados Unidos. Tiene tres torres de 140 m de altura con calderas en donde se concentra la energía solar focalizada por 173.500 heliostatos.

Fusión nuclear con láseres

El desarrollo de técnicas para elevar la potencia de los láseres se inició casi inmediatamente después del descubrimiento del láser. Al láser continuo de Maiman le siguió en 1961 el primer láser pulsado de rubí, con una potencia pico cercana a 1 MW, mil veces mayor que la potencia del láser continuo. Al obstruir el camino de la luz en el resonador, se disminuye su factor de calidad, lo que permite una mayor inversión de población. Al retirar la obstrucción, se eleva el factor de calidad y se produce la emisión de un pulso láser. Esta técnica se conoce como conmutación del factor de calidad del resonador láser (*Q-switching*).

En 1969 los equipos de la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas y la Compañía General de Electricidad de Estados Unidos demostraron que se podían producir neutrones de manera previsible y repetible irradiando deuterio sólido con impulsos láser de nanosegundos (**Bobin**, 2020). Motivado por esta posibilidad de usar pulsos láser de alta energía para la fusión nuclear, el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL) en California comenzó a desarrollar en 1970 láseres cada vez más potentes utilizando medios láser como amplificadores.

A mediados de los 80, este método de amplificación sucesiva alcanzó su límite, pues al alcanzar una potencia elevada, los efectos no lineales conducían a un autoenfoco y filamentación del haz. En 1985 Donna Strickland y Gerard Mourou demostraron el método de amplificación por compresión de pulsos de ancho de banda amplio (*chirped pulse amplification*, CPA) (**Strickland & Mourou**, 1985). Las diversas frecuencias individuales del pulso viajan a diferentes velocidades, lo que hace que el pulso se “estire” en el tiempo disminuyendo su potencia máxima por debajo de los límites de daño de los amplificadores. Después de la amplificación, el pulso se comprime temporalmente generando un pulso ultracorto de alta potencia. Su invención hizo posible la cirugía LASIK y abrió el camino a los láseres de petawatios de pulsos ultracortos (duración de decenas a centenas de

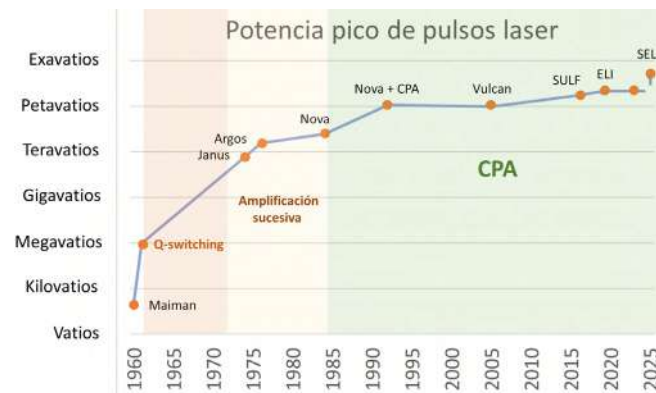


Figura 5. Evolución temporal de los láseres de alta potencia

femtosegundos) que han aumentado grandemente las posibilidades de obtener la fusión nuclear con láseres (Tollefson, 2021; Margarone *et al.*, 2022). Gérard Mourou y Donna Strickland recibieron el Premio Nobel del 2018 “por su método para generar pulsos ópticos ultracortos de alta intensidad”. En la **figura 5** puede observarse el decisivo impacto del método CPA en la obtención de láseres de alta potencia.

La técnica de CPA fue implementada en el láser NOVA del LLNL, que en 1992 alcanzó una potencia de 1,25 PW. En el 2019 el láser de Magurele de la *Extreme Light Infrastructure* (ELI) de la Unión Europea alcanzó los 10 PW de potencia pico. Este es un sistema láser de alta potencia (HPLS) que constará de dos segmentos láser independientes, cada uno de los cuales proporcionará una potencia máxima de 10 PW (10^{16} W).

Potencias de hasta 12,5 PW se han reportado en la Shanghai Superintense Ultrafast Laser Facility (SULF). El láser de la SULF utiliza CPA. La energía amplificada de 422 J se logró a una tasa de repetición de un disparo cada 3 minutos. Después del compresor, la duración del pulso fue de 23,4 fs, con una eficiencia del 71,3 %, lo que corresponde a una potencia máxima de 12,9 PW. Para el 2025 se ha programado que la Estación de Luz Extrema (SEL) de Shanghai, China, produzca un láser de 100 PW.

Europa desarrolla actualmente el proyecto de la European High Power Laser Energy Research Facility (HIPER); los estudios se encuentran en fase preparatoria con participación directa de la industria. Su objetivo principal es demostrar el potencial industrial y comercial de la producción de energía a partir de la fusión inercial con láseres.

En junio del 2021 la Instalación Nacional de Ignición (NIF) del LLNL demostró una reacción de fusión autosostenida que libera más energía de fusión que la energía entregada por el sistema láser. Recientemente, se produjeron 1,37 MJ de energía de fusión por confinamiento inercial utilizando una estrategia híbrida. Cuando se intenta aumentar el radio de la cápsula inicial con una energía fija del láser, existe el riesgo de perder densidad de energía. Por ello se utilizó un pistón de combustible de deuterio-tritio (DT) denso circundante para calentar y comprimir el “punto caliente” central de combustible DT, obteniendo así más energía acoplada al punto caliente (Kritcher *et al.*, 2022).

Donna Strickland es la tercera mujer en recibir el Premio Nobel de Física. Tuve la oportunidad de trabajar con ella en la mesa directiva de la ICO (Guzmán, 2011), siendo ella vicepresidenta designada por OSA (actualmente OPTICA) y yo secretaria general. La foto de la **figura 6** fue tomada en el Congreso General de ICO, ICO-22, en Puebla, México.

La industria de sistemas y componentes fotónicos

La producción anual de sistemas y componentes basados en óptica y fotónica ha sido estimada en 600 mil millones de dólares (OPTICA, 2022). En la **figura 7a** se observa la distribución de ingresos por productos y servicios que dependen de las tecnologías avanzadas de óptica y fotónica.



Figura 6. Miembros de la mesa directiva de ICO 2008– 2011 y 2011–2014. De pie de izquierda a derecha: Moshe Oron, H. Philip Stahl, Yasuhiko Arakawa, Gert von Bally, James A. Harrington, Ari Friberg, Tomasz Szoplik, Ahmadou Wagué. De izquierda a derecha primera fila: María Yzuel, Donna Strickland, Carmen Cisneros Gudiño, Roberta Ramponi, Zohra Ben Lakhdar, Duncan T. Moore, María Luisa Calvo, Ángela M. Guzmán, Fernando Mendoza Santoyo

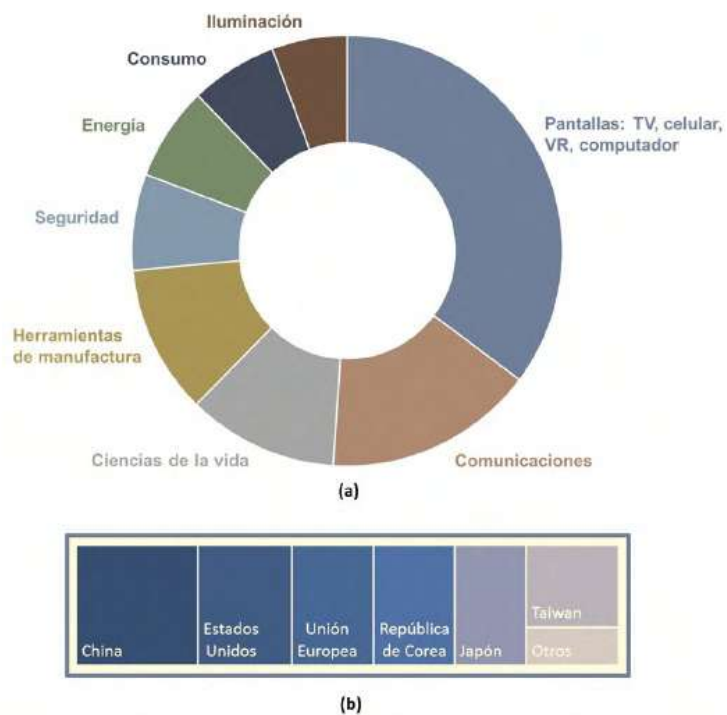


Figura 7. (a) Distribución de ingresos de la industria global de óptica y fotónica. (b) Cuota del mercado por países en el 2020

En la **figura 7b** podemos ver que Asia recibe casi dos tercios de los ingresos globales por esta tecnología (OPTICA, 2022), pues lidera la producción de pantallas de celulares, televisores y computadores, y de paneles fotovoltaicos y LED, entre otros. En el contexto latinoamericano solo Brasil inició tempranamente industrias de fibra óptica, comunicaciones y sensores (Torner *et al.*, 2007).

Iniciativas nacionales de desarrollo de la óptica y la fotónica

La importancia de la óptica y la fotónica como tecnologías estratégicas para incrementar la competitividad industrial, cerrar las brechas en comunicaciones y tecnologías de la información, contribuir al desarrollo sostenible, a la generación y ahorro energético, el monitoreo ambiental, a la salud y la agricultura, entre otros, ha motivado la creación de iniciativas nacionales y regionales de investigación y desarrollo en esta área.

Photonics 21: la Unión Europea

La Unión Europea creó la plataforma tecnológica Photonics 21 en el 2005 con el objetivo de mantener el liderazgo europeo en las tecnologías fotónicas con aplicaciones en comunicaciones e informática, iluminación, manufactura industrial, ciencias de la vida, ciencias del espacio, defensa y seguridad, educación y entrenamiento del recurso humano. La plataforma cuenta con más de 3.000 miembros que incluyen la mayoría de las industrias líderes en fotónica y de los grupos de investigación y desarrollo (I&D) europeos en esta área. Su nombre refleja la concepción del siglo XXI como el siglo de la fotónica, así como de la electrónica. La plataforma debe proporcionar el entorno adecuado para la investigación y desarrollo de componentes y sistemas fotónicos de aplicación en una amplia gama de sectores industriales, y crear conexiones estratégicas entre pequeñas y medianas industrias basadas en la fotónica y las industrias usuarias, de modo que compartan una misma visión de largo plazo.

En el marco del programa Horizon 2020 se creó en el 2013 la Asociación Photonics 21 (**Photonics21**, 2022), de carácter público-privado, comprometida en la promoción en Europa de la innovación en fotónica, área que contribuirá sustancialmente a la economía europea de este siglo. En el 2019 se publicó su hoja de ruta estratégica 2021-2027 (**Photonics21**, 2019) que se centra en: 1) información y comunicación; 2) fabricación industrial y calidad; 3) ciencias de la vida y salud; 4) iluminación emergente, electrónica y pantallas; 5) seguridad, metrología y sensores; 6) diseño y fabricación de componentes y sistemas; 7) investigación, educación y capacitación en fotónica; 8) agricultura y alimentación, y 9) automoción y transporte.

Iniciativa Fotónica Nacional de los Estados Unidos

En el 2013 el Consejo Nacional de Investigación publicó el informe “Óptica y fotónica: tecnologías esenciales para nuestra nación” (**NRC**, 2013), en el que se enfatiza el papel fundamental y omnipresente de las tecnologías ópticas en la creación de nuevas industrias y el crecimiento laboral. Atendiendo a este llamado, las principales sociedades en óptica y fotónica (OSA, SPIE, IEEE, LIA) y la Sociedad Americana de Física crearon la Iniciativa Fotónica Nacional (NPI) (**NPI**, 2013) que reúne expertos de la industria, la academia y el gobierno. Estos expertos asesoran a los legisladores y los responsables de las decisiones relacionadas con la financiación e inversión de Estados Unidos en cinco campos clave: fabricación avanzada, comunicaciones y tecnologías de la información, defensa y seguridad nacional, energía y salud y medicina.

En el 2018, el congreso promulgó la ley de Iniciativa Cuántica Nacional que estableció un programa federal para acelerar la investigación en la ciencia y el desarrollo de la tecnología de información cuántica y sus aplicaciones: computadores cuánticos, sensores cuánticos y redes de telecomunicación con encriptación cuántica de máxima seguridad, entre otros (**National Quantum Initiative-NQI**, 2018). La fotónica es también parte integral de esta iniciativa.

Hacia un México más brillante: mapa de ruta de óptica y fotónica (ProMéxico, 2016)

En el 2016 ProMéxico, con el apoyo de la ICO, la Academia Mexicana de Óptica y varios centros de investigación, publicó la estrategia mexicana para el impulso de la óptica y la fotónica, especificando los siguientes hitos en su plan de acción: 1) lograr la iluminación urbana con LED inteligentes para mejorar el uso eficiente de la energía en un entorno de sistemas operativos urbanos (SOU); 2) lograr un incremento de la eficiencia energética mediante el uso y producción de celdas fotovoltaicas y combustibles líquidos eficientes;

3) lograr la conectividad urbana con fibra óptica nacional de alta calidad y, así, habilitar la industria correspondiente en el país; 4) diseñar y producir sensores fotónicos en el rango de 2 a 20 μm ; desarrollar un láser de ultra-alta potencia (petawatt) y controlar la calidad de los procesos con certificaciones adecuadas.

Para el logro de estos hitos se establecen diferentes proyectos y un sistema de laboratorios mexicanos de investigación en fotónica encargado de desarrollar o implementar las siguientes tecnologías: sensores de fibra óptica, sensores para uso biológico y médico, manejo del calor, detectores de un solo fotón, fibra óptica con menor error de desempeño, láseres en el rango de 2 a 20 μm , silicón especializado médico, medios y tecnologías para la reducción de errores en transmisión, manufactura de silicios y compuestos orgánicos comunes y avanzados, celdas solares de segunda y tercera generación y LED avanzados.

Iniciativa Brasileña de fotónica (IBFóton) (MCTI, 2021)

En marzo del 2021, el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación del Brasil publicó dos resoluciones que definen la Iniciativa Brasileña de Fotónica (IBFóton) y crean el Sistema Brasileño de Laboratorios de Fotónica (Sisfóton-MCTI) destinados a la investigación, el desarrollo y la prestación de servicios tecnológicos, y emprendimiento e innovación en fotónica. IBFóton es un programa estratégico de fomento de la fotónica que priorizó las siguientes aplicaciones de la fotónica para recibir incentivos gubernamentales: comunicaciones e información y tecnología de la comunicación, salud, energía, agricultura, medio ambiente, industria, defensa, movilidad y educación. Asimismo, definió las tecnologías prioritarias: fibra óptica, dispositivos fotónicos, integración híbrida, óptica integrada, dispositivos optoelectrónicos, sistemas y redes de comunicaciones ópticas, láseres, materiales avanzados para fotónica, nanofotónica, plasmónica, óptica clásica, óptica cuántica y óptica no lineal, instrumentación óptica, espectroscopía, metrología, sensores, pantallas e iluminación.

Elementos para una iniciativa colombiana en óptica y fotónica

Colombia cuenta con una comunidad de investigadores en óptica y fotónica que desde la década de 1980 está integrada en una red que hoy recibe el nombre de Sociedad Red Colombiana de Óptica. Existen grupos de investigación de larga trayectoria en la adquisición y procesamiento de imágenes, espectroscopía, sensores, LIDAR y metrología óptica, cuyo conocimiento y experiencia constituyen una base científica y tecnológica sólida para nuevas industrias intensivas en conocimiento y tecnología (*knowledge- and technology-intensive*, KTI). Las empresas KTI de monitoreo y sensoramiento ambiental de bajo costo y de operación distribuida cobrarán cada vez mayor importancia en la mitigación de los efectos adversos del cambio climático y en la preservación de nuestra biodiversidad y ecosistemas. Por otra parte, la LIDAR y el análisis de imágenes satelitales en tiempo real podrían proporcionar información fundamental para la toma de decisiones de autoridades locales en cuanto a contaminación ambiental, seguridad alimentaria y riesgo de desastres. Una hoja de ruta de desarrollo y transferencia adecuada de tecnologías fotónicas en el país brindaría apoyo fundamental a la creación de ciudades inteligentes, agroindustrias eficientes y una economía sostenible.

Pero Colombia carece de apoyo financiero, estatal o privado, para el desarrollo de industrias KTI. En Estados Unidos se financian tres tipos de investigación: básica, aplicada y de desarrollo experimental, entendiéndose que son campos de trabajo sistemático dirigido a producir nuevos productos o procesos, o a mejorar los existentes, con base en el conocimiento obtenido de la investigación y la experiencia práctica. El estado financia aproximadamente un 13 % de la investigación de desarrollo experimental (NSF, 2022), en tanto que el sector privado financia el 86 %. ProColombia, la entidad análoga a ProMexico en Colombia, sólo contempla inversiones financieras y en turismo, pero no financia investigación ni desarrollo de empresas KTI.

Actualmente, el sistema de unidades internacionales (SI) se define en términos de un conjunto de siete constantes con valor fijo, de las que se puede derivar el sistema completo de unidades: 1) la frecuencia de transición hiperfina del estado fundamental no perturbado

del átomo de cesio-133 medida por métodos ópticos, cuyo inverso define el segundo; 2) la velocidad de la luz que define el metro; 3) la constante de Planck que define el kilogramo patrón; 4) la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz que define la candela; 5) la constante de Boltzmann que define el grado Kelvin; 6) la carga del electrón que define el amperio, y 7) el número de Avogadro. Excepto por este último, todas las unidades del SI involucran en su definición el segundo. Por ello, la medición precisa del tiempo es fundamental para la metrología y, en consecuencia, la comunidad de investigadores en óptica y fotónica debería tener un rol preponderante en la metrología de precisión y estándares.

El Instituto Nacional de Metrología (INM) es, en principio, responsable de mantener en Colombia los patrones nacionales del SI. El INM posee un reloj atómico, pero no tiene un laboratorio de óptica que le permita mantener los patrones nacionales de tiempo, longitud y masa y, por ende, de temperatura, corriente e intensidad luminosa. En su plan estratégico 2018-2022 reconoce la necesidad de articulación con el sistema de ciencia, tecnología e innovación y la carencia de información sobre posibles institutos designados para la custodia y mantenimiento de los patrones nacionales. Tampoco el ICONTEC tiene laboratorio de metrología óptica, ni asociado ni propio.

En la formulación de la hoja de ruta mexicana es claro que ProMexico entendió el papel fundamental de la metrología en el comercio internacional para la certificación de la calidad de los productos de exportación con estándares internacionales y el control de la calidad y las especificaciones de la tecnología importada, así como la necesidad de que la metrología óptica cuente con una red de laboratorios de investigación de excelencia. Una labor pionera de la Sociedad Red Colombiana de Óptica sería el contactar instituciones estatales y privadas para organizar un sistema de laboratorios de investigación dispuestos a ofrecer servicios metrológicos y conseguir que el gobierno financie la generación de empresas KTI en el país.

Por último, no debemos dejar de lado los nuevos desafíos de las tecnologías emergentes y cuánticas que modificarán profundamente todos los aspectos de nuestro diario vivir y sin cuya apropiación y adecuada comprensión veremos aumentar vertiginosamente nuestra dependencia y la brecha de desarrollo tecnológico con los países desarrollados.

Observaciones finales

Nuestra habilidad para generar luz de características espaciales y temporales controlables y en estados cuánticos específicos, y para amplificarla, transmitirla, detectarla y controlar en general su interacción con la materia, nos ha permitido desarrollar múltiples tecnologías basadas en la óptica y la fotónica que son de relevancia crucial para nuestra sociedad. En esta revisión se brinda un panorama general de los avances científicos y tecnológicos en esta área con múltiples referencias a artículos de revisión recientes que permiten al lector profundizar en tópicos específicos.

John Dudley, el presidente del Año Internacional de la Luz, publicó recientemente un artículo titulado “Luz, láseres y el Premio Nobel” (Dudley, 2020). Desde la entrega de los primeros Premios Nobel en diciembre 10 de 1901, por el trabajo en óptica se han entregado 34 Premios Nobel de Física, cinco de Química y cuatro de Fisiología y Medicina. Es también de resaltar que las cuatro mujeres galardonadas con premios Nobel de Física han investigado en óptica o usado herramientas ópticas para su trabajo de investigación.

Dudley señala que ya en la segunda mitad del siglo XIX, los estudios del espectro característico de la radiación del cuerpo negro estuvieron motivados y fueron estimulados más que por curiosidad científica por problemas económicos. En ese momento Berlín escogía entre iluminación con gas o iluminación eléctrica, así como recientemente hemos migrado de las bombillas incandescentes a la iluminación con LED. El descubrimiento del LED azul, y su alimentación con energía solar, abrió también la posibilidad de llevar iluminación a zonas no electrificadas. Las necesidades de la cuarta revolución industrial que se inicia con el cambio en nuestras fuentes de energía seguirán motivando avances científicos en la nanofotónica y la plasmónica.

Hoy la óptica y la fotónica no son una disciplina dependiente de la física, sino una ciencia y una tecnología desarrolladas conjuntamente por profesionales de diferentes disciplinas que hacen posible el avance de otras ciencias y que genera y seguirá generando grandes ingresos a las regiones y países que optaron u opten por fortalecer esta área de investigación y apoyar la creación de nuevas empresas de base científica y tecnológica en este campo.

Las tecnologías fotónicas emergentes nos permiten atisbar un futuro en el campo de la “internet de las cosas”, los computadores cuánticos, la robótica, la automatización vehicular, la medicina personalizada, la agricultura y la producción eficiente de alimentos, la seguridad energética, la manufactura inteligente, y mucho más.

Conflicto de intereses

Ninguno que declarar.

Referencias

- Ajima, Y.** (2022). Optical connection of top-level supercomputers: current status and future expectations. In R. T. Chen & H. Schröder (Eds.), *Optical interconnects XXII* (Vol. 12007, pp. 11 – 19). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2607916>
- Aspect, A., Dalibard, J., Roger, G.** (1982, Dec). Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-varying Analyzers. *Physical Review Letters*, 49, 1804-1807. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.49.1804>
- Barrera, J. F., Mira, A., Torroba, R.** (2013). Optical encryption and QR codes: Secure and noise-free information retrieval. *Optical Express*, 21(5), 5373-5378. <https://doi.org/10.1364/OE.21.005373>
- Berkovich, Y.A., Konovalova, O., Smolyanina, S.O., Erokhin, A. N., Averchevab, O.V., Bassarskayab, M., Kochetovab, G.V., Zhigalovab, T.V., YakovlevacI, O.S., Tarakanovc, I.G.** (2017). LED crop illumination inside space green-houses. *REACH*, 6, 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.reach.2017.06.001>
- Bobin, J.** (2020). 50 years ago: the first nuclear fusion reactions induced by laser radiation. *Reflète de la Physique*, 67, 21-25. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:520712055
- Bogue, R.** (2015). Lasers in manufacturing: a review of technologies and applications. *Assembly Automation*, 35(2), 161-165. <https://doi.org/10.1108/AA-07-2014-066>
- Bouwmeester, D., Pan, J.-W., Daniell, M., Weinfurter, H., Zeilinger, A.** (1999, Feb). Observation of three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. *Physical Review Letters*, 82, 1345-1349. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.82.1345>
- Calegari, F., Sansone, G., Stagira, S., Vozzi, C., Nisoli, M.** (2016). Advances in attosecond science. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 49(6), 062001. <https://doi.org/10.1088/0953-4075/49/6/062001>
- Chan, J., Toth, C. K.** (2018). Topographic laser ranging and scanning, 2nd. edition. CRC Press, Taylor and Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781315154381>
- Chen, C.-C., González-Escudero, R., Minář, J., Pasquiou, B., Bennetts, S., Schreck, F.** (2022). Continuous Bose–Einstein condensation. *Nature*, 606(3), 683-687. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04731-z>
- Choi, S., Jung, K., Noh, S. D.** (2015). Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions. *Concurrent Engineering*, 23(1), 40-63. <https://doi.org/10.1177/1063293X14568814>
- Chua, C. K., Matham, M. V., Kim, Y.-J.** (2017). Lasers in 3D printing and manufacturing. World Scientific. <https://doi.org/10.1142/9500>
- Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A., Holt, R. A.** (1969, Oct). Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Physical Review Letters*, 23, 880-884. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.23.880>
- Daukantas, P.** (2010). A short history of laser light shows. *OPN Optics & Photonics News*, 44, 42-47. <https://laserfest.org/news/opn-laser-shows.pdf>
- Davis, K. B., Mewes, M. O., Andrews, M. R., van Druten, N. J., Durfee, D. S., Kurn, D. M., Ketterle, W.** (1995). Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms. *Physical Review Letters*, 75, 3969-3973. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.3969>
- de Oliveira, M. E., Corrêa, C. G.** (2020). Virtual reality and augmented reality applications in agriculture: a literature review. In 2020 22nd symposium on virtual and augmented reality (svr) (p. 1-9). <https://doi.org/10.1109/SVR51698.2020.00017>

- Dudley, J. M.** (2020). Light, Lasers, and the Nobel Prize. *Advanced Photonics*, 2(5), 050501. <https://doi.org/10.1117/1.AP.2.5.050501>
- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N.** (1935, May). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47, 777-780. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.47.777>
- France, R. M., Geisz, J. F., Song, T., Olavarria, W., Young, M., Kibbler, A., Steiner, M. A.** (2022). Triple-junction solar cells with 39.5% terrestrial and 34.2% space efficiency enabled by thick quantum well superlattices. *Joule*, 6(5), 1121-1135. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.04.024>
- Franken, P. A., Hill, A. E., Peters, C. W., Weinreich, G.** (1961). Generation of optical harmonics. *Physical Review Letters*, 7(4), 118-119. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.7.118>
- Geisz, J. F., France, R. M., Schulte, K. L., Steiner, M. A., Norman, A. G., Guthrey, H. L., Matthew, R., Young, M.R., Song, T., Moriarty, T.** (2020). Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 suns concentration. *Nature Energy*, 5, 326-335. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5>
- John F Geisz, Ryan M France, Kevin L Schulte, Myles A Steiner, Andrew G Norman, Harvey L Guthrey, Glauber, R. J.** (1963). The quantum theory of optical coherence. *Physical Review*, 130(6), 2529-2539. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.130.2529>
- Godin, A. G., Lounis, B., Cagnet, L.** (2014). Super-resolution microscopy Approaches for live cell imaging. *Biophysical Journal*, 107(8), 1777-1784. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2014.08.028>
- Guo, B., Sun, J., Lu, Y., Jiang, L.** (2019). Ultrafast dynamics observation during femtosecond laser-material interaction. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 1(3), 032004. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab3a24>
- Guo, Q., Su, Y., Hu, T., Guan, H., Jin, S., Zhang, J., . . . Coops, N. C.** (2021). Lidar boosts 3D ecological observations and modelings: A review and perspective. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 9(1), 232-257. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2020.3032713>
- Guyon, O.** (2018). Extreme adaptive optics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56(1), 315-355. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-052000>
- Guzmán, A. M.** (1998). Óptica atómica ¿la óptica del año 2000? *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 22(84), 363-373. https://www.acefyn.com/revista/Vol_22/84/363-373.pdf
- Guzmán, A. M.** (2011). Worldwide community of optics at ICO-22 (No. 89). https://www.e-ico.org/blog/wp-content/uploads/2022/06/ICO_news_oct_11.pdf
- Guzmán de García, A.** (1984). Nonlinear processes in two-photon pumped atomic vapors (Tech. Rep.). Max-Planck-Institut fuer Quantenoptik, Garching (Germany, FR). <https://www.osti.gov/biblio/6224722>
- Göppert-Mayer, M.** (1931). Über Elementarakte mit zwei Quantensprüngen. *Annalen Der Physik*, 401(3), 273-294. <https://doi.org/10.1002/andp.19314010303>
- Hamilton, D., McKechnie, J., Edgerton, E., Wilson, C.** (2021). Immersive virtual reality as a pedagogical tool in education: a systematic literature review of quantitative learning outcomes and experimental design. *Journal of Computers in Education*, 8, 1-32. <https://doi.org/10.1007/s40692-020-00169-2>
- Hering, P., Stry, S., Lay, J. P.** (2010). Laser in environmental and life sciences. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08255-3>
- Huang, Y., Hsiang, E.-L., Deng, M.-Y., Wu, S.-T.** (2010). Mini-LED, micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives. *Light: Science & Applications - Nature*, 9, 105. <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0341-9>
- Jelínková, H.** (2013). Lasers for medical applications. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Elsevier, United States of America. <https://www.elsevier.com/books/lasers-for-medical-applications/jelinkova/978-0-85709-237-3>
- Jiang, L., Wang, A.-D., Li, B., Cui, T.-H., Lu, Y.-F.** (2017). Electrons dynamics Control by shaping femtosecond laser pulses in micro/nanofabrication: modeling, method, measurement and application. *Light: Science & Applications - Nature*, 7, 17134. <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.134>
- Joe, H., Yun, H., Jo, S., Martin B.G., Byung-Kwon Min, J.** (2018). A review on optical fiber sensors for Environmental monitoring. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5, 173-191. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0017-6>
- Khan, M. N.** (2014). Understanding LED illumination. CRC Press, Taylor and Francis Group. <https://www.routledge.com/Understanding-LED-Illumination/Khan/p/book/9780367867102>

- Kirkland, A. H.** (2022, julio/agosto). Optics & art. *Optics and Photonics News*, 30-39. https://www.optica-opn.org/home/articles/volume_33/july_august_2022/features/optics_art/
- Kobayashi, T., Shimizu, S., Nakamura, M., Umeki, T., Kazama, T., Yoshida, J., . . . Miyamoto, Y.** (2022). 50-Tb/s (1 Tb/s × 50 ch) WDM transmission on two 6.25-Thz bands using hybrid inline repeater of PPLN-based OPAs and incoherent-forward-pumped DRA. In Optical fiber communication conference (OFC) 2022 (p. Th4A.8). Optica Publishing Group. <https://doi.org/10.1364/OFC.2022.Th4A.8>
- Kritcher, A. L., Zylstra, A. B., Callahan, D. A., Hurricane, O. A., Weber, C. R., Clark, D. S., . . . Yang, S. T.** (2022). Design of an inertial fusion experiment exceeding the Lawson criterion for ignition. *Physical Review E*, 106(2), 025201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.025201>
- Lazzeretti, L., Capone, F., Cinti, T.** (2011). Open innovation in city of art: The case of laser technologies for conservation in Florence. *City, Culture and Society*, 2(3), 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2011.09.001>
- Lian, C., Vagionas, C., Alexoudi, T., Pleros, N., Youngblood, N., Ríos, C.** (2022). Photonic (computational) memories: tunable nanophotonics for data storage and computing. *Nanophotonics*, 1117, 3823-3854. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0089>
- Liu, Z., Cheng, S., Zhang, Y., Jin, W., Li, X., Li, Y., . . . Yuan, L.** (2022). Intelligent all-fiber device: storage and logic computing. *Photonics Research*, 10(2), 357-363. <https://doi.org/10.1364/PRJ.439506>
- Maiman, T. H.** (1960). Optical and microwave-optical experiments in ruby. *Physical Review Letters*, 4(11), 564-566. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.564>
- Margarone, D., Bonvalet, J., Giuffrida, L., Morace, A., Kantarelou, V., Tosca, M., . . . Batani, D.** (2022). In-target proton-boron nuclear fusion using a PW-class laser. *Applied Sciences*, 12(3), 1444. <https://doi.org/10.3390/app12031444>
- MCTI.** (2021). Ibfóton. MCTI, Brasil. https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/3/o/Folder_IBFóton_e_Sisfóton.pdf?1651583682
- Moretti, P., Iwanicka, M., Melessanaki, K., Dimitroulaki, E., Kokkinaki, O., Daugherty, M., . . . Costanza-Miliani, L. C.** (2010). Laser cleaning of paintings: in situ optimization of operative parameters through non-invasive assessment by optical coherence tomography (OCT), reflection FT-IR spectroscopy and laser induced fluorescence spectroscopy (LIF). *Heritage Science*, 7, 44. <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0284-8>
- Müller, M., Krehel, M.** (2020, mayo). Holograms as security features: Origination, development, and perception. *Photonics Spectra*, 65675. https://www.photonics.com/Articles/Holograms_as_Security_Features_Origination/a65675
- NASA.** (2021). Hubblesite. <https://hubblesite.org/science>
- NASA.** (2022a). James Webb Space Telescope. <https://webb.nasa.gov/index.html>
- NASA.** (2022b). Webb's mirrors. <https://jwst.nasa.gov/content/observatory/ote/mirrors/index.html>
- Nevin, A., Spoto, G., Anglos, D.** (2012). Laser spectroscopies for elemental and molecular analysis in art and archaeology. *Applied Physics A*, 106, 339-361. <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6699-z>
- NPI.** (2013). National photonics initiative. <https://www.lightourfuture.org/home/about-npi.aspx>
- NQI.** (2018). National quantum initiative. <https://www.quantum.gov/>
- NRC.** (2013). Optics and photonics: Essential technologies for our nation. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13491>
- NSF.** (2022). The state of US science and engineering 2022 (Tech. Rep.). <https://ncses.nsf.gov/indicators>
- OPTICA.** (2022). Optica industry reports. Optics and photonics: The impact on a global economy. (Tech. Rep.). <http://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OIDA-2022-12>
- ORNL.** (2022, mayo). Frontier supercomputer debuts as world's fastest, breaking Exascale barrier. Oak Ridge National Laboratory, USA. <https://www.ornl.gov/news/frontier-supercomputer-debuts-worlds-fastest-breaking-exascale-barrier>
- Pastoor, S., Wöpking, M.** (1997). 3-D displays: A review of current technologies. *Displays*, 17(2), 100-110. [https://doi.org/10.1016/S0141-9382\(96\)01040-2](https://doi.org/10.1016/S0141-9382(96)01040-2)
- Phillips, W. D.** (1997). Laser cooling and trapping of neutral atoms. In Les Prix Nobel 1997 (p. 130-175). Almquist and Wiksell International, Stockholm, Sweden.
- Phillips, W. D.** (1998). Nobel lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms. *Review of Modern Physics*, 70(3), 721-741. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.70.721>
- Photonics21.** (2019). Europe's age of light! <https://www.photonics21.org/download/ppp-services/photronics-downloads/Europes-age-of-light-Photonics-Roadmap-C1.pdf>

- Photonics21.** (2022). Photonics 21. <https://www.photonics21.org/about-us/>
- ProMéxico.** (2016). Hacia un México más brillante: mapa de ruta de óptica y fotónica. <https://docplayer.es/39899429-Hacia-un-mexico-mas-brillante-mapa-de-ruta-de-fotonica-y-optica.html>
- Royo, S., Ballesta-Garcia, M.** (2019). An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles. *Applied Sciences*, 9(19), 4093. <https://doi.org/10.3390/app9194093>
- Samadbeik, M., Yaaghobi, D., Bastani, P., Abhari, S., Rezaee, R., Garavand, A.** (2018). The applications of virtual reality technology in medical groups teaching. *Journal of Advances in Medical Education & Professionalism*, 6(3), 123-129. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30013996/>
- Schermelleh, L., Ferrand, A., Huser, T., Eggeling, C., Sauer, M., Biehlmaier, O., Drummen, G.** (2019). Super-resolution microscopy demystified. *Nature Cell Biology*, 21, 72-84. <https://doi.org/10.1038/s41556-018-0251-8>
- Schneegass, S., Amft, O.** (2017). Smart textiles. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50124-6>
- SPIE.** (2022). Optics and photonics global salary report 2022. (Tech. Rep.). <https://www.spie.org/documents/CareerCenter/2022-Global-Salary-Report.pdf>
- Strickland, D., Mourou, G.** (1985). Compression of amplified chirped optical pulses. *Optics Communications*, 563, 219-221. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(85\)90120-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(85)90120-8)
- Taubenblatt, M. A.** (2012). Optical interconnects for high-performance computing. *Journal of Lightwave Technology*, 30(4), 448-457. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2172989>
- Teeng, C., Lim, C. K., Rafi, A., Tan, K., Mokhtar, M.** (2022). Comprehensive systematic review on virtual reality for cultural heritage practices: coherent taxonomy and motivations. *Multimedia Systems*, 28, 711-726. <https://doi.org/10.1007/s00530-021-00869-4>
- Tollefson, J.** (2021). US achieves laser-fusion record: what it means for nuclear-Weapons research. *Nature*, 597(2), 163-164. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02338-4>
- Torner, L., Calvo, M., Guzmán, A.** (2007). Óptica y fotónica: contexto iberoamericano. *Transatlántica de educación*, ISSN 1870-6428, (3), 128-140. https://www.researchgate.net/publication/28202766_Optica_y_Fotonica_contexto_iberamericano
- Willner, A.** (2019). Optical fiber telecommunications (Vol. VII). Academic Press. <https://www.elsevier.com/books/optical-fiber-telecommunications-vii/willner/978-0-12-816502-7>
- Yamaguchi, M., Dimroth, F., Geisz, J. F., Ekins-Daukes, N. J.** (2021). Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. *Journal of Applied Physics*, 129, 240901. <https://doi.org/10.1063/5.0048653>
- Yin, K., He, Z., Xiong, J., Zou, J., Li, K., Wu, S.-T.** (2021). Virtual reality and augmented reality displays: advances and future perspectives. *Journal of Physics: Photonics*, 3(2), 022010. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/abf02e>

Artículo original

Potencial Vector Eléctrico y la Ley de Biot-Savart en Electroestática

Electric Vector Potential and the Biot-Savart like law in Electrostatics

Robert Salazar^{1,*}, Camilo Bayona-Roa², Diego Jaramillo³

¹ Universidad ECCI, Bogotá, Colombia.

² Centro de Ingeniería Avanzada Investigación y Desarrollo — CIAID, Bogotá, Colombia

³ Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia

Resumen

En este documento se presenta una formulación de potencial vectorial asociado al campo eléctrico para estudiar electrodos de superficie embebidos en un plano. Se muestra que el problema se puede abordar mediante la solución de la ecuación de Laplace en el espacio libre, bajo condiciones de frontera de Neumann sobre las placas cuando la separación entre ellas tiende a cero. Se obtiene que campo eléctrico matemáticamente guarda una analogía con la ley de Biot-Savart de magnetostática. La estrategia permite generalizar dicho resultado analítico para su aplicación en la descripción de electrodos de superficie con separación entre las placas.

Palabras clave: Ley de Biot-Savart; potencial vector eléctrico; electrodo de superficie con y sin separación entre placas.

Abstract

A vector potential formulation is shown in this article to compute the electric field of planar surface electrodes. The electric field is derived from the solution of the Laplace's equation in the free-charge space. Neumann-boundary conditions must be set on the region between planar metallic sheets as the separation goes to zero. It is shown that the electric field can be written via a Biot-Savart-like integral. The strategy enables to generalize the analytical result for its application in the gaped surface electrodes description.

Keywords: Biot-Savart law; electric vector potential; gapless and gaped surface-electrode.

Introduction

In this document, we study a system composed of two metal sheets with a gap G in between (see Fig.1-left). The sheets lie on the xy -plane, and a constant potential difference is enforced in-between. For convenience, the potentials of the inner and outer sheets are V_0 and zero, respectively. This system is commonly referred to as *gaped Surface Electrode* (SE) (House, 2008; Salazar *et al.*, 2019, 2022; Schmied, 2010) and it plays an important role to model the static electric fields in SE ion traps where ion-trap networks including arrays of SE are also promising candidates in quantum processing (Chiaverini *et al.*, 2005; Seidelin *et al.*, 2006; Daniilidis *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011; Hong *et al.*, 2017; Makhberi *et al.*, 2017; Tao *et al.*, 2018; Van Mourik *et al.*, 2020)

Citación: Salazar R, Bayona-Roa C, Jaramillo D. Potencial Vector Eléctrico y la Ley de Biot-Savart en Electroestática. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):939-946, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1671>

Editor: Román Eduardo Castañeda-Sepúlveda

***Correspondencia:**

Robert Salazar; rsalazarr@ecc.edu.co

Recibido: 19 de abril de 2022

Aceptado: 30 de noviembre 2022

Publicado en línea: 30 de noviembre de 2022



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

The surface electrode also has practical relevance in antenna theory. For instance, when considering a time-varying voltage between the sheets. If the system is fed with a harmonic voltage source $V(t) = V_0 \exp(i\omega t)$ of angular frequency ω , then the SE will radiate electromagnetic waves that will mostly depend on the geometry of the gap G and ω . This time-dependent version of the SE is a type of dipole-blade antenna (**Balanis, 2015; Hicks et al., 2012**). Those antennas play a role in astronomic radio-telescopes (**Mozdzen et al., 2017**). Here we restrict our description to the stationary case. However, the electrostatic of the SE is also important since in the low-frequency limit ($\omega/c \ll 1$, with c the velocity of light) the time-dependent solutions tend to the electrostatic profiles times harmonic phases.

In this article, we are interested in the electric field inside the charge-free region $D = \{\mathbb{R}^3 : z > 0\}$ and the surface charge density on the sheets $\{\mathbb{R}^2 : z = 0\} \setminus G$. The boundary of the region of interest D is denoted as ∂D . Authors of Ref. (**Oliveira & Miranda, 2001**) have shown that the electric field E in D can be computed via a Biot-Savart-like law when the gap region is infinitely thin. They proved the relationship by using analogies with magneto-statics, specifically by comparing the scalar magnetic potential of a planar loop carrying a steady current and the electric potential of the electrostatic system.

The alternative strategy in this article consists in writing the electric field $E = \nabla \times \Theta$ as the curl of a vector potential Θ in the free-charge region, where the electric field is divergenceless $\nabla \cdot E = 0$. Since the Laplacian of the electric vector potential is $\nabla^2 \Theta = \nabla \times \Theta - \nabla(\nabla \cdot \Theta)$, it can be reduced to the simpler equation

$$\nabla^2 \Theta(r) = (\nabla^2 \Theta_x(r), \nabla^2 \Theta_y(r), \nabla^2 \Theta_z(r)) = 0, \quad r \in D \cup G, \quad (1)$$

because every time-independent electric field is irrotational $\nabla \times E = 0$ and one can impose a Gaussian Gauge condition $\nabla \cdot \Theta = 0$ on the vector potential. The electric potential vector has been employed in different contexts where the use of Θ can be advantageous in comparison with the scalar electric potential i.e. numerical studies via Finite Element Method for electrostatics (**Semenov et al., 2006**), and engineering problems (**Landis, 2002; Stark et al., 2015; Albanese & Rubinacci, 1990; Zhang & Wang, 1999**). We show that solving the Laplace's equation (1) together with Neumann boundary conditions on the finite gap will equally derive in the Biot-Savart law like formula: An integral description of the electric field without resorting to the magneto-statics analogy.

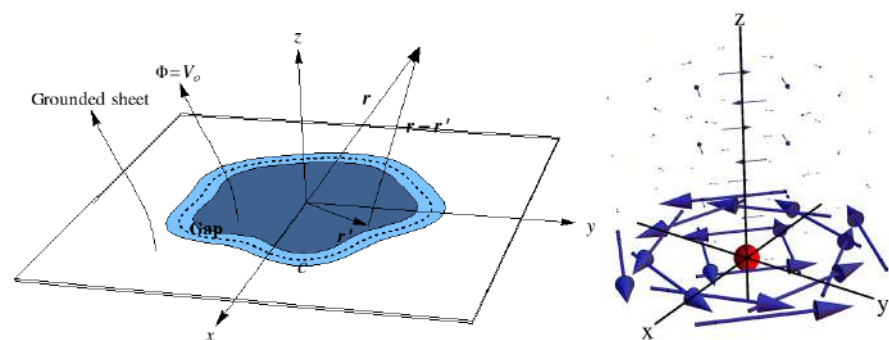


Figure 1. The physical system. A gaped SE is composed of two flat sheets at different electric potentials separated by a gap in between (left). Electric vector potential of a punctual charged particle (right).

The classical approach to derive the electric field of planar surface electrodes in Ref. (**Oliveira & Miranda, 2001**) has been to map the traditional Dirichlet problem onto the much simpler Biot-Savart-like problem: The integral expression for the electric field due to an arbitrarily shaped planar region kept at a fixed electric potential and embedded in a grounded

plane. A similar approach has been proved efficient in (Salazar *et al.*, 2019). As shown in Ref. (Salazar *et al.*, 2020), one can obtain the Biot-Savart law without solving the Laplace's equation. That alternative derivation is by employing the Helmholtz decomposition and Green's theorems. The current proposal is a first attempt to understand the transient phenomenon, being the difference regarding the previously published works on this subject by the authors.

Many contemporary applications such as antennas, electron traps, and microprocessor boards include this phenomenology and require efficient descriptions of the electric field. Indeed, SE are a promising candidates to build ion-trap networks suitable for large-scale quantum processing (Seidelin *et al.*, 2006; Chiaverini *et al.*, 2005; Daniilidis *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011; Hong *et al.*, 2017; Mokheri *et al.*, 2017; Tao *et al.*, 2018; Van Mourik *et al.*, 2020). The remaining parts of this article derive the Biot-Savart law with the alternative approach.

Solution of the Laplace's equation

In this section, we formulate the system in terms of the vector potential Θ to calculate the electric field in the free-charge space. For a single punctual charged particle this vector potential takes the following form*

$$\Theta_{punctual}(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\csc\theta - \tan\theta}{r} \hat{\phi}. \quad (2)$$

A plot of this vector potential is shown in Fig. 1-right. One can understand that the battery (responsible for the difference potential V_o between the electrode sheets) removes negative charges from the inner metal sheet and transfers them to the outer sheet. The total electric vector potential of the system comes from a superposition of individual electric vector potentials (of each punctual charge on the sheets). Since Eq. (2) does not have z -component one can expect that total vector potential fulfills $\Theta \cdot \hat{z} = 0$.

In the free-charge region the vector potential Θ satisfies the Laplace's equation Eq. (1). The Laplacian equation is a particular case of the more-general Poisson equation

$$\nabla^2\Theta(r) = S(r)$$

where S is a source vector term. The analytical solution of the previous problem can be obtained through the Green's function,

$$\Theta_i(r) = - \int_D G(r, r') S_i(r) d^3 r' + \oint_{\partial D} [\Theta_i(r') \nabla' G(r, r') - G(r, r') \nabla' \Theta_i(r')] \cdot dS, \quad (3)$$

with the $\{i\} = \{x, y, z\}$ notation and $G(r, r')$ the Green's function. Since there are no electric charges in D the source term in the Laplace's equation is zero. Therefore, the surface term is the only integral that contributes in Eq. (3):

$$\Theta_i(r) = \oint_{\partial D} [\Theta_i(r') \nabla' G(r, r') - G(r, r') \nabla' \Theta_i(r')] \cdot dS$$

This last result can be written in Cartesian coordinates by only considering the surface contribution of the electrodes laying on the xy - plane,

$$\Theta_i(r) = - \int_{\mathbb{R}^2} \Theta_i(r') \partial_{z'} G(r, r') - G(r, r') \partial_{z'} \Theta_i(r') \Big|_{z'=0} dx' dy'.$$

*The formula for the vector potential can be found straightforwardly from the electric field of a punctual particle

$$E_{punctual} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

and the $E = \nabla \times \Theta$ identity under Gauss gauge condition $\nabla \cdot \Theta = 0$.

In order to close the problem, we shall consider the Neumann boundary conditions for the vector potential on the xy -plane. Thus, the Green's function can be designed to satisfy $G = G_N(r, r')$, with

$$\nabla' G(r, r') \cdot \hat{z} = \partial_{z'} G(r, r') \Big|_{z'=0} = 0 \tag{4}$$

on the xy -plane. Hence, the definition of the vector potential simplifies to the solution of

$$\Theta_i(r) = \int_{\mathbb{R}^2} G_N(r, r') \partial_{z'} \Theta_i(r') \Big|_{z'=0} dx' dy'. \tag{5}$$

Note also that the electric field on the metallic sheets is computed from the curl of the vector potential. The electric field may be calculated by approaching the sheets on the xy -plane from the z -direction:

$$\lim_{z \rightarrow 0^+} E = (0, 0, E_z) = (\partial_y \Theta_z - \partial_z \Theta_y, \partial_z \Theta_x - \partial_x \Theta_z, \partial_x \Theta_y - \partial_y \Theta_x) \quad \forall (x, y, 0) \notin G.$$

For the single static punctual source, the z -component of the vector potential is exactly zero $\Theta_{punctual}(r) \cdot \hat{z} = 0$ (see Eq. 2). The same occurs to the global vector potential due to the charge distributions on the metallic sheets. That is explained since the global vector potential is the superposition of potentials due to punctual charges. Therefore, $\Theta_z(r) = 0$, and

$$\lim_{z \rightarrow 0^+} E = (0, 0, E_z) = (-\partial_z \Theta_y, \partial_z \Theta_x, \partial_x \Theta_y - \partial_y \Theta_x) \quad \forall (x, y, 0) \notin G.$$

The previous result implies that

$$\partial_z \Theta(r) \Big|_{z=0} = 0 \quad \forall (x, y, 0) \notin G.$$

It means that the normal derivative of the vector potential on the xy -plane is zero everywhere except on the gap region, hence

$$\Theta_i(r) = \int_{\mathbb{R}^2} G_N(r, r') \partial_{z'} \Theta_i(r') \Big|_{z'=0} dx' dy' = \int_G G_N(r, r') \partial_{z'} \Theta_i(r') \Big|_{z'=0} dx' dy'. \tag{6}$$

On the other hand, the electric field on the gap region between the sheets can be also computed by evaluating the limit

$$\lim_{z \rightarrow 0} E = (E_x, E_y, 0) = (-\partial_x \Phi, -\partial_y \Phi, 0) = (-\partial_z \Theta_y, \partial_z \Theta_x, \partial_x \Theta_y - \partial_y \Theta_x) \quad \forall (x, y, 0) \in G.$$

As a result, the z -derivative of the vector potential on the gap $\partial_z \Theta =: -W$ is related to the scalar potential, as follows

$$\partial_z \Theta = (-\partial_y \Phi, \partial_x \Phi, 0) := -W \quad \forall (x, y, 0) \in G.$$

It is convenient to write vector W in polar coordinates $r = (u, \phi, z)$ on the gap region, as follows

$$W(u, \phi, z) = -\frac{1}{u} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} \hat{u} + \frac{\partial \Phi}{\partial u} \hat{\phi} \quad \forall (u, \phi, 0) \in G.$$

Thus, Eq. (6) takes the form

$$\Theta(r) = - \int_G G_N(r, r') W(r') d^2 r'. \tag{7}$$

Now, regarding the definition of the Green's function in Eq. (7), one can use the method of images and propose $G_N(r, r')$ as the function of two punctual identical charges symmetrically placed at z' and $-z'$,

$$G_N(r, r') = -\frac{1}{4\pi} \frac{1}{|r-r'|} + \left[-\frac{1}{4\pi} \frac{1}{|r-r'|} \right]_{z' \rightarrow -z'}, \quad \text{hence} \quad \lim_{z' \rightarrow 0} G_N(r, r') = -\frac{1}{2\pi} \frac{1}{|r-r'|} \Big|_{z'=0}.$$

It can be shown straightforwardly that this definition of the Green's function fulfills the boundary condition in Eq. (4). Finally, by replacing the previous Green's function definition into Eq. (7) the vector potential can be written as

$$\Theta(r) = \frac{1}{2\pi} \int_G \frac{W(r')}{|r-r'|} d^2r', \quad (8)$$

which is the solution of the Laplace's equation of the electric vector potential imposing Neumann boundary conditions on the gap region G . One can observe that electric vector potential in Eq. (8) is mathematically equivalent to the standard vector potential in magnetostatics $A(r)$ (Jackson, 1999), computed from

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_G \frac{K(r')}{|r-r'|} d^2r', \quad (9)$$

with $K(r')$ a steady surface density current and $B = \nabla \times A$ the magnetic field. In fact, both vector potentials A and Θ can be used to compute the B and E fields in the free-space. If we study Eq. (9), one could state that electric currents are sources of the magnetic vector potential in a Coulomb-like way. Similarly, spatial variations on the electric scalar potential would be the sources of $\Theta(r)$ according to Eq. (8). Unfortunately, these interpretations are quite subjective since *both vectors potentials are not physically observable under a classical viewpoint* since they are not unique: Vector potentials depend on a certain gauge choice (i.e. a Coulomb gauge).

Thus, the electric field is found from the curl of the vector potential,

$$E = \nabla \times \Theta = \frac{1}{2\pi} \int_G \nabla \times \frac{W(r')}{|r-r'|} dr' \quad \text{for } z > 0.$$

Using the vector identity $\nabla \times [\lambda(r, r')F(r')] = \nabla\lambda \times F(r')$ with $\lambda = |r - r'|^{-1}$, one finally obtains the Biot-Savart like law

$$E(r) = \frac{1}{2\pi} \int_G \frac{W(r')(r-r') \times d^2r'}{|r-r'|^3}. \quad (10)$$

The electric field in Eq. (10) is the electrostatic analogue of the magnetic field due to a closed ribbon on the G region carrying a constant surface density current $K(r)$. An analogous role is played by $W(r)$ in the SE electrostatic system. The Biot-Savart-like in Eq. (10) provides an integral solution of the electric field when the $W(r)$ field is known. That is exactly the gapless limit case, where electrodes are infinitely close each other. In general, $W(r)$ is unknown and it must be constructed over G for gaped SE. In those cases $W(r)$ can be computed by approximating the scalar electric potential Φ on the gap region. One strategy to approximate Φ on the gap forces the zero charge condition on the mid trajectory on the gap. That strategy has been originally developed for the circular gaped SE in (Schmied, 2010). The same approach can be applied for arbitrary geometry gaped SE (Salazar *et al.*, 2022). Therefore, one can understand the vector potential approach Θ here presented as a versatile way to find solutions in electrostatics. It fits better the nature of gaped SE problems rather than the traditional electric scalar potential Φ .

The gapless limit

In the gapless limit, the G region is infinitely thick and it becomes a closed loop c . For instance, if G is an annular region of ΔR thickness

$$G = \{(u, \phi) : R - \Delta R/2 < u < R + \Delta R/2 \wedge \phi \in [0, 2\pi]\},$$

then G becomes a circular loop of radius R in the $\Delta R \rightarrow 0$ limit. In this limit, one can also compute the W vector since the potential on $z = 0$ is

$$\lim_{\Delta R \rightarrow 0} \Phi(u, \phi, 0) = V_o \quad \text{if} \quad u < R \quad \text{otherwise} \quad 0.$$

Hence, the W vector is computed from

$$\lim_{\Delta R \rightarrow 0} W = \lim_{\Delta R \rightarrow 0} -\partial_u \Phi(u, \phi, 0) \hat{\phi} = V_o \delta(u - R) \hat{\phi}, \quad (11)$$

where the derivative of the unit step function is a Dirac delta function. Replacing Eq. (11) into the surface integral Eq. 10, it becomes the following loop integral

$$E = \frac{V_o}{2\pi} \oint_c \frac{(r - r') \times dr'}{|r - r'|^3} \quad \text{for} \quad z > 0,$$

where the c loop is counter-clock-wisely defined with respect to the z -axis. The result also is valid for an arbitrary closed loop. The central result in Ref. (Oliveira & Miranda, 2001) is recovered from Eq. (10) in the gapless limit.

Conclusions

The electric field of planar metal sheets under a constant potential difference separated by a gap region has been studied in this article. The electric field is merely a Biot-Savart like integral on the gap region. The integral expression has been the solution of the Laplace's equation of the electric vector potential associated with the electric field under Neumann boundary conditions on the gap. In that sense, the vector potential formulation has described the electric field of planar surface electrodes instead of the scalar potential approach. We have proved that results in Ref. (Oliveira & Miranda, 2001) can be equally derived from Eq. (10) in the particular case of an infinitely thin gap.

As a future work, one can study the non-stationary surface electrode where the metal sheets are set to a time dependent scalar potential. This type of system is also important for engineering since it is basically a dipole blade radiator. In that case, the electric vector potential $\Theta(r)$ satisfies a wave equation which is essentially a 4-dimensional Laplacian under an appropriate way to chose the Gauge. In this document we showed that it is possible to determine the electric field of the system by solving the Laplace's equation for the electric vector potential. It is known that a time-dependent generalization of the magnetic vector potential in Eq. (9) concerns the retarded solution of the wave equation (Jackson, 1999).[†]

The question is if there exist a retarded version of the electric vector potential Θ which enable us to compute the radiated electric field via $E(r, t) = \nabla \times \Theta(r, t)$. Resembling over Eqs. (8) and (9), one can expect that the electric vector potential would certainly have a retarded formula for the dynamic propagation case. As a future work we expect to generalize the strategy presented in this document to find the time-dependent version of the electric vector potential.

The present article demonstrated another plausible approach to studying the gaped SE advantageous regarding Ref. (Salazar *et al.*, 2020) since it becomes mathematically simpler. That is constructing the electric vector potential from a superposition of vector potentials

[†]As presented in the reference, the time-dependent version of Eq. (9) is given by

$$A(r, t) = \frac{\mu_o}{4\pi} \int_G \frac{K(r', t_{ret})}{|r - r'|} d^2 r'$$

where t_{ret} refers to the retarded time $t_{ret} := t - |r - r'|/c$, with c the velocity of light, and the radiated magnetic field $B(r, t) = \nabla \times A(r, t)$.

of individual static charges (see Fig. 1-right) on the metallic sheets and a Coulomb gauge condition. Results in Ref. (Salazar *et al.*, 2020) have been alternatively derived here and framed under an analytical strategy suitable to be generalized for time-dependent versions of the gaped SE.

Acknowledgments

This work was partially supported by Vicerrectoría de investigación, Universidad ECCI. C. Bayona-Roa acknowledges the technical support given by the Centro de Ingeniería Avanzada y Investigación y Desarrollo – CIAID.

Contribución de los autores

RS and CBR conceived of the presented idea. All the authors developed the theory. DJ verified the analytical methods. All authors discussed the results and contributed to the final manuscript.

Conflicts of Interest Statement

The authors declare that they have no conflicts of interest.

References

- Albanese, R., Rubinacci, G. (1990). Treatment of multiply connected regions in two-component electric vector potentials formulations. *IEEE transactions on magnetics*, 26(2), 650-653. doi: 10.1109/20.106401
- Balanis, C. A. (2015). *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons.
- Chiaverini, J., Blakestad, B. R., Britton, J. W., Jost, J. D., Langer, C., Leibfried, D. G., Wineland, D. J. (2005). Surface-electrode architecture for iontrap quantum information processing. *Quantum Information and Computation*, 5(Quantum Information and Computation). doi: 10.1088/1367-2630/12/2/023038
- Daniilidis, N., Narayanan, S., Möller, S. A., Clark, R., Lee, T. E., Leek, P. J., Häffner, H. (2011). Fabrication and heating rate study of microscopic surface electrode ion traps. *New Journal of Physics*, 13(1), 013032. doi: 10.1088/1367-2630/13/1/013032
- Hicks, B. C., Paravastu-Dalal, N., Stewart, K. P., Erickson, W. C., Ray, P. S., Kassim, N. E., Burns, S., Clarke, T., Schmitt, H., Craig, J., Hartman, J., Weiler K. W. (2012). A wide-band, active antenna system for long wavelength radio astronomy. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 124(920), 1090. doi: 10.1086/668121
- Hong, S., Lee, M., Kwon, Y.-D., Dan Cho, Dong-Il, Kim, T. (2017). Experimental methods for trapping ions using microfabricated surface ion traps. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (126), e56060. doi: 10.3791/56060
- House, M. (2008). Analytic model for electrostatic fields in surface-electrode ion traps. *Physical Review A*, 78(3), 033402. doi: 10.1103/PhysRevA.78.033402
- Jackson, J. D. (1999). *Classical electrodynamics*. JhonWiley & Sons, Inc.
- Kim, T. H., Herskind, P. F., Chuang, I. L. (2011). Surface-electrode ion trap with integrated light source. *Applied Physics Letters*, 98(21), 214103. doi: 10.1063/1.3593496
- Landis, C. M. (2002). A new finite-element formulation for electromechanical boundary value problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 55(5), 613-628. doi: 10.1002/nme.518
- Mokhberi, A., Schmied, R., & Willitsch, S. (2017). Optimised surface-electrode ion-trap junctions for experiments with cold molecular ions. *New Journal of Physics*, 19(4), 043023. doi: 10.1088/1367-2630/aa6918
- Mozden, T., Bowman, J., Monsalve, R., Rogers, A. (2017). Improved measurement of the spectral index of the diffuse radio background between 90 and 190 mhz. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464(4), 4995-5002. doi: 10.1093/mnras/stw2696

- Oliveira, M. H., Miranda, J. A.** (2001). Biot-savart-like law in electrostatics. *European Journal of Physics*, 22(1), 31. doi: 10.1088/0143-0807/22/1/304
- Salazar, R., Bayona, C., Chaves, J.** (2019). Electrostatic field of angular-dependent surface electrodes. *The European Physical Journal Plus*, 135(93). doi: 10.1140/epjp/s13360-019-00090-3
- Salazar, R., Bayona, C., Téllez, G.** (2020). Electric vector potential formulation in electrostatics: Analytical treatment of the gaped surface electrode. *The European Physical Journal Plus*, 135(878). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00864-0>
- Salazar, R., Bayona, C., Tellez, G.** (2022). Monte carlo simulations of twocomponent coulomb gases applied in surface electrodes. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 34(14), 144007. doi: 10.1088/1361-648X/ac4aa8
- Schmied, R.** (2010). Electrostatics of gapped and finite surface electrodes. *New Journal of Physics*, 12(2), 023038. doi: 10.1088/1367-2630/12/2/023038
- Seidelin, S., Chiaverini, J., Reichle, R., Bollinger, J. J., Leibfried, D., Britton, J., Wesenberg, J. H., Blakestad, R. B., Epstein, R. J., Hume, D. B., Itano, W. M., Jost, J. D., Langer, C., Ozeri, R., Shiga, N., Wineland D. J.** (2006). Microfabricated surface-electrode ion trap for scalable quantum information processing. *Physical review letters*, 96(25), 253003. (doi: 10.1103/PhysRevLett.96.253003)
- Semenov, A., Kessler, H., Liskowsky, A., Balke, H.** (2006). On a vector potential formulation for 3d electromechanical finite element analysis. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 22(5), 357-375. doi: 10.1002/cnm.818
- Stark, S., Semenov, A. S., Balke, H.** (2015). On the boundary conditions for the vector potential formulation in electrostatics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 102(11), 1704-1732. doi: 10.1002/nme.4859
- Tao, J., Chew, N. P., Guidoni, L., Lim, Y. D., Zhao, P., Tan, C. S.** (2018). Fabrication and characterization of surface electrode ion trap for quantum computing. In *2018 IEEE 20th electronics packaging technology conference (eptc)* (pp. 363-366). doi: 10.1109/EPTC.2018.8654328
- Van Mourik, M. W., Martinez, E. A., Gerster, L., Hrmo, P., Monz, T., Schindler, P., Blatt, R.** (2020). Coherent rotations of qubits within a surface ion-trap quantum computer. *Physical Review A*, 102(2), 022611. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.022611>
- Zhang, G. J., Wang, G. L.** (1999). A new approach to sp computation-vector potential approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(4), 2092-2098. doi: 10.1109/36.7747198

Artículo original

Comparación de la riqueza de insectos utilizando dos métodos de recolección en un humedal costero del Pacífico suramericano

Comparison of insect richness with two collection methods in a coastal wetland of the South American Pacific

 Cristhian Raúl Rossi-La Torre

Laboratorio de Entomología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Resumen

Se comparó la capacidad de captura de trampas de caída y bandejas amarillas para así determinar si el esfuerzo de muestreo empleado sería el adecuado al emplear las dos metodologías a la vez. El muestreo se hizo en los humedales del distrito de Ventanilla, provincia constitucional del Callao, departamento de Lima, Perú, donde se establecieron ocho estaciones en febrero, julio y diciembre del 2016. En cada estación se ubicaron diez trampas de caída sin cebo y cinco bandejas amarillas. Se recolectaron 160 morfoespecies, distribuidas en 68 familias y ocho órdenes, de las que 138 se recolectaron en bandejas amarillas y 78 en trampas de caída, con una similitud de 0,31 según el índice de Jaccard. Hubo una diferencia significativa en la riqueza entre los dos métodos y la diversidad de Shannon-Wiener fue superior a 3,5 utilizando las bandejas amarillas en febrero y diciembre; no hubo una diferencia significativa entre los métodos en los índices de diversidad y dominancia, excepto en diciembre. Según los estimadores no paramétricos, la riqueza de la recolección en las bandejas amarillas fluctuó entre el 62,7 y el 72,3 %, y en las trampas de caída, entre el 63,9 y el 74,3 %. La curva de acumulación reflejó un mejor desempeño con las bandejas amarillas. El uso de una menor cantidad de bandejas amarillas que de trampas de caída permitió recolectar una cantidad mayor de insectos. Su empleo combinado es fundamental para obtener una muestra representativa de la riqueza al mantenerse la proporción mencionada para evitar un registro muy elevado de algunos taxones.

Palabras clave: Trampas de caída; Bandejas amarillas; Curva de acumulación; Estimadores no paramétricos; Esfuerzo de muestreo.

Abstract

The capture capacity of pitfall traps and yellow pan traps was compared to determine if the sampling effort used would be suitable using both methods at the same time. The sampling was carried out in the coastal wetlands of Ventanilla district, constitutional province of Callao, Lima department, Perú, where eight sampling stations were evaluated in February, July, and December 2016. Ten unbaited pitfall traps and five yellow pan traps were placed at each station; 160 morphospecies distributed in 68 families and eight orders were collected, 138 from yellow pan traps and 78 in pitfall traps with a similarity of 0.31 in the Jaccard index. There was a significant difference in richness between both methods and the diversity was over 3.5 in the yellow pan traps in February and December; there was no significant difference between traps in the diversity and dominance indices except in December. According to non-parametric estimators, the richness in yellow pan traps was between 62.7% and 72.3% of the estimated value while in pitfall traps it ranged between 63.9% and 74.3%. The accumulation curve showed a better performance with pan traps. The use of fewer yellow pan traps than pitfall traps resulted in a higher number of insects collected. Their combined use was essential to obtain a representative sample of richness and maintain the proportion to avoid a very high registration of some taxa.

Keywords: Pitfall traps; Yellow pan traps; Non-parametric estimators; Accumulation curve; Sampling effort.

Citación: Rossi-La Torre CR.
Comparación de la riqueza de insectos utilizando dos métodos de recolección en un humedal costero del Pacífico suramericano. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):947-958, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1765>

Editor: Elizabeth Castañeda

Correspondencia:

Cristhian Raúl Rossi-La Torre;
cristhian.rossi@unmsm.edu.pe

Recibido: 7 de septiembre de 2022

Aceptado: 11 de noviembre de 2022

Publicado en línea: 25 de noviembre de 2022



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

Introducción

Con más de un millón de especies, los insectos son el grupo de animales con la mayor riqueza descrita (Beutel *et al.*, 2017; Mayhew, 2018) y se distribuyen en una gran cantidad de hábitats (Swengel, 2001; Ulrichs & Hopper, 2008), pues se han adaptado para aprovechar los recursos alimenticios (Pearson & Dyer, 2006). Al ser un grupo tan diverso, siempre es posible obtener ejemplares de algunos órdenes en campo, por lo que frecuentemente se los utiliza en estudios de impacto ambiental como bioindicadores de la calidad del agua (Peralta & Huamantínco, 2014), para conocer el grado de conservación de los hábitats (Oroz *et al.*, 2018; Pedraza *et al.*, 2010; Rossi *et al.*, 2018), calcular los patrones de diversidad de las especies (Beck & Kitching, 2007) y estudiar las enfermedades transmitidas por vectores (Barreto *et al.*, 2006; Moreno *et al.*, 2002; Salazar *et al.*, 2006; Villaseca *et al.*, 1999).

Debido a la gran variedad de hábitats en que viven los insectos y los diferentes tipos de comportamiento que presentan, se han desarrollado métodos de recolección específicos que hacen uso de las características más comunes del grupo de interés. Entre ellas pueden mencionarse las trampas activas, que utilizan atrayentes o cebos para capturar a los individuos por su comportamiento o hábitos alimenticios, por ejemplo, las trampas de luz, bandejas o platos de diferentes colores y las trampas de caída con excremento animal (coprófagos) o con materia orgánica en descomposición (necrófagos), y las trampas pasivas, que se ubican en zonas de tránsito natural de los insectos y los capturan, entre ellas, las trampas de caída sin cebo, las trampas Malaise y las trampas de interceptación (Bar *et al.*, 2022; Boito *et al.*, 2009; Missa *et al.*, 2009; Parys & Johnson, 2011; Sabu & Shiju, 2010).

En varios estudios se han empleado diferentes técnicas para comparar la eficacia y el esfuerzo de muestreo, y se señalan las ventajas y las desventajas de unas y otras, además de aportar datos sobre los taxones específicos que pueden recolectarse en determinadas condiciones (Boyer *et al.*, 2020; Buffington *et al.*, 2021; Cheli & Corley, 2010; Hohbein & Conway, 2018; Mena *et al.*, 2016; Rajmohana & Trivedi, 2019; Shweta & Rajmohana, 2018; Siewers *et al.*, 2014; Westerberg *et al.*, 2021; Zaller *et al.*, 2015). En algunos de estos estudios se reconoce la gran capacidad de captura de las bandejas amarillas y las trampas de caída frente a otras técnicas, sin embargo, no se establece una cantidad exacta o recomendada para utilizarlas en el monitoreo ambiental o los inventarios biológicos, porque depende de los grupos de interés y los hábitats a evaluar.

En el presente estudio se comparó la capacidad de captura de las bandejas amarillas y las trampas de caída sin cebo, con el fin de determinar si el empleo de una menor cantidad de bandejas podría considerarse un esfuerzo adecuado frente a la cantidad de trampas de caída utilizadas en una misma estación de muestreo. El estudio se desarrolló en los humedales de Ventanilla, un área de fácil acceso que cuenta con una gran diversidad de insectos, principalmente representados por familias de hábitos fitófagos y depredadores, entre los meses de diciembre y abril, que coinciden con la temporada de menor cantidad de agua (Gobierno Regional del Callao, 2015; Sánchez *et al.*, 2019).

Materiales y métodos

Métodos de muestreo

El muestreo se realizó en los humedales del distrito de Ventanilla, ubicado en la provincia constitucional del Callao, departamento de Lima, Perú. Se establecieron ocho estaciones en febrero, julio y diciembre del 2016 (Tabla 1). En cada una se instaló una línea con diez trampas de caída (TC) (Cheli & Corley, 2010) de 12 cm de altura, con circunferencia basal de 29,5 cm y abertura de 36,8 cm, separadas aproximadamente cinco metros una de otra, y cinco bandejas amarillas (BA) (Schauff, 2001) de 28,5 x 22 x 2,5 cm, con diez metros de distancia entre ellas (Figura 1). Estas cantidades, representativas en ambos casos, se establecieron para corroborar la hipótesis de que una menor cantidad de bandejas amarillas que de trampas de caída sin cebo sería suficiente para recolectar una riqueza y diversidad de

Tabla 1. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo en los humedales de Ventanilla, Callao - Perú

Estación de muestreo	Longitud	Latitud	Altitud (m.s.n.m.)
E1	77° 8'54,45"W	11°52'50,61"S	14
E2	77° 8'55,77"W	11°52'46,79"S	12
E3	77° 8'58,14"W	11°52'40,69"S	24
E4	77° 8'53,35"W	11°52'37,27"S	24
E5	77° 8'50,09"W	11°52'38,76"S	21
E6	77° 9'1,11"W	11°52'36,66"S	23
E7	77° 9'6,74"W	11°52'34,57"S	18
E8	77° 9'8,40"W	11°52'27,46"S	11

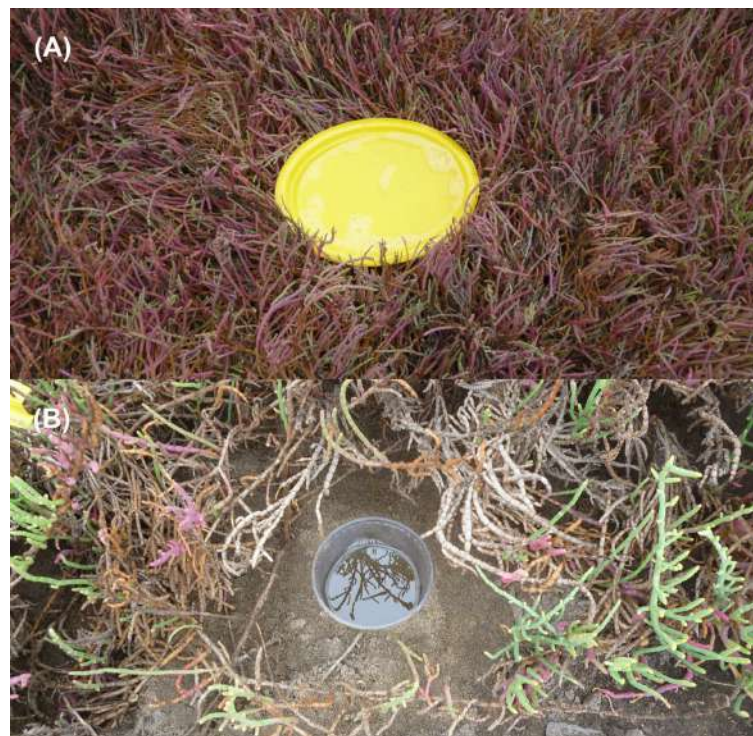


Figura 1. Bandeja amarilla (A) y trampa de caída (B) en una estación de muestreo de los humedales de Ventanilla

ejemplares similar o superior a la otra técnica utilizada. Para ello se siguió la metodología descrita por Rossi *et al.* (2018) en un bosque de *Polylepis tomentella*. El medio de captura incluyó agua, detergente líquido y sal; se depositó aproximadamente el equivalente a un cuarto del envase en las trampas de caída y 200 ml en las bandejas amarillas, las cuales permanecieron activas durante 48 horas. Las muestras se recolectaron en bolsas de polipropileno con alcohol al 70° y se transportaron al laboratorio de entomología de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, donde se lavaron y separaron con agua en bandejas de plástico para su conteo e identificación hasta el nivel de morfoespecie (Commonwealth Scientific and Industrial Research - CSIRO, 1991; Triplehorn & Johnson, 2005; Zhang, 2011), y luego se depositaron en la colección del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en Lima.

Análisis de datos

Se analizó la riqueza de morfoespecies por cada mes de muestreo y tipo de trampa, indicando los grupos dominantes en cada uno (órdenes y familias). La comunidad de insectos se evaluó con los índices de diversidad de Shannon-Wiener (H'), de dominancia de Simpson (D) y de equidad de Pielou (J') (Magurran & McGill, 2011); todos ellos se sometieron a la prueba de medianas con el test de Kruskal-Wallis para comprobar si hubo diferencias significativas entre los meses y tipos de muestreo. Se utilizaron estimadores no paramétricos (Chao, Jackknife 1 y 2) para calcular la riqueza esperada por mes y tipo de trampa (Chao *et al.*, 2017; Colwell *et al.*, 2004; Gwinn *et al.*, 2016). Mediante el índice de Jaccard se hizo un análisis de similitud entre ambos tipos de trampa para conocer qué tan semejantes eran respecto a la riqueza recolectada. Por último, se elaboraron curvas de acumulación de especies (Jiménez & Hortal, 2003; Ugland *et al.*, 2003) con el paquete iNEXT (Chao *et al.*, 2014; Hsieh *et al.*, 2016, 2022). Los análisis de diversidad y similitud se realizaron con el programa PAST v. 4.0 (Hammer *et al.*, 2001), y el test de medianas y las curvas de acumulación y estimación de riqueza con los paquetes Stats, iNEXT y BiodiversityR (Kindt & Coe, 2005) en Rstudio v. 1.4.1717 (R Core Team, 2022).

Resultados

Se recolectaron 160 morfoespecies distribuidas en 68 familias y ocho órdenes taxonómicos. Díptera (65), Hymenoptera (47), Hemiptera (23) y Coleoptera (17) fueron los órdenes de mayor riqueza en los tres meses de muestreo (Figura 2). En febrero, Díptera fue el grupo de mayor riqueza (S), con 47 morfoespecies, de las que 41 se recolectaron en bandejas amarillas y 23 en trampas de caída. Hymenoptera fue el segundo grupo, con S = 29, de las cuales 25 se recolectaron en bandejas amarillas y 11 en trampas de caída. Hemiptera y Coleoptera solo aportaron 13 morfoespecies en conjunto. En julio se observó que la riqueza disminuyó: Díptera presentó 22 morfoespecies (BA = 19, TC = 4), Hymenoptera 10 (BA = 9, TC = 1), Hemiptera 5 (BA = 2, TC = 4) y Coleoptera 3 (BA = 2, TC = 1). En diciembre se observó un incremento similar a febrero: Díptera con S = 40 (BA = 34, TC = 17), Hymenoptera con S = 28 (BA = 27, TC = 5), Hemiptera con S = 18 (BA = 11, TC = 12) y Coleoptera con S = 8 (BA = 5, TC = 7). Hubo diferencias significativas en la riqueza en los meses de febrero y diciembre con ambos métodos. Del total de familias observadas, 28 (17,5 %) se recolectaron exclusivamente en bandejas amarillas, entre ellas Braconidae, Crabronidae (Hymenoptera), Stratiomyidae y Muscidae (Diptera); ocho (5 %) en trampas de caída: Chrysomelidae (Coleoptera), Chrysididae (Hymenoptera), Otitidae, Tabanidae

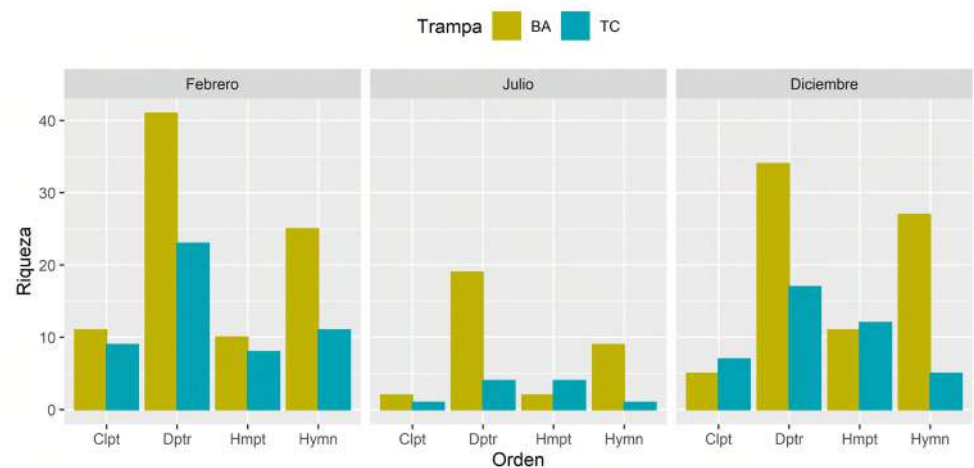


Figura 2. Riqueza de morfoespecies de los órdenes dominantes por tipo de trampa durante todo el periodo de estudio. Clpt: Coleoptera, Dptr: Díptera, Hmpt: Hemiptera, Hymn: Hymenoptera

(Diptera), Berytidae, Corixidae, Veliidae (Hemiptera) e Yponomeutidae (Lepidoptera), todas representadas por una morfoespecie, y 32 (20 %) se recolectaron con ambas técnicas, entre las cuales cabe mencionar a Coccinellidae, Hydrophilidae (Coleoptera), Anthomyzidae, Chironomidae, Dolichopodidae, Ephydriidae (Diptera), Cicadellidae (Hemiptera), Ichneumonidae, Pompilidae, Braconidae y Diapriidae (Hymenoptera) (**Tabla 2**).

En el orden Diptera, las familias Dolichopodidae y Ephydriidae fueron las de mayor aporte de morfoespecies en los tres meses de muestreo, seguidas de Chironomidae y Anthomyzidae. Chironomidae tuvo más registros en trampas de caída solo en febrero; en julio y diciembre las otras familias presentaron mayor cantidad de morfoespecies recolectadas en bandejas amarillas. En Hymenoptera, cuatro familias registraron la mayor riqueza: Pompilidae, Ichneumonidae, Braconidae y Diapriidae. En febrero, Diapriidae y

Tabla 2. Riqueza de morfoespecies por familia recolectada y tipo de trampa durante todo el período de muestreo. BA: bandeja amarilla; TC: trampa de caída

Orden	Familia	Trampa		Total
		BA	TC	
Coleoptera	Chrysomelidae	0	1	1
	Coccinellidae	5	5	5
	Elateridae	1	1	1
	Endomychidae	1	2	2
	Hydraenidae	2	0	2
	Hydrophilidae	2	3	3
	Staphylinidae	1	1	1
	Tenebrionidae	1	1	2
	Agromyzidae	2	0	2
	Anthomyzidae	5	2	6
	Cecidomyiidae	1	1	1
	Chironomidae	6	6	7
	Chloropidae	2	1	2
	Chyromyidae	2	0	2
	Culicidae	1	0	1
	Dolichopodidae	13	9	14
Diptera	Drosophilidae	2	0	2
	Ephydriidae	8	6	8
	Hybotidae	2	0	2
	Muscidae	3	0	3
	Otitidae	0	1	1
	Phoridae	2	2	2
	Sarcophagidae	2	0	2
	Scatopsidae	1	1	1
	Sphaeroceridae	1	2	2
	Stratiomyidae	4	0	4
	Syrphidae	1	0	1
	Tabanidae	0	1	1
	Tipulidae	1	1	1

Hemiptera	Anthocoridae	1	1	2
	Aphididae	2	2	2
	Berytidae	0	1	1
	Cicadellidae	7	3	7
	Cixiidae	1	1	1
	Corixidae	0	1	1
	Delphacidae	2	2	2
	Geocoridae	1	0	1
	Lygaeidae	1	0	1
	Miridae	1	0	1
	Reduviidae	1	1	2
	Saldidae	1	1	1
	Veliidae	0	1	1
	Aphelinidae	1	0	1
Hymenoptera	Apidae	1	0	1
	Braconidae	4	0	4
	Chalcididae	2	0	2
	Chrysididae	0	1	1
	Crabronidae	3	0	3
	Diapriidae	4	3	4
	Encyrtidae	2	1	3
	Eulophidae	2	0	2
	Figitidae	2	1	2
	Formicidae	1	1	2
	Halictidae	1	0	1
	Ichneumonidae	6	2	6
	Mutillidae	1	0	1
	Mymaridae	1	0	1
	Perilampidae	2	0	2
	Pompilidae	6	4	8
	Pteromalidae	1	0	1
Scelionidae	2	0	2	
Lepidoptera	Elachistidae	1	1	1
	Gelechiidae	1	1	1
	Hesperiidae	1	0	1
	Yponomeutidae	0	1	1
Odonata	Coenagrionidae	1	1	2
Psocoptera	Trogiidae	1	0	1
Thysanoptera	Thripidae	1	0	1

Pompilidae se registraron con cuatro morfoespecies en bandejas amarillas y tres en trampas de caída. En julio, Braconidae se reportó con cuatro morfoespecies, todas recolectadas en bandejas amarillas. En diciembre, Ichneumonidae y Braconidae se recolectaron solo en bandejas amarillas, y de Pompilidae se recolectaron cuatro morfoespecies, una de ellas también recolectada en trampas de caída. Las familias de los órdenes de menor riqueza por lo general se recolectaron en bandejas amarillas (**Tabla 2**).

La diversidad (H') fue superior a 3,5 en las bandejas amarillas en febrero y diciembre. En julio, la dominancia fue mayor por la influencia de los registros de Ephydridae. Según el test de Kruskal-Wallis, no hubo diferencia significativa ($p < 0,05$) en la diversidad, excepto en diciembre, y tampoco en la dominancia, pero sí en la equidad total (J') entre los dos tipos de trampa (**Tabla 3**). Según el índice de Jaccard, la similitud entre los dos métodos fue de 0,31 durante todo el estudio. El esfuerzo de muestreo realizado con las trampas de caída fue de 240 (10 trampas x 8 estaciones x 3 meses) y con las bandejas amarillas de 120 (5 bandejas x 8 estaciones x 3 meses). La riqueza observada en las bandejas amarillas fue de 138, y según los estimadores Chao y Jackknife 1 y 2, la riqueza esperada se encontraría entre 191 y 220, lo que indica que se logró recolectar entre el 62,7 y el 72,3 % del total de especies. En las trampas de caída se observaron 78 morfoespecies y según los estimadores no paramétricos, la riqueza esperada se encontraría entre 105 y 122, es decir que con esta técnica podría haberse recolectado entre el 63,9 y el 74,3 % de las especies que habitarían el humedal (**Tabla 4**). En ninguno de los casos llegaron a estabilizarse las curvas de acumulación, sin embargo, se observó un mejor desempeño con las bandejas amarillas (**Figura 3**).

Discusión

La amplia diversidad de insectos y su distribución en los diferentes hábitats requiere el empleo de varias técnicas de muestreo (**Missa et al.**, 2009) que permitan obtener una muestra representativa de la riqueza en el menor tiempo posible para inventarios biológicos y estudios de impacto ambiental, ya sea como línea de base o monitoreos, especialmente cuando se necesita información más precisa sobre grupos hiperdiversos (**Donateli &**

Tabla 3. Análisis de medianas con la prueba de Kruskal-Wallis y significación de 0,05 para los índices de diversidad de las trampas utilizadas durante todo el muestreo. S: riqueza de morfoespecies, H' : diversidad de Shanon-Wiener, D: dominancia de Simpson, J' : equidad de Pielou

	S	H'	D	J'
Total	12,987	3,651	0,664	8,892*
Febrero	7,814*	2,824	0,276	2,824
Julio	2,000	0,125	0,000	3,429
Diciembre	10,992*	4,864*	1,864	1,864

*: $p < 0,05$

Tabla 4. Riqueza observada y estimada con los estimadores no paramétricos e índices de diversidad por cada mes y tipo de trampa

	Bandeja amarilla				Trampa de caída			
	Total	Febrero	Julio	Diciembre	Total	Febrero	Julio	Diciembre
Órdenes	8	8	5	5	7	6	4	4
Familias	60	49	20	36	44	31	9	25
Morfoespecies	138	93	33	78	78	55	10	41
Chao	198	130	62	107	105	74	38	56
Jack1	191	129	53	110	109	76	17	59
Jack2	220	147	65	125	122	86	22	66
Diversidad (H')	3,66	3,61	1,65	3,51	3,74	3,44	2,17	3,30
Dominancia (D)	0,06	0,05	0,39	0,05	0,03	0,05	0,13	0,05
Equidad (J')	0,74	0,80	0,47	0,80	0,86	0,86	0,94	0,89

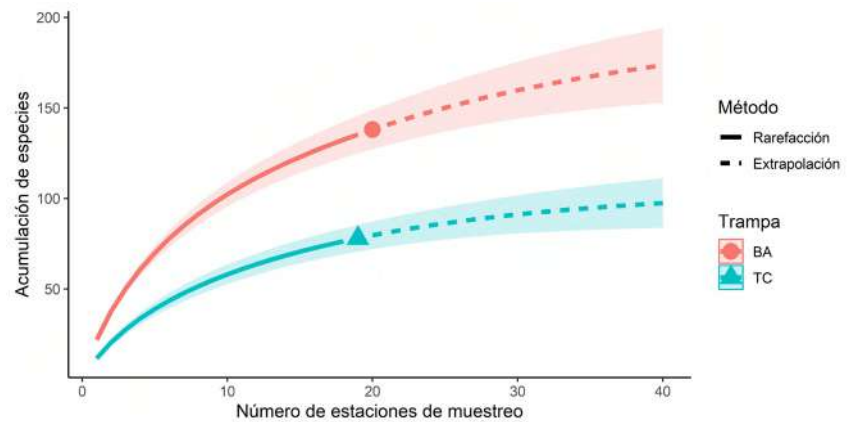


Figura 3. Curvas de acumulación de especies por el método de rarefacción. La línea entera corresponde al registro acumulado de morfoespecies y la línea punteada a la extrapolación de los datos. El área sombreada corresponde al 95 % del intervalo de confianza.

Alves, 2019). Estas metodologías deben enfocarse en el grupo de interés, y para ello es necesario conocer, por lo menos, las características tróficas o de comportamiento que permitan escoger la más adecuada. Las dos técnicas de muestreo analizadas aquí son sencillas, tienen bajo costo y un amplio rango de captura (**Jerez**, 2000).

Por ser del tipo pasivo, las trampas de caída sin cebo solo capturan individuos que se desplazan preferentemente por el suelo sin ejercer atracción alguna. Por lo general se usan para capturar escarabajos, hormigas y arañas y su eficacia depende de su diseño y de las condiciones del hábitat. En el presente estudio se utilizó un diseño simple, como lo recomiendan **Siewers et al.** (2014), quienes compararon tres diseños de trampa de caída, dos con cubierta y una abierta, y observaron que la eficacia de captura no fue diferente entre ellas. Aquí se pudieron recolectar grupos que se desplazan exclusivamente entre la vegetación y el suelo, como algunos coleópteros y hemípteros. Este tipo de trampas ha demostrado ser eficaz en una gran variedad de comunidades vegetales: bosques, campos agrícolas, matorrales y pastizales, donde la metodología empleada no varía significativamente (**Hohbein & Conway**, 2018). Las bandejas o platos de colores son trampas activas que atraen a los insectos; la riqueza, abundancia y diversidad de los ejemplares capturados dependen de los colores empleados (**Buffington et al.**, 2021; **Mena et al.**, 2016). El amarillo se usa para la mayoría de los insectos voladores, sobre todo de las familias del orden Diptera (**Santos & Fernandes**, 2021; **Westerberg et al.**, 2021), lo que pudo comprobarse en este trabajo. Estas trampas son importantes porque pueden atraer herbívoros y predadores, son fáciles de ubicar en campo y muy eficientes en el tiempo (**Rajmohana & Trivedi**, 2019); en este estudio permitieron recolectar una gran cantidad de familias, incluidas algunas de hábitos parasitoides como Braconidae e Ichneumonidae.

Se tomó como ejemplo un ecosistema de humedales cercano a una zona urbana por su fácil acceso y gran diversidad de insectos (**Sánchez et al.**, 2019). Los cuatro órdenes que registraron la mayor riqueza generalmente se encuentran en casi todos los hábitats por ser grupos hiperdiversos (**Fernández et al.**, 2021). En respuesta al hidropereodo, la mayor riqueza en las dos trampas se observó en febrero y diciembre, en tanto que julio fue el mes de menor riqueza y diversidad, pues el incremento del tamaño de los cuerpos de agua y las bajas temperaturas no favorecieron la captura de algunos grupos de insectos terrestres, además solo se obtuvieron muestras de pocas estaciones, cuatro con bandejas amarillas y tres con trampas de caída. Al existir mayor área con cobertura vegetal descubierta, en los meses de menor nivel de agua los insectos pueden distribuirse ampliamente y son atraídos en la mayoría de los casos a las bandejas amarillas, que pueden confundirse con pequeños cuerpos de agua (**Santos & Fernandes**, 2021) o flores, como lo demostraron **Westerberg**

et al. (2021) al evaluar el efecto negativo que tenía la vegetación con flores circundantes sobre el muestreo mediante bandejas de colores en un bosque de coníferas en Suecia, lo que representa un sesgo porque los grupos recolectados serían generalmente fitófagos (*Missa et al.*, 2009).

La riqueza fue diferente en febrero y diciembre con los dos tipos de trampa debido a una mayor presencia de cobertura vegetal y la atracción de grupos específicos (*Shweta & Rajmohana*, 2018), en tanto que en julio fue menor con ambas técnicas, aunque la recolección se registró principalmente en las bandejas amarillas, resultado que podría explicarse porque el color amarillo atrae a una mayor cantidad de especies dado que la reflectancia es muy similar a la del follaje verde de las plantas, como lo observaron *Mena et al.* (2016) al comparar la capacidad de captura de bracónidos con platos de diferentes colores. Además, al cubrirse de agua gran parte del humedal, la riqueza se concentró en familias con hábitos generalmente detritívoros. La diversidad fue estadísticamente similar con ambos métodos debido a la proximidad entre las formaciones vegetales, lo que permite un elevado intercambio de especies. Solo hay un trabajo previo sobre diversidad de insectos en los humedales de Ventanilla, el de *Sánchez et al.* (2019), quienes emplearon cuatro métodos de muestreo: trampas de caída, de Malaise, de recolección manual y red. El muestreo de trampas de caída consistió en dos líneas de 10 trampas, una sin cebo y la otra con carne en descomposición (necrotrampa), una vez al mes entre diciembre de 2010 y abril del 2011. A pesar de que el presente estudio difiere del mencionado, la riqueza recolectada con esas metodologías en los meses de diciembre y febrero, fue similar a la observada con las bandejas amarillas.

El uso de varios estimadores no paramétricos se recomienda para estimar el rango de la riqueza esperada, como lo anotan *Donateli & Alves* (2019) en su estudio con escarabajos de la familia Cerambycidae en Brasil, y *González et al.* (2010) al evaluar algunos estimadores en un estudio con aves en México. Aquí los indicadores estimaron que la riqueza observada se encontraría entre el 62,1 y el 74,3 % del total esperado con cualquiera de los dos métodos; según esa estimación, se esperaba que en las trampas de caída se recolectaría la mayor riqueza, sin embargo, su capacidad de captura fue menor que el de las bandejas amarillas, pues con un menor esfuerzo, en estas se logró una mayor riqueza de morfoespecies, como lo reflejó el mejor desempeño de la curva. Algunos autores recomiendan un esfuerzo de muestreo de siete a diez días con las trampas de caída (*Cheli & Corley*, 2010; *Hohbein & Conway*, 2018) para obtener una muestra representativa del hábitat estudiado; aquí solo se emplearon dos días de muestreo durante los cuales se pudo obtener aproximadamente el 70 % de la riqueza estimada con uno u otro de los dos métodos. Considerando que el humedal tiene una gran riqueza y diversidad de insectos, especialmente del orden Diptera, el esfuerzo de muestreo empleado para este hábitat fue suficiente.

Para evitar el sesgo que representa la atracción de grupos específicos a cada tipo de trampa, y que se vio reflejado en la poca similitud de los métodos, es recomendable emplearlos juntos para obtener una muestra representativa en el menor tiempo posible, ya que hay diversos factores que influyen en la diversidad obtenida (*Buffington et al.*, 2021), por ejemplo, la abundancia excesiva de algunos taxones y el comportamiento evasivo de otros (*Siewers et al.*, 2014). Esta información debe interpretarse correctamente para decidir el esfuerzo y las técnicas a emplear en la captura de los grupos de interés a partir de la eficacia y la proporción de trampas empleadas en este estudio.

Conclusiones

Los resultados permiten concluir que en el humedal de Ventanilla se pudo recolectar una muestra superior de insectos con menos bandejas amarillas comparada con la cantidad de trampas de caída, y que su empleo combinado brindó una muestra representativa de la riqueza. Por su rapidez y efectividad, este tipo de muestreo puede replicarse en diferentes hábitats manteniendo la proporción mencionada y dependiendo del área y grupo de interés a evaluar, esto para evitar recolectar una riqueza y abundancia excesivas de algunos taxones, lo que podría resultar en una interpretación equivocada de los datos.

Agradecimientos

A Víctor Morales, Leonardo Silva, Luis Arquíñigo, Luis Ramírez y Jonathan Rossi, por su apoyo en el proceso de recolección. A Blanca Cuadros e Iván Galindo por su ayuda en la separación y limpieza de las muestras para la identificación. Esta investigación fue financiada con recursos propios del autor.

Conflicto de intereses

El autor declara que no tiene conflicto de intereses.

Referencias

- Bar, A., Marom, C., Zorin, N., Gilad, T., Subach, A., Foitzik, S., Scharf, I.** (2022). Desert ants learn to avoid pitfall traps while foraging. *Biology*, *11*, 1-12. <https://doi.org/10.3390/biology11060897>
- Barreto, M., Burbano, M., Barreto, P.** (2006). Registros de *Lutzomyia* (Diptera: Psychodidae) en nuevas localidades de Colombia. *Colombia Médica*, *37*, 39-45.
- Beck, J., Kitching, I. J.** (2007). Estimating regional species richness of tropical insects from museum data: A comparison of a geography-based and sample-based methods. *Journal of Applied Ecology*, *44*(3), 672-681. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01291.x>
- Beutel, R., Yavorskaya, M., Mashimo, Y., Fukui, M., Meusemann, K.** (2017). The phylogeny of Hexapoda (Arthropoda) and the evolution of megadiversity. *Proceedings of the Arthropodan Embryological Society of Japan*, *51*, 1-15.
- Boito, G. T., Giuggia, J. A., Ornaghi, J. Á., Gerardo, U. G., Giovanini, D.** (2009). Uso de trampas “Barber” para determinar la diversidad de coleópteros epígeos asociados al cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.). Córdoba, Argentina. *Revista FCA UNCuyo*, *41*(1), 23-31.
- Boyer, K. J., Fragoso, F. P., Dieterich Mabin, M. E., Brunet, J.** (2020). Netting and pan traps fail to identify the pollinator guild of an agricultural crop. *Scientific Reports*, *10* (13819), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70518-9>
- Buffington, M., Garretson, A., Kula, R., Gates, M., Carpenter, R., Smith, D., Kula, A.** (2021). Pan trap color preference across Hymenoptera in a forest clearing. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, *169*(3), 298-311. <https://doi.org/10.1111/eea.13008>
- Chao, A., Colwell, R. K., Chiu, C. H., Townsend, D.** (2017). Seen once or more than once: Applying Good–Turing theory to estimate species richness using only unique observations and a species list. *Methods in Ecology and Evolution*, *8*(10), 1221-1232. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12768>
- Chao, A., Gotelli, N., Hsieh, T., Sander, E., Ma, K., Colwell, R.** (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*, *84*, 45-67.
- Cheli, G. H. & Corley, J. C.** (2010). Efficient sampling of ground-dwelling arthropods using pitfall traps in arid steppes. *Neotropical Entomology*, *39*(6), 912-917. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2010000600010>
- Colwell, R. K., Mao, C. X., Chang, J.** (2004). Interpolating, extrapolating, and comparing incidence-based species accumulation curves. *Ecology*, *85*(10), 2717-2727. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9066-6_13
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization - (CSIRO), Division of Entomology** (1991). *The insects of Australia. A textbook for students and research workers*. 2a. edición. Carlton, Vi.: Melbourne University Press.
- Donateli, F. & Alves, M.** (2019). Estimation of the species richness of hyperdiverse beetles (Coleoptera: Cerambycidae) in an area of atlantic forest, Minas Gerais, southeastern Brazil. *Neotropical Biology and Conservation*, *14*(4), 489-498. <https://doi.org/10.3897/neotropical.14.e49026>
- Fernández, F., Guerrero, R., Sánchez-Restrepo, A.** (2021). Systematics and diversity of Neotropical ants. *Revista Colombiana de Entomología*, *47*, e11082. <https://doi.org/10.25100/socolen.v47i1.11082>
- Gobierno Regional del Callao.** (2015). *Plan Maestro del ACR Humedales de Ventanilla (2015-2019)*. Gerencia de Medio Ambiente. 137 p.
- González, J. A., Díaz, A. A., Hernández, L., Buzo, D., Bonache, C.** (2010). Evaluación de estimadores no paramétricos de la riqueza de especies. Un ejemplo con aves en áreas verdes de la ciudad de Puebla, México. *Animal Biodiversity and Conservation*, *33*(1), 31-45.

- Gwinn, D. C., Allen, M. S., Bonvechio, K. I., Hoyer, M. V., Beesley, L. S.** (2016). Evaluating estimators of species richness: The importance of considering statistical error rates. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(3), 294-302. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12462>
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., Ryan, P. D.** (2001). PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica*, 4(1), 1-9.
- Hsieh, T., Ma, K., Chao, A.** (2016). iNEXT: an R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). *Methods in Ecology and Evolution*, 7, 1451-1456. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12613>
- Hsieh, T., Ma, K., Chao, A.** (2022). iNEXT: iNterpolation and EXTrapolation for species diversity (R package version 3.0.0). <http://chao.stat.nthu.edu.tw/wordpress/software-download/>
- Jerez, V.** (2000). Diversidad y patrones de distribución geográfica de insectos coleópteros en ecosistemas desérticos de la región de Antofagasta, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 73, 79-92.
- 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 Aracnología*, 8, 151-161. <https://doi.org/1576-9518>
- Kindt, R. & Coe, R.** (2005). *Tree diversity analysis. A manual and software for common statistical methods for ecological and biodiversity studies*. World Agroforestry Centre (ICRAF). <http://www.worldagroforestry.org/output/tree-diversity-analysis>
- Magurran, A. E. & McGill, B. J.** (2011). *Biological diversity frontiers in measurement and assessment*. Oxford University Press Inc.
- Mayhew, P. J.** (2018). Explaining global insect species richness: Lessons from a decade of macroevolutionary entomology. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 166(4), 225-250. <https://doi.org/10.1111/eea.12673>
- Mena, L., Pineda, S., Martínez, A., Gómez, B., Lobit, P., Ponce, J., Figueroa, J.** (2016). Influencia del color y altura de platos-trampa en la captura de braconidos (Hymenoptera: Braconidae). *Revista Colombiana de Entomología*, 42(2), 155-161.
- Missa, O., Basset, Y., Alonso, A., Miller, S. E., Curletti, G., Meyer, M. D., Eardley, C., Mansell, M. W., Wagner, T.** (2009). Monitoring arthropods in a tropical landscape: Relative effects of sampling methods and habitat types on trap catches. *Journal of Insect Conservation*, 13, 103-118.
- Moreno, J., Rubio, Y., Pérez, E., Sánchez, V., Páez, E.** (2002). Evaluación de tres métodos de captura de anofelinos en un área endémica de malaria del estado Bolívar, Venezuela. *Entomotropica*, 17(2), 157-165.
- Oroz, A., Bustamante, A., Farfán, J., Santander, J., A, R.** (2018). Evaluación de la artropofauna asociada a los bosques de *Polylepis* de la región Puno, Perú. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 5, 69-80.
- Parrys, K. A. & Johnson, S. J.** (2011). Collecting insects associated with wetland vegetation: An improved design for a floating pitfall trap. *The Coleopterists Bulletin*, 65(4), 341-344.
- Pearson, C. V. & Dyer, L. A.** (2006). Trophic diversity in two grassland ecosystems. *Journal of Insect Science*, 2006(25), 1-11. https://doi.org/10.1673/2006_06_25.1
- Pedraza, M. del C., Márquez, J., Gómez, J.** (2010). Estructura y composición de los ensamblajes estacionales de coleópteros (Insecta: Coleoptera) del bosque mesófilo de montaña en Tlanchinol, Hidalgo, México, recolectados con trampas de intercepción de vuelo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81, 437-456.
- Peralta, J. & Huamantíno, A.** (2014). Diversidad de la entomofauna acuática y su uso como indicadores biológicos en humedales de Villa, Lima, Perú. *Revista Peruana de Entomología*, 49(2), 109-120.
- R Core Team.** (2021). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rajmohana, K. & Trivedi, J.** (2019). Yellow pan traps as an additional gadget for collecting sandhopper amphipods. *Current Science*, 117(12), 1949-1950.
- Rossi, C., Galindo, I., Huamán, G., Cuadros, B., Ortega, Y., Quispitupac, E., Martínez, N.** (2018). Primer estudio de la riqueza de coleópteros en un bosque de *Polylepis tomentella* del distrito de Chaviña (Ayacucho, Perú). *Ecología Austral*, 28(1), 229-234.
- Sabu, T. K. & Shiju, R. T.** (2010). Efficacy of pitfall trapping, Winkler and Berlese extraction methods for measuring ground-dwelling arthropods in moist-deciduous forests in the Western Ghats. *Journal of Insect Science*, 10(98), 1-17. <https://doi.org/10.1673/031.010.9801>

- Salazar, N., Fernández, W., Iannacone, J., Morales, A., Espinoza, M.** (2006). Comparación de dos métodos de colecta para anophelinos (cebo humano y trampa de luz CDC), durante la época seca y lluviosa, Yurimaguas, Perú 2005. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, 23(2), 87-97.
- Sánchez, P., Alvaríño, L., Iannacone, J.** (2019). Diversidad de insectos terrestres en cuatro comunidades vegetales del Área de Conservación Regional (Acr) Humedales de Ventanilla, Callao, Perú. *The Biologist*, 17(1), 73-94.
- Santos, J. & Fernandes, G.** (2021). *Measuring arthropod biodiversity a handbook of sampling methods*. Springer Nature.
- Schauff, M. E.** (2001). Collecting and Preserving Insects and Mites: Techniques and Tools. En *Systematic Entomology Laboratory*. USDA. National Museum of History, Washington DC, 69 p.
- Shweta, M. & Rajmohana, K.** (2018). A comparison of sweep net, yellow pan trap and malaise trap for sampling parasitic Hymenoptera in a backyard habitat in Kerala. *Entomon*, 43(1), 33-44.
- Siewers, J., Schirmel, J., & Buchholz, S.** (2014). The efficiency of pitfall traps as a method of sampling epigeal arthropods in litter rich forest habitats. *European Journal of Entomology*, 111(1), 69-74. <https://doi.org/10.14411/eje.2014.008>
- Swengel, A. B.** (2001). A literature review of insect responses to fire, compared to other conservation managements of open habitat. *Biodiversity and Conservation*, 10, 1141-1169.
- Triplehorn, C. A. & Johnson, F.** (2005). *Borror and DeLong's Introduction to the study of the Insects* (7th ed). Brooks/Cole., Belmont CA, 864 p.
- Ugland, K. I., Gray, J. S., Ellingsen, K. E.** (2003). The species-accumulation curve and estimation of species richness. *Journal of Animal Ecology*, 72(5), 888-897.
- Ulrichs, C. & Hopper, K. R.** (2008). Predicting insect distributions from climate and habitat data. *BioControl*, 53(6), 881-894. <https://doi.org/10.1007/s10526-007-9143-8>
- Villaseca, P., Padilla, C., Ventura, G., Samalvides, F., Yañez, H., Chevarría, L., Ellis, B., Rotz, L., Leake, J., Beati, L.** (1999). Importancia de la *Lutzomyia peruensis* en la transmisión de la enfermedad de Carrión en el valle sagrado de los incas. Urubamba-Cusco, Perú. *Revista Medicina Experimental*, XV(1-2), 28-30.
- Westerberg, L., Berglund, H.-L., Jonason, D., Milberg, P.** (2021). Color pan traps often catch less when there are more flowers around. *Ecology and Evolution*, 00, 1-11. <https://doi.org/10.1002/ece3.7252>
- Wickham, H.** (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Zaller, J. G., Kerschbaumer, G., Rizzoli, R., Tiefenbacher, A., Gruber, E., Schedl, H.** (2015). Monitoring arthropods in protected grasslands: Comparing pitfall trapping, quadrat sampling and video monitoring. *Web Ecology*, 15, 15-23. <https://doi.org/10.5194/we-15-15-2015>
- Zhang, Z.-Q.** (2011). *Phylum Arthropoda von Siebold, 1848* In: Zhang, Z.-Q. (Ed.) *Animal biodiversity: An outline of higher-level classification and survey of taxonomic richness*. <http://hol.osu.edu/>

Original article

New records of the introduced gecko *Lepidodactylus lugubris* (Duméril & Bibron, 1836) (Squamata: Gekkonidae) in Colombia and update of its geographic range in the country

Nuevos registros del gecko introducido *Lepidodactylus lugubris* (Duméril & Bibron, 1836) (Squamata: Gekkonidae) en Colombia y actualización de su distribución geográfica en el país

✉ Cristian Andres Collazos-Astudillo¹, ✉ Alejandro Navarro-Morales^{1,2},
✉ Diego Huseth Ruiz-Valderrama^{1,2}, ✉ Juan P. Ramírez^{3,*}, ✉ José Rancés Caicedo-Portilla⁴

¹Semillero de Investigación en Herpetología - SEH, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia

²Grupo de Investigación de Fauna Silvestre – Centro de Investigación de la Biodiversidad Andino Amazónica – INBIANAM, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia

³Department of Biology, San Diego State University, San Diego, California, United States of America

⁴Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - SINCHI, Leticia, Amazonas, Colombia

Abstract

The mourning gecko (*Lepidodactylus lugubris*) is one of the most widely distributed lizard species in the world due to the frequent expansion of its range through accidental translocation by humans. The increased ability of *L. lugubris* to disperse by anthropic means is facilitated by its unisexual reproduction (parthenogenesis) and saltwater-resistant eggs. The species has been currently reported from several localities in western and central Colombia, extending over 12 of the 32 departments of the country. In this study, we summarize and update the distribution of *L. lugubris* in Colombia based on both published records and new localities supported by photographic evidence that we obtained or was previously deposited in the iNaturalist database. We also obtained additional records after the revision of several herpetological collections. Our new localities fill distribution gaps and extend the range of the species to the western slopes of the Cordillera Oriental and the northwestern limit of the country's Amazon region. The new records also represent the first for *L. lugubris* in five departments of Colombia. We discuss the possible dispersal routes and present anecdotal observations on its interaction with other introduced gecko species. Our work highlights the importance of platforms such as iNaturalist to pinpoint the distribution of introduced species, especially for lesser-known taxa and geographical regions.

Keywords: Geographic distribution; iNaturalist; Introduced species; Mourning gecko; Range extension.

Resumen

El gecko enlutado (*Lepidodactylus lugubris*) es una de las especies de lagartijas más ampliamente distribuidas en el mundo por la frecuente expansión de su área de distribución debida a su translocación accidental por parte del ser humano. La mayor capacidad de dispersión de *L. lugubris* por medios antrópicos se ve facilitada por su reproducción unisexual (partenogénesis) y sus huevos resistentes al agua salada. La especie ha sido registrada en varias localidades del occidente y centro de Colombia, extendiéndose a 12 de los 32 departamentos del país. En este estudio resumimos y actualizamos la distribución de *L. lugubris* en Colombia basándonos tanto en registros publicados como en las nuevas localidades determinadas a partir de evidencias fotográficas que obtuvimos o que fueron depositadas previamente en la base de datos de iNaturalist. Además, obtuvimos registros adicionales tras la revisión de varias colecciones herpetológicas. Nuestras nuevas localidades llenan

Citation: Collazos-Astudillo CA, Navarro-Morales A, Ruiz-Valderrama DH, *et al.* New records of the introduced gecko *Lepidodactylus lugubris* (Duméril & Bibron, 1836) (Squamata: Gekkonidae) in Colombia and update of its geographic range in the country. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):959-970, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1742>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Corresponding autor:**

Juan P. Ramírez;
jramirezramirez@sdsu.edu

Received: August 9, 2022

Accepted: November 15, 2022

Published on line: November 24, 2022



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

vacíos en la distribución de la especie y la amplían a las laderas occidentales de la cordillera Oriental y el límite noroeste de la región amazónica del país. Asimismo, los nuevos registros representan los primeros de *L. lugubris* en cinco departamentos de Colombia. Discutimos sus posibles rutas de dispersión y presentamos observaciones anecdóticas sobre su interacción con otras especies de geocos introducidos. Nuestro trabajo también pone de manifiesto la importancia de plataformas como iNaturalist para precisar la distribución de las especies introducidas, especialmente para taxones y regiones geográficas menos conocidas.

Palabras claves: Distribución geográfica; iNaturalist; Especies introducidas; Geco de luto; Ampliación de área de distribución.

Introduction

The introduction of different species in non-native places around the world has occurred mainly due to human intervention in search of populating new territories and maintaining trade routes. This has resulted in the existence of a diversity of synanthropic species that can generate negative impacts on invaded ecosystems (Correoso, 2005). Squamate reptiles have been one of the most frequently introduced groups to different regions of the world due to their morphological characteristics that allow resistance to extreme handling and transport conditions (Castaño-Mora, 2002; Arroyave, 2015). Such is the case for the family Gekkonidae, which is an almost cosmopolitan group, as some species are now distributed around the globe due to both natural and human-mediated interoceanic dispersal (Vences *et al.*, 2004; Detwiler & Criscione, 2014; Hoogmoed & Avila-Pires, 2015). The accidental introduction of species of geckos to different parts of the world has been facilitated by some morphological characteristics, such as small body sizes, high fecundity, rapid maturation, calcareous eggs resistant to saltwater, and high population densities (Brown & Duffy, 1992; Case *et al.*, 1994; Kolbe *et al.*, 2016; Somaweera *et al.*, 2020). These characteristics allow geckos to disperse and adapt easily to urban environments, sometimes including environments with a more reduced anthropic impact (Case *et al.*, 1994; Short & Petren, 2008; Zozaya *et al.*, 2015; Cyriac & Umesh, 2021).

Lepidodactylus (Fitzinger, 1843) is one of the genera of geckos with the widest distribution, which currently groups 41 species naturally distributed in southeastern Asia and some Pacific islands (Palacio *et al.*, 2012; Nania *et al.*, 2020; Uetz *et al.*, 2021). Within the genus, *Lepidodactylus lugubris* is the species with the most extensive geographic range, as it has been introduced around the world through human-mediated transoceanic transport (Vitt & Caldwell, 2009; Jiménez & Abarca, 2015; Hoogmoed & Avila-Pires, 2015). *Lepidodactylus lugubris*, commonly known as the mourning gecko, has an extensive capacity for colonization and adaptation in anthropic ecosystems favored by its parthenogenetic reproduction and thermal range of activity between 25 and 35°C (Palacio *et al.*, 2012). Additionally, the species has considerable genetic diversity exhibiting both diploid and triploid populations, each comprising several genetically distinct clones (Ineich, 1999; Yamashiro *et al.*, 2000). Most of these clones exhibit unique patterns of dorsal coloration that permit their identification in the field (Ota, 1994; Ineich, 1999; García *et al.*, 2006; Nania *et al.*, 2020). In general, both diploid and triploid populations coexist throughout their native and introduced ranges (Ineich, 1999; Yamashiro *et al.*, 2000). Most of the populations currently distributed in the Americas have a diploid genetic load (corresponding to clone A sensu Ineich (1999) (Daza *et al.*, 2012). However, triploids (corresponding to clone C) have been reported in Costa Rica and Ecuador. Furthermore, in Colombia, triploid clones C and E have recently been identified for the localities of San Cipriano (Valle del Cauca department) and Barranquilla (Atlántico department), respectively (Palacio-Sierra *et al.*, 2012; Hoogmoed & Ávila-Pires, 2015; Ineich, 2015).

In the Neotropics, *L. lugubris* has been introduced in México, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, Brazil, Suriname, Chile, Cuba, and Guadeloupe (French territory) (Krysko *et al.*, 2011; Daza *et al.*, 2012; Montes *et al.*, 2012; Hoogmoed & Avila-Pires, 2015; Bosch & Páez, 2017; Nania *et al.*, 2020; Urrea

et al., 2020; *Uetz et al.*, 2021). In Colombia, the species was recorded for the first time in 1941 in the southwestern Pacific lowlands (**Daza et al.**, 2012). Later, its distribution was extended to other parts of the Pacific and Caribbean lowlands (including the islands of San Andrés and Providencia) and Cordilleras Occidental and Central, with an isolated record in the Cordillera Oriental. The current distribution in Colombia comprises 12 departments: Antioquia, Atlántico, Bolívar, Boyacá, Cauca, Chocó, Córdoba, Nariño, Quindío, San Andrés y Providencia, Sucre, and Valle del Cauca (**Ayala**, 1986; **Castro-Herrera & Vargas-Salinas**, 2008; **Montes et al.**, 2012; **Daza et al.**, 2012; **Vanegas-Guerrero et al.**, 2016; **Mendoza et al.**, 2018).

Our current knowledge of the distribution of *L. lugubris* in Colombia is exclusively based on specimens deposited in biological collections and reported in the literature (**Daza et al.**, 2012; **Vanegas-Guerrero et al.**, 2016). Thus, it is possible that the current distribution is underestimated, and other sources of data could provide additional localities not yet reported in the literature. Among those alternate data sources, smartphone applications devoted to the documentation of biodiversity now represent an unprecedented amount of information about the distribution of taxa, including introduced species such as *L. lugubris*. For example, the application iNaturalist (**iNaturalist**, 2021) allows the photographic documentation of species, including amphibians and reptiles, by experts and non-experts while providing strategies to ensure data quality (**Jacobs**, 2016). Despite this, the potential use of these applications in documenting the geographic distribution of many taxa remains unexplored, and *L. lugubris* is no exception. In this context, our aim was to update and extend the distribution of *L. lugubris* in Colombia based on both previously unreported specimens deposited in herpetological collections and photographic reports compiled from the digital platform iNaturalist.

Materials and methods

To generate an updated map of the distribution of *L. lugubris* in Colombia, we compiled all records of this species available in the literature. Most of these previously published records were compiled and reported by **Daza et al.** (2012), with a few additional reports published since then (**Rubio-Rocha et al.**, 2012; **Mendoza et al.**, 2018). As the geographic coordinates of many of these records were not reported in the literature, we estimated them using Google Earth. To complement these published records, we also examined both previously reported and unreported specimens of *L. lugubris* deposited in the following Colombian herpetological collections: *Museo de Historia Natural C.J. Marinkelle* at *Universidad de Los Andes* (ANDES-R; Bogota), *Centro de Colecciones Científicas* at *Universidad del Magdalena* (CBUMAG; Santa Marta), the reptile collection of the *Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia* (ICN-R and JDL [John D. Lynch field number]; Bogotá), *Colección Zoológica de Referencia Científica del Instituto para la Investigación y la Preservación del Patrimonio Cultural y Natural del Valle del Cauca-INCIVA* (IMCN; Cali); *Colección de Reptiles, Museo de Historia Natural* at *Universidad de Caldas* (MHN-UCa-R; Manizales), *Colección de Reptiles, Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas-SINCHI* (SINCHI-R; Leticia), the herpetological collection at *Universidad Industrial de Santander* (UIS-R; Bucaramanga).

We also reviewed the records of the species available on the virtual database iNaturalist (**iNaturalist**, 2021) up to June 13, 2021, where we selected those with photographs allowing species-level identification and with a precise locality. After, we also filtered out localities at more than 5 km away in a straight line from the nearest report of the species (or 1 km for localities on San Andres and Providencia Islands). We followed this course of action to prevent selecting redundant observations in nearby localities. Further, we only selected observations labeled as “Research Grade”, which indicates that two-thirds of the identifiers agree on the same identification for a given observation (**Liebgold et al.**, 2019). Finally, we complemented all the above records with our own photographs of individuals and those taken by colleagues. These specimens came both from localities where the

species has been already reported and from those with no previous reports. For some of these specimens and additional, uncollected individuals from the same localities, we took anecdotal observations of their behavior and habitat use, which we discuss below. For all specimens, we noted the year they were found to determine the date of new records and verify if there are more recent records in the previously known range of *L. lugubris*, which would suggest that such populations have become established.

We identified the specimens deposited in the collections and photographic records based on the diagnostic characteristics including large digital pads, first digits without claw, and basal membranes on digits (Savage, 2002; Hoogmoed & Avila-Pires, 2015). Additionally, whenever possible, we compared the reported specimens with available descriptions of the various distinctive coloration patterns of the clones of the species. These clonal morphotypes differ from each other in the arrangement and shape of the dark markings on the dorsum that they exhibit (Ineich, 1988; Yamashiro *et al.*, 2000).

In general, *L. lugubris* differs from members of the genus *Hemidactylus* because it lacks the claw of the first digit of the hands, in addition to having calcium deposits on the neck that are not observed in the species of this genus (Savage, 2002). Compared to most *Hemidactylus* species reported so far for the Colombian territory (specifically from *H. angulatus*, *H. mabouia*, *H. frenatus*, and *H. palaichthus*), these present an arrangement of dorsolateral tubercles that can be round and flattened, conical and heterogeneous, or conical and trihedral interspersed between the dorsal scales (Avila-Pires, 1995; Cole *et al.*, 2013; Dueñas *et al.*, 2018; Gómez-Martínez *et al.*, 2020; Kluge, 1969; Rösler & Glaw, 2010; Vásquez-Restrepo & Lapwong, 2018) while the dorsum of *L. lugubris* lacks tubercles and is uniformly granular. On the other hand, *H. garnotii* differs from *L. lugubris* in that the second pair of genual scales of the former is not in contact with the infralabial scales (Morales *et al.*, 2017; Vásquez-Restrepo & Lapwong, 2018). As for the genera *Thecadactylus* and *Phyllodactylus* lizards, they also present claws on their five digits, unlike members of the genus *Lepidodactylus*. Additionally, both species of *Thecadactylus* (i.e., *T. rapicauda* and *T. solimoensis*) have extensive webbing on the hands and feet, which is not observed in *L. lugubris* (Bergmann & Russell, 2007), while *Phyllodactylus* differs in having a tuberculate dorsal texture (Ayala & Castro, 1985; Savage, 2002).

Results

Our compilation of historical and previously unreported localities of *L. lugubris* resulted in a total of 89 records, of which 32 were based on collected specimens previously reported in the literature, while 57 represent new records. Of the localities newly reported herein, ten correspond to previously unreported specimens in biological collections and 47 to photographic records, five of which were obtained by us and 42 from the iNaturalist platform, from which we had originally compiled a total of 306 records. However, we had to remove 255 records as they did not meet the cutoff of minimum distance to a previously published locality for the species we had established. Of the remaining 51 records, nine were removed because the lack of an exact locality or the quality of the photographs available prevented us from confirming if they were *L. lugubris*. In general, the new records we compiled allowed us to report for the first time the species for five departments of the country (Caquetá: specimens collected in 2015 and 2021; Cundinamarca: based on iNaturalist observations from 2020 and 2021; Meta: based on iNaturalist observations from 2020; Risaralda: based on iNaturalist observations from 2017, 2020, and 2021, and Santander: photograph taken in 2009 and several specimens found in collections since then) (Figure 1). The new records also indicate that *L. lugubris* is distributed in Colombia between 0 and 2000 m (Table 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1742/3307>).

Most records of *L. lugubris* in the country are concentrated in the Andean and Pacific regions, especially near cities and seaports such as Buenaventura, Barranquilla, Cartagena, and Santa Marta. These areas frequently receive elements coming from

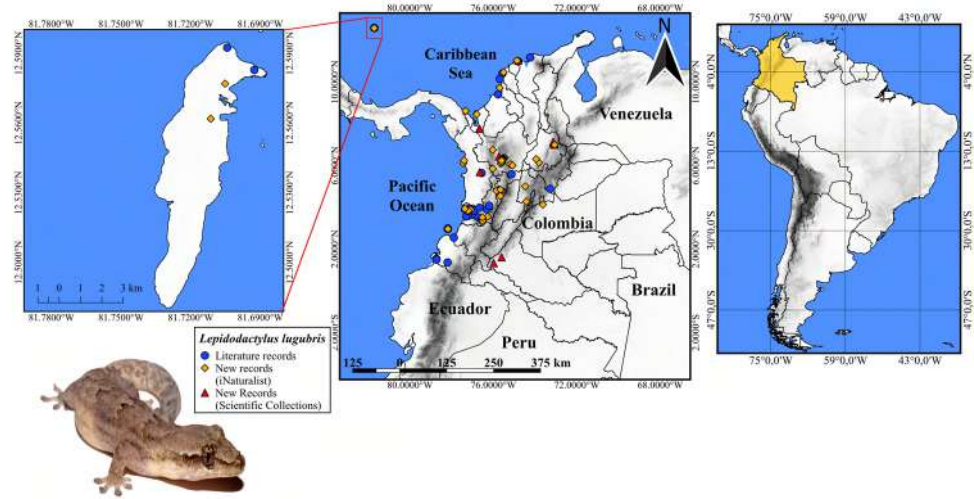


Figure 1. Records of *Lepidodactylus lugubris* in Colombia (blue circles: literature records; yellow circles: new records from iNaturalist; red triangles: new records from scientific collections). Photographs: A. Montes-Correa. The inset map at the left shows San Andrés Island in the Eastern Caribbean Sea.

different parts of the world, facilitating the colonization of *L. lugubris* in Colombia. Additional records of the species found far from Colombia's main seaports appear to be associated with major roads (such as those between the Atlantic Coast and Medellín, those connecting Tumaco or Buenaventura with Cali, and Medellín with Bogotá). This pattern suggests that the dispersal of *L. lugubris* within the country is potentially mediated by road transportation.

Interestingly, populations previously reported for the Pacific Region, the Caribbean coast of the country, and San Andrés Island appear to have subsisted for many years (since 1941, 1991, and 2012, respectively) (**Table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1742/3307>). Furthermore, most of the new records, except the new departmental records (**Figure 1**), fill gaps between the previous records of the species representing distribution extensions within the same city or between nearby municipalities. However, the new departmental records, except those from the department of Risaralda, represent significant distribution range extensions to the eastern part of the country (i.e., both the western and eastern slopes of the Cordillera Oriental). Also, the records from the southern Atlantic coast and the northern Pacific coast municipalities of Acandí, Necoclí, and Bahía Solano are almost 100 km from the nearest localities reported for the species; they are recent (first records for 2013, 2014, and 2018, respectively) (**Table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1742/3307>), they correspond to relatively understudied regions of the country.

All the specimens we revised from biological collections and photographs taken by us or obtained from the iNaturalist platform exhibit the dark markings on the dorsum considered characteristic of clone A of the species (**Figure 2**). Finally, anecdotal observations of the individuals we photographed and of others from the same localities suggest that *L. lugubris* tend to be more commonly found close to the sympatric introduced geckos *Hemidactylus frenatus*, *H. angulatus*, and/or *H. mabouia*. Sometimes, both were observed using the same light bulbs to forage and about 2 m from each other. However, it seems there are some slight differences in habitat use. Indeed, *L. lugubris* is less frequently found than *Hemidactylus* and seemingly in the shade and no higher than 1.5 m above the ground. In contrast, species of *Hemidactylus* (as adults) appear to be more commonly found in closer proximity to artificial light sources and at higher parts of walls (>2.5 m). Differences in habitat use seem to be maximized in the locality of Carepa (department of Antioquia),

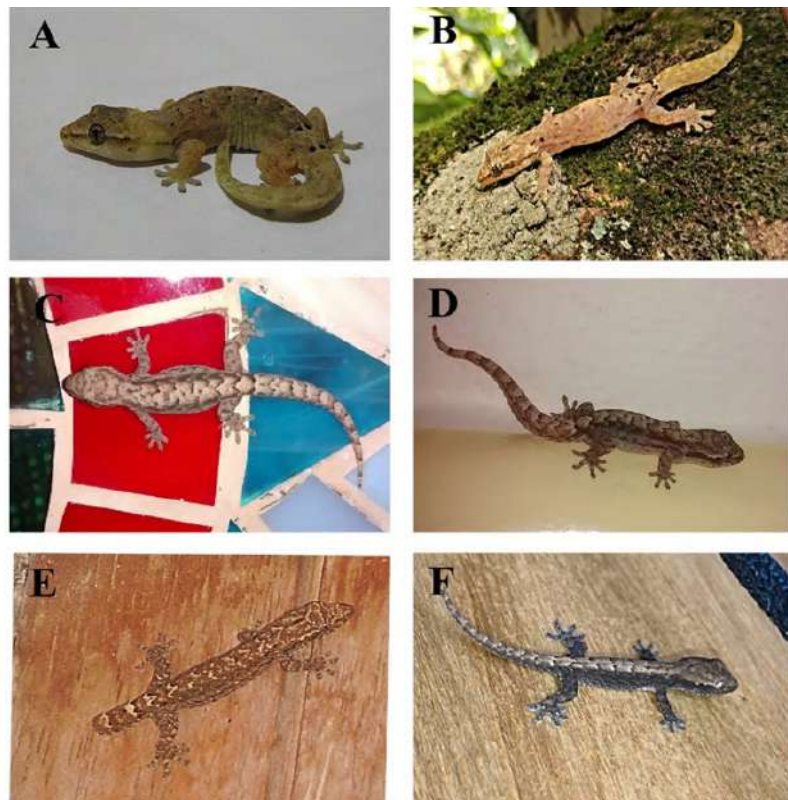


Figure 2. Variation in the color of the morphotype associated with the diploid clone A of *Lepidodactylus lugubris* in Colombia (A: Valle del Cauca - Cali; B: Caquetá - Florencia; C: Antioquia - San Jerónimo; D: Antioquia - San Jerónimo; E: Santander - Bucaramanga; F: Santander - Bucaramanga). Despite the variations, all specimens present the coloration pattern characterized by **Ineich** (1988) for the morphotype associated to clone A (=seven pairs of fine black dots on the dorsum located from the mid-dorsal region to the base of the tail). Photographic credits: A, Daniel Espitia; B, CC and ANM; C-E, JPR; F, Vladimir Quintero

with *L. lugubris* being more commonly found in the external walls of buildings, on nearby boards, and in decaying leaf litter. In contrast, *H. frenatus* was more commonly found on the inner walls of buildings.

Discussion

With the new distribution records for *L. lugubris* reported herein (**Table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1742/3307>, **figure 1**), the known distribution of the species in Colombia now comprises 17 of the 32 departments of the country. Our new records, along with other recently published range extensions (**Rubio-Rocha et al.**, 2012; **Palacio-Sierra et al.**, 2012; **Montes et al.**, 2012; **Mendoza et al.**, 2018), more than double the number of seven departments reported for the species in the latest summary of its distribution in the country (**Daza et al.**, 2012). Considering that this compilation was published ten years ago, the fact that the known distribution range of the species has grown so much in such a short time span could indicate a very rapid increase in the range extension of *L. lugubris* in Colombia. Alternately, the species could have inhabited at least some localities much earlier than when they were first reported. For example, although *L. lugubris* has been seen in Bucaramanga (department of Santander) since 2009, only here is the species reported for that city. Thus, it is possible that the apparent rapid range expansion of *L. lugubris* in Colombia is an artifact and that the species has inhabited at least some of the newly reported localities for much longer than expected.

Most of our new records concentrate on regions of the country where the species was already reported (the Caribbean, the Western and Central Andes, and the Pacific) (**Daza et al.**, 2012; **Hoogmoed & Avila-Pires**, 2015). Furthermore, our new records from the Gulf of Urabá (municipalities of Carepa and Necoclí) and northern Chocó (municipality of Bahía Solano) support the idea expressed by **Daza et al.** (2012) that the distribution of this species is likely to be continuous between the Pacific and the Caribbean coasts. However, the new localities we report also expand the range of species to the central portion of the western slopes of the Cordillera Oriental and the northwestern edge of the Amazonia and Orinoquia regions of Colombia. Among these new departmental range extensions, two are of particular interest as they correspond to localities found in the transition between the Andean and the Amazon and Orinoquia regions of the country (Caquetá and Meta departments, respectively), areas where the species has not been reported yet. Such findings are worrisome considering that the proximity to these regions would suggest that the species could likely start colonizing them soon if it has not done so already.

Based on these new records, *L. lugubris* now exhibits an altitudinal range from 0 to 2000 m in Colombia (**Table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1742/3307>) representing an extension of ca. 500 m from the highest published report for the species (Medellín, Department of Antioquia) (**Rubio-Rocha et al.**, 2013). In other South American countries where this species has been recorded, its altitudinal range reaches up to 900 m: between 7 and 729 m in Ecuador (**Torres-Carvajal**, 2020) and 875 m in Venezuela (**Señaris et al.**, 2017). The elevational limits of *L. lugubris* may be related to the apparent inability of the species to tolerate climatic conditions in areas above ~2000 m. In general, reptiles have difficulties developing ecophysiological processes such as thermoregulation in more temperate or colder environments (**Adolph & Porter**, 1993), thus limiting their ability to feed or reproduce and, thus, their survival (**Meiri et al.**, 2013). The original distribution of the species lies in tropical areas of Asia where the temperature rarely drops below 25°C (**Savage**, 2002; **Lever**, 2003). Ecophysiological studies, as well as additional sampling at altitudes above 2000 m, are needed to better understand the role of temperature and other environmental variables in determining the altitudinal range inhabited by this and other gekkonids in their introduced range and the effect of increasing temperatures and anthropogenic activities on determining the extent of its altitudinal distribution and geographic range in the future. In the future, we may also see situations like that observed for *H. frenatus*, which has maintained its population at 2600 m inside a brewery where the temperature is higher than the ambient temperature of nearby areas (**Caicedo-Portilla & Dulcey-Cala**, 2011).

Lepidodactylus lugubris has a high dispersal capacity, and it is known to have expanded its range to forested environments in parts of its distribution, for example, in Southeastern Asia (**Case et al.**, 1994; **McCoid**, 1996). However, the dependence on urban environments appears to vary between clones, with clone A having lower densities than other clones in forested areas, at least in Hawaii (**Short & Petren**, 2008). In support of this idea, the establishment of *L. lugubris* in South America (where clone A is prevalent) appears to have been limited by the existence of man-made structures (**Hoogmoed & Avila-Pires**, 2015). For example, there are no records from the locality of Macanal (department of Boyacá) since 1981, despite being relatively well-sampled, which is probably a result of the abandonment of human structures in the area (D. Gómez, pers. comm. 2021). Interestingly, Macanal seems to be the only historical locality from which the species seems to have become extinct. Finding this to be the case would suggest that the other populations from previously known sites are likely to have become established and do not correspond to spurious or accidental records as has been reported for other lizards (e.g., the recent finding of *Gymnophthalmus speciosus* at 2000 meters above its normal altitudinal range) (**Henao-Osorio et al.**, 2021). Further sampling is needed to confirm if this is the case and if the presence of human structures limits the distribution of *L. lugubris* on its introduced range or if it can disperse and get established in better-conserved regions.

Lepidodactylus and *Hemidactylus* species can be easily confused (Bosch & Paez, 2017; Bandeira & Missassi, 2022) because they share similar morphological and ethological characteristics, such as the presence of nocturnal habits, inhabiting areas modified by man, and employing foraging strategies associated with artificial light (Case *et al.*, 1994; Savage, 2002). Therefore, these similarities could explain the late reports of *L. lugubris* in some regions (Abarca, 2006). As mentioned above, despite *L. lugubris* inhabiting the city of Bucaramanga since at least 2009, the species has remained unreported there until the present study. Nevertheless, we are aware of specimens collected in this city and deposited in biological collections as early as 2015 that were confused with sympatric species of the genus *Hemidactylus*, which could be the case for other areas and museum collections.

Although our observations are anecdotal, *L. lugubris* seems to be commonly found in sympatry with the introduced gecko *H. frenatus*, a species with which they overlap in much of their distribution where they have been introduced (Rödder *et al.*, 2008). Indeed, it has been observed that both species apparently are involved in resource competition, with *H. frenatus* potentially being able to outcompete *L. lugubris* (Case *et al.*, 1994; Niewiarowski *et al.*, 2012). Further studies on the interspecific interactions between *L. lugubris* and other sympatric geckos in their introduced ranges are needed, as our observations indicate that, at least in Colombia, *H. frenatus* is often more abundant than its counterpart, and it exhibits different substrate use.

The results of our revision of collected specimens and photographic records taken from the iNaturalist platform allow us to conclude that the existence of the morphotype associated with clone A in the Colombian territory is predominant. There is only one record for each of two triploid morphotypes (=C and E) (Hoogmoed & Ávila-Pires, 2015). Such a result supports the idea proposed by Ineich (2015) that clone A reached the American continent before World War II, while the other clones have started to colonize much more recently. However, it is necessary to clarify that identifying specimens of *L. lugubris* at the clone level based on color morphotypes is not ideal, especially when based only on preserved specimens or online photographs (I. Ineich, pers. comm. 2021). Indeed, this should be done by first depositing specimens under complete darkness for an hour, then illuminating them, and their dorsal pattern quickly photographed with the black marks being the only ones retained (I. Ineich, pers. comm. 2021). We recommend future researchers use this protocol to ensure consistency in the methods used to determine clonal morphotypes less ambiguously. In any case, future genetic studies are needed to corroborate the clonal identification of the specimens of *L. lugubris* found in the Colombian territory and in other countries where the species is introduced and to learn more about the geographical origin of the populations and their possible routes of dispersal.

Most of the specimens and new reports of *L. lugubris* recorded for Colombia have been provided by the iNaturalist platform (Table 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1742/3307>). That is possible because, in our case, *L. lugubris* has a characteristic pattern of coloration on the dorsum and the absence of the claw on the first pedial digit sometimes can be observed facilitating, in most cases, its identification using good quality photographs. Thus, we highlight the importance of databases such as iNaturalist in providing more detailed and updated knowledge of the distributions of native and introduced species with the help of local communities (Wallace *et al.*, 2019). Although the ideal is to collect specimens and deposit them in registered biological collections, we also recommend, with Auguste & Fifi (2020), to upload observations on various platforms such as iNaturalist with high-quality photographs and precise locality data (with coordinates). Likewise, as suggested by Liebgold *et al.* (2019), observations made on iNaturalist or other citizen science platforms that appear to correspond to distribution extensions should be verified by trained herpetologists.

Supplementary material

View supplementary material in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1742/3307>

Acknowledgments

To Andrew J. Crawford (ANDES-R), Martha Lucía Calderón (ICN), Martha Patricia Ramírez (UIS), and Héctor Ramírez Chaves (MHN-UCa-R) for facilitating the revision and access to the collections and the records deposited in the collections they manage. To Ivan Ineich for helping us to identify the clonal morphotype to which the specimens reported in this publication belong. To project “The small world of *Lepidoblepharis miyatai*, ecotaxonomic relationships as conservation tools” for financing the field trips for the specimen collected in Florencia (Caquetá). Collection activities were supported by a collecting permit granted to the *Universidad de Magdalena* through resolution 1293 (2014) of the *Autoridad Nacional de Licencias Ambientales* (ANLA). We thank Daniel Espitia and Vladimir Quintero for authorizing us to use photographs of specimens from Cali and Bucaramanga, respectively, in this manuscript. To Camilo Montes-Correa for providing the photograph of *L. lugubris* shown in the distribution map. Martha Ramirez provided useful comments that improved the quality of the manuscript, and Elson Meneses corroborated the identification of the specimens deposited in the collection of the *Universidad Industrial de Santander* (UIS). Melissa Duarte and Nathaly Diaz provided information and/or photographs of some of the specimens reported in this study. Finally, we thank Diego Gómez-Sánchez for providing information on the status of the locality of Macanal (Boyacá) mentioned in the text and for sharing some bibliographical references.

Author contributions

Data collection: CC, ANM, JPR, JRCP; data analysis and interpretation: CC, ANM, JPR, JRCP; writing, reviewing, and editing: CC, ANM, DHRV, JPR, JRCP.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Abarca, J. (2006). Gecos caseros (*Hemidactylus*): biología e impacto en Costa Rica. *Revista Mensual sobre la Actualidad Ambiental*, 159, 2-6.
- Adolph, S.C., Porter, W.P. (1993). Temperature, activity, and lizard life histories. *The American Naturalist*, 142, 273-295.
- Aguste, R., Fifi, A. (2020). Additional record of the invasive mourning gecko *Lepidodactylus lugubris* (Duméril and Bibron, 1836) from Trinidad and Tobago, with comments on citizen science observations. *Herpetology Notes*, 13, 1111-1112.
- Arroyave, F. (2015). El tráfico ilegal de reptiles en Colombia: una aplicación del análisis de redes a las relaciones ambientales. Masters dissertation. Universidad Nacional de Colombia.
- Avila-Pires, T. (1995). Lizards of Brazilian Amazonia (Reptilia: Squamata). *Zoologische verhandelingen*, 209, 1-706.
- Ayala, S. (1986). Saurios de Colombia: Lista actualizada y distribución de ejemplares colombianos en los museos. *Caldasia*, 15, 555-575.
- Ayala, S., Castro, F. (1985). Lagartos de Colombia/ Lizards of Colombia. Cali, Colombia: Universidad del Valle and Tulane University International Center for Medical Research.
- Bergmann, P., Russell, A. (2006). Systematics and biogeography of the widespread Neotropical gekkonid genus *Thecadactylus* (Squamata), with the description of a new cryptic species. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 149, 339-370. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2007.00251.x>
- Bosch, R. A., Páez, R. B. (2017). First record from Cuba of the introduced mourning gecko, *Lepidodactylus lugubris* (Duméril and Bibron, 1836). *BioInvasions Records*, 6(3), 297-300. <https://doi.org/10.3391/bir.2017.6.3.16>
- Brown, S. G., Duffy, P.K. (1992). The effects of egg-laying site, temperature, and salt water on incubation time and hatching success in the gecko *Lepidodactylus lugubris*. *Journal of Herpetology*, 26(4), 510-513. <https://doi.org/10.2307/1565135>
- Case, T. J., Bolger, D. T., Petren, K. (1994). Invasions and Competitive Displacement among House Geckos in the Tropical Pacific. *Ecology*, 75(2), 464-477. <https://doi.org/10.2307/1939550>

- Castaño-Mora, O.** (2002). Libro rojo de reptiles de Colombia. Instituto Humboldt Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Castro-Herrera, F., Vargas-Salinas, F.** (2008). Anfibios y reptiles en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*, 9(2), 251-277.
- Caicedo-Portilla, R. & Dulcey-Cala, C.** (2011). Distribución del gecko introducido *Hemidactylus frenatus* (Duméril y Bribon 1836) (Squamata: Gekkonidae) en Colombia. *Biota Colombiana*, 12(2), 45-65.
- Cole, C., Townsend, C., Reynolds, R., MacCulloch, R., Lathrop, A.** (2013). Amphibians and reptiles of Guyana, South America: illustrated keys, annotated species accounts, and a biogeographic synopsis. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 125(4), 317-578. <https://doi.org/10.2988/0006-324X-125.4.317>
- Correosos, M. C.** (2005). La introducción de especies. Lineamientos generales: ¿Enriquecimiento de la biodiversidad o problemas ecológicos? *Revista Geoespacial*, 2, 64-75.
- Cyriac, V., Umesh, P.** (2021). Natural History of the Gecko *Hemidactylus prashadi*: Demography, Spatial Partitioning, Diet, and Reproduction in a Human-altered Habitat. *Herpetological Conservation and Biology*, 16(2), 325-336.
- Daza, J., Travers, S., Bauer, A.** (2012). New records of the mourning gecko *Lepidodactylus lugubris* (Duméril and Bibron, 1836) (Squamata: Gekkonidae) from Colombia. *Check List*, 8(1), 164-167. <https://doi.org/10.15560/8.1.164>
- Detwiler, J. T., Criscione, C. D.** (2014). Recently introduced invasive geckos quickly reach population genetic equilibrium dynamics. *Biological Invasions*, 16(12), 2653-2667. <https://doi.org/10.1007/s10530-014-0694-1>
- Dueñas, M., Valencia, J., Yáñez-Muñoz, M., Eguiguren, J.** (2018). Primer registro de la salamandrina asiática *Hemidactylus frenatus* Duméril & Bibron, 1834 (Sauria: Gekkonidae) en la Cordillera del Cóndor, Zamora Chinchipe, Ecuador. *Cuadernos de Herpetología*, 2(1), 75-77.
- García, U., Rengifo, J., Moreno, F., Jiménez, A.** (2006). Diversidad de lagartos (Squamata: Lacertilia) en el sotobosque de cuatro localidades asociadas a la cuenca del río Cabi, Chocó – Colombia. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó*, 25, 47-55.
- Gómez-Martínez, M., Gallego-Carmona, C., Castellanos, C.** (2020). Predation of the invasive gecko *Hemidactylus angulatus* Hallowell, 1854 (Squamata: Gekkonidae) by the wandering spider *Ancylometes bogotensis* Keyserling, 1877 (Araneae: Ctenidae) in Tolima, Colombia. *Boletín Científico Centro de Museo de Historia Natural Universidad de Caldas*, 24(2), 65-70. <https://doi.org/10.17151/bccm.2020.24.2.5>
- Henao-Osorio, J. J., Pereira-Ramírez, A. M., Cardona-Giraldo, A., Arias-Monsalve, H. F., Rojas-Morales, J. A., Caicedo-Portilla, J. R., Ramírez-Chaves, H. E.** (2021). On the distribution of three exotic geckos of genus *Hemidactylus* Gray, 1825 (Squamata, Gekkonidae), and an unusual record of the native lizard *Gymnophthalmus speciosus* (Hallowell, 1861) outside its elevational range in Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(175), 462-473. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1356>
- Hoogmoed, M., Ávila-Pires, T.** (2015). *Lepidodactylus lugubris* (Duméril & Bibron 1836) (Reptilia: Gekkonidae), an introduced lizard new for Brazil, with remarks on and correction of its distribution in the New World. *Zootaxa*, 4000(1), 90-110. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4000.1.4>
- iNaturalist** (2021). iNaturalist [online]. Date of access: June 2, 2021. Available from: <https://www.inaturalist.org>.
- Ineich, I.** (1988). Mise en évidence d'un complexe unisexué-bisexué chez le gecko *Lepidodactylus lugubris* (Sauria, Lacertilia) en Polynésie française. *Comptes Rendus Académie des Sciences Paris*, 307, 271-277.
- Ineich, I.** (1999). Spatio-temporal analysis of the unisexual-bisexual *Lepidodactylus lugubris* complex (Reptilia, Gekkonidae). Tropical Island Herpetofauna: Origin, Current Diversity, and Conservation. *Developments in Animal and Veterinary Sciences*, 29, 199-228.
- Jacobs, C.** (2016). Data quality in crowdsourcing for biodiversity research: issues and examples. In: European handbook of crowdsourced geographic information, pp 75-86. Capineri, C., Haklay, M., Huang, H., Antoniu, V., Kettunen, J., Ostermann, F., Purve, R., Eds, Ubiquity Press Ltd. London.
- Jiménez, R., Abarca, J.** (2015). Range and Extension of the Mourning Gecko (*Lepidodactylus lugubris*) in the Caribbean Versant of Costa Rica. *Herpetotropicos*, 10(1-2), 31-32.
- Kolbe, J., VanMiddlesworth, P., Battles, A., Stroud, J., Buffum, B., Forman, R., Losos, J.** (2016). Determinants of spread in an urban landscape by an introduced lizard. *Landscape Ecology*, 31, 1795-1813. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0362-1>

- Kluge, A.** (1969). The Evolution and Geographical Origin of the New World *Hemidactylus mabouia brookii* Complex (Gekkonidae, Sauria). Museum of Zoology, University of Michigan.
- Krysko, K., Burgess, J., Rochford, M., Gillette, C., Cueva, D., Enge, K., Somma, L., Stabile, J., Smith, D., Wasilewski, J., Kieckhefer III, G., Granatosky, M., Nielsen, S.** (2011). Verified non-indigenous amphibians and reptiles in Florida from 1863 through 2010: Outlining the invasion process and identifying invasion pathways and stages. *Zootaxa*, 3028(1), 1-64. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3028.1.1>
- Lever, C.** (2003). Naturalized reptiles and amphibians of the world. Oxford University Press on Demand. London.
- Liebgold, E. B., Liebgold, H. L., Ransom, M. J., Ransom, T. S.** (2019). The spread of the parthenogenetic mourning gecko, *Lepidodactylus lugubris* (Duméril and Bibron, 1836) to Paradise Island, The Bahamas, with comments on citizen science observations of non-native herpetofauna. *BioInvasions Records*. 8(1): 45-49. <https://doi.org/10.3391/bir.2019.8.1.05>
- McCom, M. J.** (1996). Putative interactions of geckos in the southern Mariana Islands. *Micronesica*, 28(2), 193-202.
- Mendoza, J., Gómez-Sánchez, D., Rodríguez, C.** (2018). *Lepidodactylus lugubris* (Asian Mourning Gecko). *Herpetological Review*, 49(2), 286-287.
- Montes, G., Díaz, J., Gaviria, J.** (2012). First Record of *Lepidodactylus lugubris* (Sauria: Gekkonidae) for the Department of Sucre, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 4(1), 163-167. <https://doi.org/10.3897/herpetozoa.33.e53625>
- Morales, R., Chang, M., Acevedo, M.** (2017). First records of *Hemidactylus garnotii* Duméril & Bibron 1836 (Squamata: Gekkonidae) in Guatemala. *Mesoamerican Herpetology*, 4(4), 953-955.
- Nania, D., Flecks, M., Rödder, D.** (2020). Continuous expansion of the geographic range linked to realized niche expansion in the invasive Mourning gecko *Lepidodactylus lugubris* (Duméril & Bibron, 1836). *Plos One*, 15(7), 1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235060>
- Niewiarowski, P. H., Stark, A., McClung, B., Chambers, B., Sullivan, T.** (2012). Faster but Not Stickier: Invasive House Geckos Can Out-Sprint Resident Mournful Geckos in Moorea, French Polynesia. *Journal of Herpetology*, 46(2), 194-197. <https://doi.org/10.1670/11-148>
- Ota, H.** (1994). Female reproductive cycles in the northernmost populations of the two gekkonid lizards, *Hemidactylus frenatus* and *Lepidodactylus lugubris*. *Ecological Research*, 9, 121-130.
- Palacio, J., Armenta-Gutiérrez, O., Castro-Herrera, F.** (2012). Ampliación del rango de distribución de la salamaneja *Lepidodactylus lugubris* (Duméril & Bibron, 1836) en Colombia. *Herpetotropicos*, 7(1-2), 5-6.
- Rödder, D., Solé, M., Böhme, W.** (2008). Predicting the potential distributions of two alien invasive House geckos (Gekkonidae: *Hemidactylus frenatus*, *Hemidactylus mabouia*). *North-Western Journal of Zoology*, 4(2), 236-246.
- Rösler, H. & Glaw, F.** (2010). Morphologische variation und taxonomie von *Hemidactylus brookii* Gray, 1845 und *Hemidactylus angulatus* Hallowell, 1854 sowie phänotypisch ähnlicher Taxa. *Spixiana*, 33(1), 139-160.
- Rubio-Rocha, L., Alzate, E., Jiménez, C.** (2012). *Lepidodactylus lugubris* (Mourning Gecko). *Herpetological Review*, 43(2), 306-306.
- Savage, J.** (2002). The Amphibians and Reptiles of Costa Rica: A Herpetofauna Between Two Continents, Between Two Seas. The University of Chicago Press.
- Señaris, C., Rojas-Runjaic, F. J. M., Aristeguieta, M. M., García-Señaris, G.** (2017). Second record of the invasive gecko *Lepidodactylus lugubris* (Duméril & Bibron, 1836) (Squamata: Gekkonidae) from Venezuela. *Check List*, 13 (2), 1-4. <https://doi.org/10.15560/13.2.2082>
- Short, K. H., Petren, K.** (2008). Boldness underlies foraging success of invasive *Lepidodactylus lugubris* geckos in the human landscape. *Animal Behaviour*, 76(2), 429-437. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2008.04.008>
- Somaweera, R., Yeoh, P. B., Jucker, T., Clarke, R. H., Webber, B. L.** (2020). Historical context, current status and management priorities for introduced Asian house geckos at Ashmore Reef, north-western Australia. *BioInvasions Records*, 9(2), 408-420. <https://doi.org/10.3391/bir.2020.9.2.27>
- Torres-Carvajal, O.** (2015). On the origin of South American populations of the common house gecko (Gekkonidae: *Hemidactylus frenatus*). *NeoBiota*, 27, 69-79. <https://doi.org/10.3897/neobiota.27.5437>
- Torres-Carvajal, O.** (2020). *Lepidodactylus lugubris* In: Torres-Carvajal, O., Pazmiño-Otamendi, G., Ayala-Varela, F. & Salazar-Valenzuela, D. (2021). Reptiles del Ecuador. Version 2021.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Date of access: April 19, 2021. Available from: <https://bioweb.bio/faunaweb/reptiliaweb/FichaEspecie/Lepidodactylus%20lugubris>.

- Uetz, P., Freed, P., Hošek, J.** (2021). The Reptile Database. Date of access: April 19, 2021. Available from: <http://www.reptile-database.org>.
- Urrea, F., Zúñiga, A., Miranda-Calle, A., Melero, N.** (2020). First record of the invasive gecko, *Lepidodactylus lugubris* Duméril & Bibron, 1836 in mainland Chile (Squamata, Gekkonidae). *Herpetozoa*, 33, 125-129. <https://doi.org/10.3897/herpetozoa.33.e53625>
- Vanegas-Guerrero, J., Fernández, C., Buitrago-González, W., Vargas-Salinas, F.** (2016). Urban remnant forests: Are they important for herpetofaunal conservation in the central Andes of Colombia? *Herpetological Review*, 47, 180-185.
- Vences, M., Wanke, S., Vieites, D., Branch, W., Glaw, F., Meyer, A.** (2004). Natural colonization or introduction? Phylogeographical relationships and morphological differentiation of house geckos (*Hemidactylus*) from Madagascar. *Biological Journal of the Linnean Society*, 83, 115-130.
- Vásquez-Restrepo, D., Lapwong, Y.** (2018). Confirming the presence of a fourth species of non-native house gecko of the genus *Hemidactylus* Oken, 1817 (Squamata, Gekkonidae) in Colombia. *Check List*, 14(4), 665-669. <https://doi.org/10.15560/14.4.665>
- Vitt, L., Caldwell, J.** (2009). *Herpetology: An introductory biology of amphibians and reptiles*. Third Edition. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Yamashiro, S., Toda, M., Ota, H.** (2000). Clonal Composition of the Parthenogenetic Gecko, *Lepidodactylus lugubris*, at the Northernmost Extremity of Its Range. *Zoological Science*, 17(7), 1013-1020. <https://doi.org/10.2108/zsj.17.1013>
- Wallace, R., Flores-Turdera, C., Garitano-Zavala, A., Gómez, I., Jurado, C., Maldonado, C., Molina, C., Salinas, E., Torrico, O.** (2019). Reto ciudad naturaleza y naturalista: una oportunidad fantástica para la implementación de la ciencia ciudadana. *Ecología en Bolivia*, 54(2), 67-72.
- Zozaya, S. M., Alford, R. A., Schwarzkopf, L.** (2015). Invasive house geckos are more willing to use artificial lights than are native geckos. *Austral ecology*, 40(8), 982-987. <https://doi.org/10.1111/aec.12287>

Artículo original

Reservas de carbono en un ecosistema del desierto suramericano: el caso de Lomas de Amancaes, Lima, Perú

Carbon storage on an ecosystem of the South American desert: The case of Lomas de Amancaes (Lima-Perú)

Victor H. Guerrero-Palomino^{1*}, Diego Malca-Rodríguez², Héctor Aponte¹

¹ Coastal Ecosystems of Peru Research Group, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

² Círculo de Investigación de Taxonomía, Florística y Ecología Vegetal, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

Resumen

La captura de carbono es un proceso fundamental que regula el clima y permite contrarrestar el calentamiento global. En este estudio se estimaron las reservas de carbono en Lomas de Amancaes, un ecosistema estacional propio del desierto suramericano en Lima, Perú. Se tomaron muestras de la biomasa vegetal aérea y del suelo (entre los 0 y 20 cm de profundidad), y se midió el carbono almacenado en ambos compartimentos. Los resultados indicaron que la cantidad de carbono almacenado era de 8.593,97 tC (39,29 tC/ha) y que era mayor en el suelo (37,85 tC/ha) que en la biomasa aérea (1,44 tC/ha); al comparar el carbono almacenado en los diferentes rangos altitudinales (300 - 750 m s.n.m.), no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$). Al compararlo con otros ecosistemas del desierto costero peruano, el de Lomas de Amancaes fue mayor a lo encontrado en tillandsiales (3,6 tC/ha), pero menor a lo reportado en algunos humedales (38,47-305,37 tC/ha). El carbono almacenado del área de estudio se asemeja a las reservas de varios ecosistemas desérticos del mundo (el valor oscila entre 0,15 y 45,55 tC/ha en desiertos de África, la zona de transición del Sahel, el desierto de Néguev, algunos desiertos de China, el Mojave, la cuenca de La Paz y Los Planes), con algunas excepciones como los desiertos templados de Asia Central, la sabana de acacias del Sahel y Túnez, en donde fluctúa entre 40,40 y 159,2 tC/ha. Nuestros resultados representan una de las primeras estimaciones de las reservas de carbono en las lomas del desierto del Pacífico suramericano y brindan datos valiosos para su conservación.

Palabras clave: Calentamiento global; Reserva de carbono; Ecosistemas desérticos; Lomas costeras; Biomasa vegetal.

Abstract

Carbon capture is a fundamental process in climate regulation that counteracts global warming. This study estimated the carbon stocks in Lomas de Amancaes, an ecosystem of the South American desert in Lima (Peru). Soil (0 - 20 cm deep) and aerial plant biomass samples were taken to measure the stored carbon in both compartments subsequently. The results indicated that the amount of stored carbon in this ecosystem was 8,593.97 tC (39,29 tC/ha) and it was higher in the soil (37.85 tC/ha) than in the aerial biomass (1.44 tC/ha); when comparing the storage in different altitudinal ranges (300 - 750 m.a.s.l), no significant differences were found ($p > 0.05$). Compared with other ecosystems on the Peruvian Coast it was higher than that found in the Tillandsia areas (3.6 tC/ha) but lower than many wetland plant communities (38.47 - 305.37 tC/ha). Stored carbon amounts in the study area were similar to the reserves found in several desert ecosystems in the world (with values ranging between 0.15 and 55.99 tC/ha in African deserts, the Sahel transition zone, the Negev Desert, Chinese deserts, the Mojave Desert, La Paz watershed and Los Planes basin) with exceptions such as the temperate deserts of Central Asia, the Acacia Savannah Woodlands and Tunisia (40.40 - 159.20 tC/ha). These results represent one of the first estimates of carbon stocks in the South American Pacific desert and provide valuable data for their conservation.

Keywords: Global warming; Carbon stock; Desert ecosystem; Fog oases (Lomas); Plant biomass.

Citación: Guerrero-Palomino VH, Malca-Rodríguez D, Aponte H. Reservas de carbono en un ecosistema del desierto suramericano: el caso de Lomas de Amancaes, Lima, Perú. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):971-984, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1760>

Editor: Gabriel Roldán

Correspondencia:

Victor H. Guerrero-Palomino;
vhguerrerop@gmail.com

Recibido: 11 de septiembre de 2022

Aceptado: 17 de noviembre de 2022

Publicado en línea: 30 de noviembre de 2022



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

Introducción

Las lomas costeras son ecosistemas que se extienden a lo largo de la costa oeste de Suramérica entre Perú y Chile sobre las estribaciones de la cordillera de los Andes entre los 100 y los 1.000 m s.n.m. (Dillon & Haas, 2003; Kalicki *et al.*, 2014; Llellish *et al.*, 2015; Manrique *et al.*, 2010; Rundel *et al.*, 1991). Estos ecosistemas se caracterizan por presentar dos estaciones: la estación húmeda, durante el invierno austral, y la estación seca, durante el verano austral, que se diferencian por la presencia de una densa capa de nubes durante la estación húmeda (Rundel *et al.*, 1991). La humedad resultante de esta capa de nubes permite el crecimiento de una vegetación principalmente herbácea (64-73 %) y, en menor porcentaje, de arbustos, árboles, cactus, líquenes, musgos y epífitas (Engel, 1973; Manrique *et al.*, 2014; Muñoz-Schick *et al.*, 2001; Rundel, 1978; Trinidad *et al.*, 2012), distribuida en una gradiente altitudinal que varía de acuerdo con la disponibilidad del agua y de las propiedades del suelo. A mayor disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo, mayor es el desarrollo de la vegetación, condición que se presenta por debajo de las cumbres (Dillon & Rundel, 1990; Muenchow *et al.*, 2013).

Las lomas proveen una gran variedad de servicios ecosistémicos para la mejora de la calidad ambiental de la ciudad, por lo que se consideran “los pulmones de la ciudad” (Abanto, 2022). Entre los servicios se destaca el suministro de recursos genéticos (banco de semillas), la polinización, la provisión de alimento, el aporte estético, la formación del suelo, un ambiente adecuado para actividades científicas, turísticas, educativas y espirituales, y la regulación del clima mediante la captura de carbono (Aponte, 2015; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2018), la cual consiste en la transferencia del CO₂ atmosférico hacia el suelo a través de las plantas. Este servicio trae consigo la mejora de la calidad del suelo, la función y los servicios del ecosistema, y el fortalecimiento de los ciclos biogeoquímicos, entre otros (Lal *et al.*, 2015), pero el acelerado proceso de urbanización y el crecimiento poblacional han traído consigo un alto consumo de energía y emisiones de CO₂, lo que repercute en las propiedades físicas, químicas y biológicas del ecosistema, específicamente, en el ciclo biogeoquímico del carbono (Ussiri & Lal, 2017; Wang *et al.*, 2018).

A lo largo de la historia las lomas han sido de importancia para diversas civilizaciones, de ahí su gran valor histórico y cultural (Nieuwland & Mamani, 2017). No obstante, en la década de los cincuenta, el crecimiento urbano de las ciudades costeras desembocó en la búsqueda de nuevas áreas de asentamiento, lo que llevó a la invasión de muchas lomas (Aguilar *et al.*, 2015; Maguiña, 2016; Orrego, 2011), con la consecuente reducción de su área, el aumento de la contaminación y el desarrollo de actividades de ganadería y agricultura (Vásquez, 2008). Como resultado, Lima presenta en la actualidad un mosaico de urbanizaciones y lomas inmersas en la ciudad, aunque las lomas de mayor extensión se hallan a las afueras de la ciudad (Llellish *et al.*, 2015).

Las lomas están bajo la jurisdicción de organismos gubernamentales nacionales y regionales cuyo papel en la protección, conservación y mantenimiento de tales ecosistemas no está diferenciado. Aunque se han conseguido importantes avances en la protección de las lomas costeras al clasificarlas como ecosistemas frágiles (Ley N° 27308 y Ley N° 28611), su vulnerabilidad frente la actividad antropogénica persiste, lo que ha llevado a la reducción de su extensión geográfica e, incluso, a su desaparición (Aponte, 2015; Orrego, 2011; Vega-Centeno, 2017). Es cierto que algunas lomas hoy se reconocen como áreas naturales protegidas, pero aún hay un sinnúmero de ellas (en Lima se han determinado al menos 20) que deben protegerse (Moat *et al.*, 2021).

La protección y conservación de estos ecosistemas debe ser parte del desarrollo de una política que incorpore el punto de vista de las partes interesadas: beneficiarios (aquellos que reciben servicios), neutrales (aquellos que no reciben servicios) y perdedores (aquellos que ven una disminución en el suministro de servicios). Este enfoque facilita un análisis de necesidades a la hora de adoptar decisiones estratégicas en los organismos gubernamentales y privados (de Araujo Barbosa *et al.*, 2015; Guerry *et al.*, 2015). No

obstante, muchas de las decisiones sobre la gestión y los recursos para dichos ecosistemas dependen de la percepción de cada persona y se ven influenciadas por contextos sociales y culturales (Pascual *et al.*, 2017). Entre las medidas planteadas se han contemplado los mecanismos de mercado (Bryan *et al.*, 2014) como medio para expresar el valor de un servicio en unidades y conceptos entendibles para todos, lo que permite comparar y estimar la compensación en valores monetarios a partir de la afectación (Kubiszewski *et al.*, 2017), y resulta muy útil para el desarrollo sostenible (Pandeya *et al.*, 2016).

En el presente estudio se buscó estimar y valorar las reservas de carbono en Lomas de Amancaes, sitio icónico donde se celebra la fiesta del florecimiento de la amancaes (*Ismene amancaes*), la flor insignia de Lima (Nieuwland & Mamani, 2017). Se aspira a contribuir, así, al conocimiento de las reservas de carbono en este ecosistema, en lo que sería una de las primeras estimaciones de reserva de carbono en las lomas del desierto costero suramericano. Además, ello facilitará a los responsables de las decisiones una herramienta que sustente la protección de estos ecosistemas costeros.

Metodología y materiales

Metodología

El área de estudio comprendió las Lomas de Amancaes en Lima, las cuales se extienden a lo largo de los distritos de Independencia, Rímac y San Juan de Lurigancho (Figura 1) entre los 220 y los 750 m s.n.m. (Resolución Ministerial N° 0404, 2013), y se caracterizan por sus pendientes pronunciadas, de 55 a 85 %, conformadas por un sustrato rocoso tanto en las laderas como en las quebradas (Cuya & Sánchez, 1991). Durante la temporada húmeda, se observa una vasta vegetación herbácea y arbustiva y una modesta presencia de especies arbóreas, con un total de 51 especies vasculares registradas (Trinidad *et al.*, 2012). El muestreo se hizo entre diciembre del 2020 y enero del 2021 después del periodo frío de La Niña (agosto de 2020 – noviembre de 2020). En la figura 2 se resumen las principales condiciones meteorológicas del área de estudio en los meses previos al muestreo.

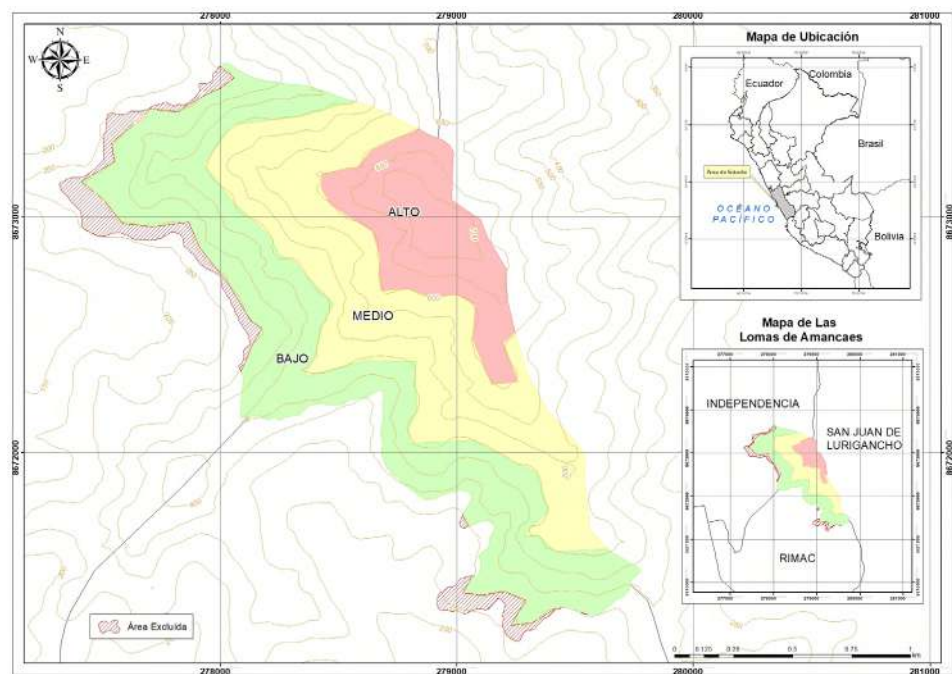


Figura 1. Área de estudio. Se muestran los tres niveles bajo (verde), medio (amarillo) y alto (rojo) acompañados del mapa del Perú (arriba derecha) y el mapa distrital (abajo derecha)

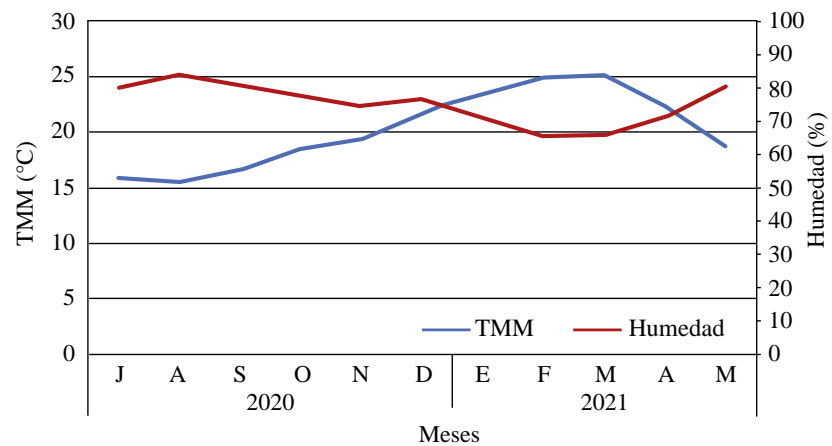


Figura 2. Diagrama ombrotérmico de julio del 2020 a mayo del 2021. Punto de muestreo: 278 514 E; 8 672 020 N (UTM WGS 84)

Se evaluó el piso altitudinal comprendido entre los 300 y los 750 m s.n.m. porque el área entre los 220 y los 300 m s.n.m. se encuentra muy urbanizada y presenta invasión de asentamientos humanos (6 de agosto, Los Eucaliptos, Las Brisas, Jardines ampliación, Horacio Zevallos 1 y 2), lo cual interferiría en el análisis de los resultados. Con fines comparativos, la loma se dividió en tres niveles que representan las diferentes densidades vegetales y comunidades de plantas (Aponte *et al.*, 2005): bajo (300 - 450 m s.n.m.), medio (450 - 600 m s.n.m.) y alto (>600 m s.n.m.).

Análisis de la biomasa vegetal y del suelo

Los puntos de la evaluación se determinaron teniendo en cuenta su accesibilidad, extensión, presencia de estructuras rocosas, y la complementariedad de las especies vegetales por cada nivel. Durante la época húmeda se determinaron las secciones que cumplían con estas características y se ubicaron aleatoriamente de forma estratificada (mediante un punto aleatorio en un espacio de 10 m x 10 m) en transectos de 10 m lineales dentro de los cuales se distribuyeron aleatoriamente cuatro parcelas de 1 m² en las que se caracterizó la vegetación y se tomaron las muestras de vegetación y suelo. Las especies predominantes en el nivel bajo fueron *Fuertesimalva peruviana* y *Sicyos baderoa*; en el nivel medio, *Fuertesimalva peruviana*, y en el nivel alto, *Nasa urens* y *Fuertesimalva peruviana* (las coordenadas y el detalle de cada parcela se pueden consultar en el **material suplementario 1**, <https://www.raccefy.n.co/index.php/raccefy.n/article/view/1760/3317>).

La toma de las muestras de biomasa vegetal aérea y de suelo se hizo entre diciembre del 2020 y enero del 2021 en época seca, por lo que el área presentaba únicamente vegetación muerta o necromasa. En cada parcela se hizo una cosecha destructiva de toda la biomasa aérea, que luego se pesó en una balanza manual. En cuanto al suelo, se establecieron dos rangos de profundidad: 0 - 10 cm y 10 - 20 cm, y en cada uno se recolectaron muestras de las esquinas de la parcela utilizando un cilindro metálico de 205 ml, metodología empleada en estudios previos de ecosistemas herbáceos en donde el número de parcelas permitió muestras representativas de las comunidades (Ampuero & Aponte, 2020; Aponte *et al.*, 2021; Corvacho, 2020).

Análisis de laboratorio y cálculos del stock de carbono

La densidad aparente y la humedad de la biomasa vegetal se determinaron en el laboratorio de microbiología y ecología forense de la Policía Nacional del Perú; la cuantificación de carbono en las muestras de suelo y biomasa se hizo en el laboratorio de análisis de suelos y plantas de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Los procedimientos que se siguieron se describen a continuación.

Determinación de la densidad aparente. Se determinó la densidad aparente (ρ_a) mediante el método del cilindro (**Blake & Hartge**, 1986). La muestra de suelo se recolectó con un cilindro metálico de 31,4 ml de volumen (V). Luego se secó a 105 °C hasta llegar al peso constante (P_{ss}) (Ec. 1).

$$\rho_a(\text{g/cm}^3) = P_{ss}/V \dots (1)$$

La ρ_a se multiplicó por la profundidad (10 cm) para la determinación de la cantidad de suelo por parcela (S).

Determinación del porcentaje de humedad en la biomasa aérea. Se determinó el porcentaje de biomasa seca (%BS) empleando el método gravimétrico, que consiste en la obtención del peso seco hasta alcanzar un peso constante (Ec. 2).

$$\% BS = 1 - P_0 - P_s/P_0 \times 100\% \dots (2),$$

donde P_s es el peso de la biomasa seca una vez alcanzado un peso constante y P_0 es el peso inicial de la biomasa.

Determinación del porcentaje de carbono en las muestras. Para la determinación de carbono se siguió el método de **Walkley & Black** (1934), utilizado previamente en otros ecosistemas herbáceos de la costa de Lima (**Ampuero & Aponte**, 2020; **Arévalo & Aponte**, 2020), lo que facilita su comparación. La técnica consiste en la oxidación húmeda de la muestra con dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en un medio ácido, lo que permite la oxidación parcial del carbono y su posterior titulación con sulfato ferroso amónico ($(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) para obtener el porcentaje de carbono (%C) en la muestra de la cual se obtiene la fracción de carbono (FC; Ec. 3). Se analizaron tres muestras por parcela: a) biomasa aérea; b) suelo de 0-10 cm y c) suelo de 10-20 cm.

$$FC = \%C/100 \dots (3).$$

Al determinar el carbono por medio del método de Walkley y Black se obtiene carbono fácilmente oxidable (CFO), al cual debe aplicársele un factor de corrección de 1,32 (**Eyherabide et al.**, 2014) para obtener carbono orgánico total (COT).

Cálculo del stock de carbono en el suelo y la biomasa aérea. El carbono en suelo por parcela (CSP) se obtuvo mediante el producto de la S y su FC respectivo (Ec. 4). El carbono en biomasa aérea por parcela (CBP) se obtuvo multiplicándola por su respectiva BS y su correspondiente FC (Ec. 5).

$$CSP = S * (FC * 1,32) \dots (4)$$

$$CBP = BA * BS * (FC * 1,32) \dots (5)$$

Para cada nivel se verificó que la muestra fuera representativa utilizando una curva de rendimiento (**Carpenter et al.**, 1999). Se consideró que la muestra era representativa toda vez que la cantidad de carbono alcanzara una meseta cuya variación fuera menor a 2 tC/ha.

Stock de carbono total del ecosistema y valoración

El carbono total de cada parcela (CTP) se obtuvo sumando el CSP y el CBP. Se promediaron todos los valores de CTP por nivel y, con base en el área de cada nivel, se calculó el stock de carbono. La suma de este stock por nivel representó el total del carbono almacenado en la loma.

El valor económico de la reserva de carbono se determinó con el método de precios en el mercado, utilizando para ello los valores provistos por **Mogas & Micaló** (2005): 10 a 188 USD/tC.

Análisis estadísticos

Para cada nivel (bajo, medio y alto) y compartimento (biomasa aérea, suelo 0-10 cm y suelo 10-20 cm), se calculó el promedio y la desviación estándar. Se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro Wilk y la de Levene para verificar la homocedasticidad de varianzas. En los casos que no seguían una distribución normal, o no cumplían con el criterio de homocedasticidad ($p > 0,05$), se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, con

el fin de comparar el carbono almacenado por compartimentos y niveles. Asimismo, se calculó el carbono almacenado en el suelo (0-20 cm, obtenido de la suma de las dos profundidades evaluadas) y se comparó según el nivel con el almacenado en la biomasa aérea. Todos estos análisis se hicieron en el programa Past 4,05 (**Hammer *et al.*, 2001**).

Resultados

Comparación de carbono por compartimentos y niveles

En la **figura 3** se muestra el almacenamiento de carbono en los compartimentos y niveles evaluados y se detallan los resultados por compartimento y en el total del área de estudio. Las curvas de rendimiento evidenciaron que la estimación fue representativa (**material suplementario 2**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1760/3317>).

En la **tabla 1** se observa la cantidad de carbono en el compartimento de suelo en los niveles evaluados. Al comparar el almacenamiento de carbono entre niveles no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) (**Figura 3**). No obstante, al comparar el almacenamiento de carbono según la profundidad, se encontró que el almacenamiento de carbono en los primeros 10 cm de suelo era significativamente mayor al encontrado en el rango de 10 - 20 cm ($p > 0,05$).

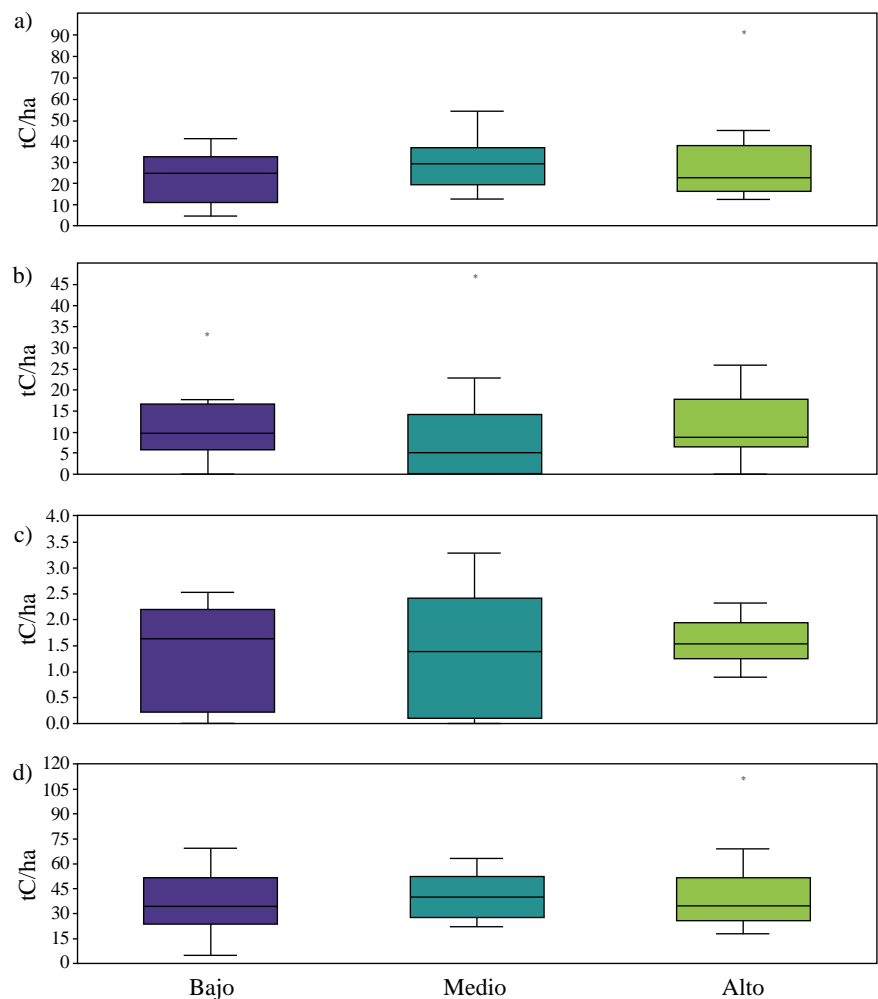


Figura 3. Almacenamiento de carbono (tC/ha) por nivel (bajo, medio y alto) **a)** de 0-10 cm de profundidad; **b)** de 10-20 cm de profundidad; **c)** en la biomasa aérea, y **d)** sumando todos los compartimentos evaluados. Los círculos representan los valores atípicos.

En la **tabla 2** se muestra la cantidad de carbono en el compartimento de biomasa aérea en cada uno de los niveles evaluados. Los valores de almacenamiento de carbono se encontraron entre 1,37 (nivel bajo) y 1,56 tC/ha (nivel alto), pero al compararlos no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) (**Figura 3c**).

Los valores de carbono total en el suelo (0 - 20 cm) oscilaron entre 34,61 (nivel bajo) y 40,65 tC/ha (nivel alto), pero no se encontraron diferencias significativas ellos ($p > 0,05$), en tanto que al comparar el carbono almacenado en ambos compartimentos (suelo y biomasa aérea), se encontró que el compartimento de suelo almacenaba una cantidad significativamente mayor que la del compartimento de biomasa aérea ($p < 0,05$).

Carbono total por nivel en la loma y su valoración

En la **tabla 3** se presentan los valores de carbono total por nivel. El nivel bajo tuvo una mayor reserva de carbono, con 3.586,49 tC, seguido del nivel medio, con 3.402,23 tC y, por último, el nivel alto, con 1.605,25 tC (**Figura 3d**). El *stock* de carbono total para el ecosistema de las Lomas de Amancaes, el cual ascendió a 8.593,97 tC, representaría entre USD 85.939,7 y 1.615.666,4.

Tabla 1. Carbono almacenado en el suelo por nivel y profundidad. Para las variables de densidad aparente y porcentaje de carbono (%C) se muestra el promedio \pm desviación estándar (mínimo - máximo).

Nivel	Profundidad	Densidad aparente (g/cm ³)	% C	gC/m ²	tC/ha
Bajo	0-10 cm	1,6 \pm 0,19 (1,31 - 1,97)	1,14 \pm 0,64 (0,2 - 2,19)	2 293,14	22,93
	10-20 cm	1,48 \pm 0,70 (0 - 1,9)	0,51 \pm 0,43 (0 - 1,6)	1 168,05	11,68
Medio	0-10 cm	1,52 \pm 0,21 (1,21 - 1,9)	1,48 \pm 0,56 (0,59 - 2,76)	2 951,39	29,51
	10-20 cm	1,15 \pm 0,93 (0 - 1,98)	0,37 \pm 0,56 (0 - 2,12)	877,51	8,78
Alto	0-10 cm	1,29 \pm 0,13 (1,11 - 1,48)	1,82 \pm 1,27 (0,66 - 5,85)	3 028,21	30,28
	10-20 cm	1,36 \pm 0,70 (0 - 1,88)	0,49 \pm 0,40 (0 - 1,37)	1 036,38	10,36

Tabla 2. Carbono almacenado en la biomasa aérea por nivel en Lomas de Amancaes. Para la variable de porcentaje de carbono (% C) se muestra el promedio \pm desviación estándar (mínimo - máximo).

Niveles	% Biomasa seca	Biomasa seca (g/m ²)	%C	gC/m ²	tC/Ha
Bajo	0,71	292,32	26,66 \pm 16,73 (0 - 43,88)	137,49	1,37
Medio	0,70	304,07	25,28 \pm 18,82 (0-49,91)	139,94	1,40
Alto	0,93	467,34	26,07 \pm 5,60 (18,55-36,40)	155,79	1,56

Tabla 3. Reservas de carbono por nivel en Lomas de Amancaes

Nivel	Carbono suelo (tC/ha)	Carbono vegetal (tC/ha)	Carbono total (tC/ha)	Área (ha)	Stock de carbono (tC)
Bajo	34,61	1,37	35,98	99,68	3.586,49
Medio	38,29	1,40	39,69	85,72	3.402,23
Alto	40,65	1,56	42,21	38,03	1.605,25
Total					8.593,97

Discusión

La costa peruana es una región árida que constituye un importante corredor biológico conformado por las lomas costeras, los tillandsiales y los humedales (**Aponte, 2015; Pérez et al., 2022**). Hay abundante bibliografía sobre la composición vegetal, las características y la

distribución de las lomas (**Dillon & Haas, 2003; Dillon & Rundel, 1990; Manrique *et al.*, 2014; Muenchow *et al.*, 2013; Rolando *et al.*, 2017**), pero se cuenta con pocos datos sobre sus reservas de carbono. Algunos avances se han obtenido para los tillandsiales (ecosistema desértico no estacional compuesto por plantas del género *Tillandsia*), donde se ha estimado un almacenamiento entre 2,75 y 25,15 tC/ha; se resalta su importancia también como reserva de agua (**Arévalo & Aponte, 2020; Chino, 2019; Toledo, 2020**). En otros estudios se ha abordado el almacenamiento de carbono en comunidades vegetales de los humedales costeros de esta región desértica y se han encontrado valores entre 28,50 y 305,37 tC/ha (**Ampuero & Aponte, 2020; Palomino & Cabrera, 2007; Pérez *et al.*, 2015**).

Es importante mencionar que la estimación de carbono corresponde a las especies vegetales predominantes (*F. peruviana*, *N. urens* y *S. baderoa*) en los niveles evaluados, estimación que puede variar según las especies predominantes de cada loma costera (**Tovar *et al.*, 2018; Trinidad *et al.*, 2012**). En el estudio se recogen los primeros datos sobre la reserva de carbono de las lomas costeras. Se encontraron valores mayores a los de los tillandsiales, pero menores a los de los humedales. Si se compara el valor del almacenamiento de carbono obtenido con otros valores conocidos de ecosistemas desérticos en el mundo (**Tabla 4**), estos se asemejan a los niveles de captación de carbono en ecosistemas desérticos

Tabla 4. Almacenamiento de carbono en ecosistemas desérticos

Lugar	Almacenamiento de carbono (tC/ha)			Referencia
	Biomasa	Suelo	Carbono total	
Desiertos templados de Asia Central (China, Kazakhsan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan, y Uzbekistan)	4,0-8,7	103,9-118,9	107,9-127,6	Li <i>et al.</i> (2015)
Túnez (África)	-	64,86 (40,40-159,20)	64,86 (40,40-159,20)	Brahim <i>et al.</i> (2010)
Sabana de acacias (Sudán)	1,46	54,53	55,99	Alam <i>et al.</i> (2013)
Cuenca La Paz y Los Planes, Península de Baja California, (México)	-	0,15-45,55	0,15-45,55	Ayala-Niño <i>et al.</i> (2020)
Estación experimental Las Cardas (Coquimbo, Chile)	3,7	32,5	36,5	Perez-Quezada <i>et al.</i> (2011)
Desierto de Negev (Sde Boker, Israel)	-	0-30,3 (3,10)	0-30,3 (3,10)	Hoffmann <i>et al.</i> (2012)
Desiertos en África	-	25	25	Henry <i>et al.</i> (2009)
Zona de transición del Sahel (Senegal)	2,58	18,06	20,65	Woomer <i>et al.</i> (2004)
Desiertos en China (Norte de China)	-	23,20	23,20	Feng <i>et al.</i> (2002)
Desierto de Mojave (California, Estados Unidos)	2,24	8,07	10,30	Evans <i>et al.</i> (2014)
Tillandsial "Lomas Arrojadero" (Tacna, Perú)	25,15	-	25,15	Toledo (2020)
Tillandsial "Intiorko" (Tacna, Perú)	2,75	-	2,75	Chino (2019)
Tillandsial "Piedra Campana" (Lima, Perú)	0,59	3,05	3,64	Arévalo & Aponte (2020)
Lomas de Amancaes (Lima, Perú)	1,44	37,85	39,29	Presente estudio

de África (25 tC), la zona de transición del Sahel (20,65 tC), el desierto de Néguev (0 – 30,30 tC), algunos desiertos de China (23,20 tC), el desierto de Mojave (10,30 tC), la cuenca de La Paz y Los Planes (0,15 – 45,55) y la Estación Experimental Las Cardas (36,5 tC/ha) (Ayala-Niño *et al.*, 2020; Evans *et al.*, 2014; Feng *et al.*, 2002; Henry *et al.*, 2009; Hoffmann *et al.*, 2012; Woomeer *et al.*, 2004), pero menores a los encontrados en la sabana de acacias, Túnez y los desiertos templados de Asia central (Alam *et al.*, 2013; Brahim *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2015). La captación de carbono de los ecosistemas desérticos depende de la disponibilidad de agua, ya que este recurso limita la productividad vegetal afectando las reservas de carbono en el suelo (Laban *et al.*, 2018; Lal, 2019).

Entre otras variables a considerar se encuentran el tipo de vegetación (Li *et al.*, 2015), los tipos de suelo (Díaz-Hernández *et al.*, 2003) y las características propias del área de estudio (Feng *et al.*, 2002). El estudio de todas ellas en el cálculo de las reservas de carbono es importante para comprender mejor las variaciones espacio-temporales que puedan tener las reservas de carbono de estos ecosistemas desérticos en relación con sus componentes bióticos y abióticos.

Debido a que las lomas dependen principalmente de la humedad proveniente de la neblina, son altamente sensibles a eventos extremos como “El Niño” (*El Niño Southern Oscillation*, ENSO) (Manrique *et al.*, 2010; Muñoz-Schick *et al.*, 2001). Estos cambios repercuten en la duración de la temporada de lluvias, la germinación de especies vegetales, la migración de especies y el flujo génico (Dillon *et al.*, 2011; Eichler & Londoño, 2013; Manrique *et al.*, 2010; Tovar *et al.*, 2018). Entre las muchas consecuencias posibles del cambio climático está el aumento en la frecuencia e intensidad del fenómeno ENSO (Cai *et al.*, 2015), lo que repercutiría en los patrones climáticos influyendo directamente en la formación y el desarrollo del ecosistema de lomas y afectando el ciclo de carbono y sus reservas. Por lo general, en los periodos ENSO hay una prolongación de la época de lomas (Dillon & Rundel, 1990; Tovar *et al.*, 2018), por lo que se esperaría un aumento de las reservas en estos años y una disminución durante los periodos fríos (fase de La Niña). Se necesitan más estudios para conocer la relación de las reservas de carbono durante eventos como el ENSO en los periodos climáticos complementarios, así como estudios sedimentológicos para determinar si existen correlaciones.

Desde finales de los años 90, el Pacífico Sur-Este se encuentra bajo una interfaz de enfriamiento de la costa y calentamiento continental (Falvey & Garreaud, 2009). El enfriamiento responde a la intensificación de la fase negativa de la Oscilación Decenal del Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation*, PDO), la cual ha traído consigo la disminución de la temperatura superficial del océano y del aire, así como la intensificación del anticiclón del Pacífico, disminuyendo la frecuencia de las lluvias y la nubosidad, aumentando la aridez y reduciendo la altitud de la capa de inversión térmica (100 m/década) (del Río *et al.*, 2018; Schulz *et al.*, 2011, 2012). Estos efectos han ocasionado la reducción de la cobertura vegetal y la pérdida de algunas especies perennes (Koch *et al.*, 2020; Schulz *et al.*, 2011). La intensificación de la fase negativa del PDO se atribuye al calentamiento global, y se estima que sus efectos se intensificarán a lo largo del siglo XXI. Si la tendencia de enfriamiento continuase, se esperaría una reducción de la vegetación de las lomas (del Río, 2019; Koch *et al.*, 2020; Schulz *et al.*, 2011), lo que afectaría la alta diversidad de especies y los servicios ecosistémicos, particularmente la captura y almacenamiento de carbono, y resultaría en la reducción del stock de carbono de las lomas.

Las Lomas de Amancaes tienen un *stock* de carbono de 8.593,97 tC, lo que representa económicamente entre USD 85.939,7 y 1.615.666,4, una suma nada despreciable para un área de 223,43 ha (mapa de base del 2013). Estos resultados manifiestan el importante papel de estos ecosistemas desérticos como sumidero de carbono en el marco del cambio climático. El valor económico del stock de carbono es netamente referencial, ya que en la actualidad estos ecosistemas y sus especies no tienen un valor oficial en el mercado de carbono, como si lo tienen diversos proyectos forestales (Clemente-Arenas, 2022). No obstante, nuestros resultados ayudan a entender y estimar las repercusiones, el impacto e, incluso, la posible compensación frente a la actividad antropogénica.

El crecimiento desordenado de las ciudades y el cambio climático amenazan la conservación de los ecosistemas de lomas. La información sobre el *stock* de carbono en el suelo que aquí se registra permitirá desarrollar mejores estrategias y justificaciones para la protección, conservación y manejo de este ecosistema. Los resultados del presente estudio constituyen unas de las primeras estimaciones del almacenamiento de carbono en el ecosistema de lomas y contribuye a comprender su papel como regulador del clima. Así, Lomas de Amancaes se presenta como un importante sumidero de carbono para la ciudad de Lima.

Conclusiones

Se estimó la reserva de carbono del ecosistema Lomas de Amancaes en 39,29 tC/ha y el total en 8.593,97 tC, cuyo valor económico se encuentra entre los USD 85.939,7 y 1.615.666,4. La cantidad de carbono fue similar en todos los niveles evaluados. Este ecosistema es un sumidero de carbono importante para Lima, y contribuye en la mitigación de los impactos del cambio climático. Los resultados sobre el almacenamiento de carbono en el presente estudio amplían la información que puede ayudar a la promoción de la conservación y protección de este ecosistema y otros similares. Se recomienda fomentar la investigación del ecosistema de lomas, con el fin de generar más datos sobre el servicio de captura y almacenamiento de carbono.

Material suplementario

Ver el material suplementario en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1760/3317>

Agradecimientos

A la Universidad Científica del Sur por el financiamiento a través del Concurso de Fondos de Tesis 2019-2. Al Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) por el permiso para realizar el estudio. A Haydee Cerrón y Trinidad Pérez, de la Asociación de Protectores Ambientales de la Flor y las Lomas de Amancaes (PAFLA), por su apoyo y soporte continuo a lo largo de toda la época de muestreo. A Karol Salazar, Víctor Guerrero-Silva y Leonardo Palomino por el apoyo brindado durante la época de muestreo.

Contribución de los autores

VHGP y HA planearon y diseñaron el estudio y analizaron la información recolectada. Todos los autores participaron en el trabajo de campo, 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

- Abanto, D.** (2022). *Valoración económica de las lomas de Lima*. <https://www.pe.undp.org/>
- Aguilar, M., Orbegoso, F., Díaz, B.** (2015). El problema de la vivienda en el distrito de Pilloco Marca: 2012-2014. *Investigación Valdizana*, 9(1), 27-30.
- Alam, S. A., Starr, M., Clark, B.J.F.** (2013). Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study. *Journal of Arid Environments*, 89, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.002>
- Ampuero, W., Aponte, H.** (2020). Estimación del carbono almacenado en la comunidad del junco (*Schoenoplectus americanus*) bajo dos escenarios de crecimiento en el humedal costero Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa (Lima-Perú). *Arnaldoa*, 27(1), 157-164. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.271.27117>
- Aponte, H.** (2015). Ecosistemas potenciales para el turismo en la costa de Lima y Callao: oportunidades y perspectivas. *Novum Otium*, 1, 57-64.

- 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., Romero, P., Cano, A., Arana, C.** (2005). Análisis preliminar de la distribución altitudinal de la vegetación en las lomas de Lima. *XIV RC ICBAR*, 162.
- Arévalo, J., Aponte, H.** (2020). Almacenamiento de carbono y agua en *Tillandsia latifolia* Meyen en un sector del Tillandsial de Piedra Campana (Lima / Perú). *Ecología Aplicada*, 19(1), 9. <https://doi.org/10.21704/rea.v19i1.1441>
- Ayala-Niño, F., Maya-Delgado, Y., García-Calderón, N. E., Olmedo, G., Guevara, M., Troyo-Diéguez, E.** (2020). Spatial distribution of soil carbon storage in desert shrubland ecosystems of northwest Mexico. *Journal of Arid Environments*, 183, 104251. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104251>
- Blake, G. R., Hartge, K. H.** (1986). Bulk Density. En *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods* (pp. 363-375). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- Brahim, N., Bernoux, M., Blavet, D., Tahar, G.** (2010). Tunisian Soil Organic Carbon Stocks. *International Journal of Soil Science*, 5, 34-40. <https://doi.org/10.3923/ijss.2010.34.40>
- Bryan, B. A., Nolan, M., Harwood, T. D., Connor, J. D., Navarro-García, J., King, D., Summers, D. M., Newth, D., Cai, Y., Grigg, N., Harman, I., Crossman, N. D., Grundy, M. J., Finnigan, J. J., Ferrier, S., Williams, K. J., Wilson, K. A., Law, E. A., Hatfield-Dodds, S.** (2014). Supply of carbon sequestration and biodiversity services from Australia's agricultural land under global change. *Global Environmental Change*, 28(1), 166-181. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.013>
- Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S., An, S., Cobb, K. M., Collins, M., Guilyardi, E., Jin, F., Kug, J., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Takahashi, K., Timmermann, A., Vecchi, G., Watanabe, M., Wu, L.** (2015). ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(9), 849-859. <https://doi.org/10.1038/nclimate2743>
- Carpenter, A.T., Elzinga, C.L., Salzer, D.W., Willoughby, J.W.** (1999). Measuring and Monitoring Plant Populations. *Journal of Range Management*, 52(5), 544. <https://doi.org/10.2307/4003786>
- Chino, E.** (2019). *Evaluación del servicio ambiental de captura y almacenamiento de carbono en la comunidad de Tillandsial (Bromeliaceae) en las pampas de Cerro Intiorko en la provincia de Tacna, 2016*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. pp. 156.
- Clemente-Arenas, E.R.** (2022). Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios - Perú. *Revista Forestal Del Perú*, 37(1), 54-68. <https://doi.org/10.21704/rfp.v37i1.1593>
- Corvacho, M.F.** (2020). *Estimación del carbono almacenado en los totrales y gramadales del refugio de vida silvestre Los Pantanos de Villa, Lima, Perú*. Universidad Científica del Sur. pp. 100.
- Cuya, O., Sánchez, S.** (1991). Flor de Amancaes: lomas que deben conservarse. *Boletín de Lima*, 13(76), 59-64.
- de Araujo Barbosa, C.C., Atkinson, P.M., Dearing, J.A.** (2015). Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, 52, 430-443. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.01.007>
- del Río, C.** (2019). *Spatiotemporal characteristics of coastal fog in the Atacama Desert*. Heidelberg University. pp. 195.
- del Río, C., Rivera, D., Siegmund, A., Wolf, N., Cereceda, P., Larraín, H., Lobos, F., García, J., Osses, P., Zanetta, N., Lambert, F.** (2018). ENSO Influence on Coastal Fog-Water Yield in the Atacama Desert, Chile. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(1), 127-144. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.01.0022>
- Dillon, M. O., Haas, J.** (2003). El Niño in Peru : biology and culture over 10,000 years : Papers from the VIII Annual A. Watson Armour III Spring Symposium, May 28-29, 1999, Chicago. En J. Haas & M. Dillon (Eds.), *Botany* (Issue January 2003). Field Museum of Natural History. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.2569>
- Dillon, M.O., Leiva-González, S., Zapata Cruz, M., Asencio, P.L., Silvestre, V.Q.** (2011). Floristic Checklist of the Peruvian Lomas Formations-Catálogo florístico de las Lomas peruanas. *Arnaldoa*, 18(1), 07-32.
- Dillon, M.O., Rundel, P.W.** (1990). The Botanical Response of the Atacama and Peruvian Desert Floras to the 1982-83 El Niño Event. En *Elsevier Oceanography Series*, 52(C), 487-504. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70047-3](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70047-3)

- Díaz-Hernández, J.L., Fernández, E.B., González, J.L.** (2003). Organic and inorganic carbon in soils of semiarid regions: a case study from the Guadix–Baza basin (Southeast Spain). *Geoderma*, 114(1-2), 65-80. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00342-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00342-7)
- Eichler, T.P., Londoño, A.C.** (2013). ENSO impacts on Lomas formation in south coastal Peru: Implications for the Pliocene? *Advances in Meteorology*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/175947>
- Engel, F.** (1973). New Facts about Pre-Columbian Life in the Andean Lomas. *Current Anthropology*, 14(3), 271-280. <https://doi.org/10.1086/201330>
- Evans, R.D., Koyama, A., Sonderegger, D.L., Charlet, T.N., Newingham, B.A., Fenstermaker, L.F., Harlow, B., Jin, V.L., Ogle, K., Smith, S.D., Nowak, R.S.** (2014). Greater ecosystem carbon in the Mojave Desert after ten years exposure to elevated CO₂. *Nature Climate Change*, 4(5), 394-397. <https://doi.org/10.1038/nclimate2184>
- Eyherabide, M., Sainz-Rozas, H., Barbieri, P., Echeverría, H. E.** (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia Del Suelo*, 32(1), 13-19. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672014000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Falvey, M., Garreaud, R.D.** (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research*, 114(D4), D04102. <https://doi.org/10.1029/2008JD010519>
- Feng, Q., Endo, K.N., Guodong, C.** (2002). Soil carbon in desertified land in relation to site characteristics. *Geoderma*, 106(1-2), 21-43. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00099-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00099-4)
- Guerry, A.D., Polasky, S., Lubchenco, J., Chaplin-Kramer, R., Daily, G. C., Griffin, R., Ruckelshaus, M., Bateman, I. J., Duraiappah, A., Elmqvist, T., Feldman, M. W., Folke, C., Hoekstra, J., Kareiva, P. M., Keeler, B. L., Li, S., McKenzie, E., Ouyang, Z., Reyers, B., ... Vira, B.** (2015). Natural capital and ecosystem services informing decisions: From promise to practice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(24), 7348-7355. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503751112>
- Hammer, Ø., Harper, D., Ryan, P.** (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 9.
- Henry, M., Valentini, R., Bernoux, M.** (2009). Soil carbon stocks in ecoregions of Africa. *Biogeosciences Discussions*, 6, 797-823. <https://doi.org/10.5194/bgd-6-797-2009>
- Hoffmann, U., Yair, A., Hikel, H., Kuhn, N.J.** (2012). Soil organic carbon in the rocky desert of northern Negev (Israel). *Journal of Soils and sediment*, 12, 811-825. <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0499-8>
- Kalicki, P., Kalicki, T., Kittel, P.** (2014). The Influence of El Niño on Settlement Patterns in Lomas de Lachay, Central Coast, Peru. *Interdisciplinaria Archaeologica: Natural Sciences in Archaeology*, 2(2), 147-160. <https://doi.org/10.24916/iansa.2014.2.5>
- Koch, M.A., Stock, C., Kleinpeter, D., Río, C., Osses, P., Merklinger, F.F., Quandt, D., Siegmund, A.** (2020). Vegetation growth and landscape genetics of Tillandsia lomas at their dry limits in the Atacama Desert show fine-scale response to environmental parameters. *Ecology and Evolution*, 10(23), 13260-13274. <https://doi.org/10.1002/ece3.6924>
- Kubiszewski, I., Costanza, R., Anderson, S., Sutton, P.** (2017). The future value of ecosystem services: Global scenarios and national implications. *Ecosystem Services*, 26, 289-301. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.05.004>
- Laban, P., Metternicht, G., Davies, J.** (2018). Soil biodiversity and soil organic carbon: keeping drylands alive. En *Soil biodiversity and soil organic carbon: keeping drylands alive*. IUCN, International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2018.03.en>
- Lal, R.** (2019). Carbon Cycling in Global Drylands. *Current Climate Change Reports*, 5(3), 221-232. <https://doi.org/10.1007/s40641-019-00132-z>
- Lal, R., Negassa, W., Lorenz, K.** (2015). Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 15(C), 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.09.002>
- Li, C., Zhang, C., Luo, G., Chen, X., Maisupova, B., Madaminov, A. A., Han, Q., Djenbaev, B. M.** (2015). Carbon stock and its responses to climate change in Central Asia. *Global Change Biology*, 21(5), 1951-1967. <https://doi.org/10.1111/gcb.12846>
- Llellish, M., Odar, J., Trinidad, H.** (2015). *Guía de Flora de las Lomas de Lima* (1a ed.). Servicio Nacional de Flora y Fauna Silvestre. <https://doi.org/https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4431.0564>

- Maguiña, E.** (2016). Esbozo de las migraciones internas en el siglo XX y primera década del siglo XXI y su relación con los modelos de desarrollo económico en el Perú. *Anales Científicos*, 77(1)(1), 17-28. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21704/ac.v77i1.622>
- Manrique, R., Ferrari, C., Pezzi, G.** (2010). The influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) on fog oases along the Peruvian and Chilean coastal deserts. *5th International on Fog, Fog Collection and Dew, July*, 25-30. <https://doi.org/10.13140/2.1.2522.7207>
- Manrique, R., Ricotta, C., Ferrari, C., Pezzi, G.** (2014). Latitudinal pattern in plant composition along the Peruvian and Chilean fog oases. *Plant Biosystems*, 148(5), 1002-1008. <https://doi.org/10.1080/11263504.2014.918059>
- Moat, J., Orellana-García, A., Tovar, C., Arakaki, M., Arana, C., Cano, A., Faundez, L., Gardner, M., Hechenleitner, P., Hepp, J., Lewis, G., Mamani, J.-M., Miyasiro, M., Whaley, O. Q.** (2021). Seeing through the clouds – Mapping desert fog oasis ecosystems using 20 years of MODIS imagery over Peru and Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103(pre-print), 102468. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102468>
- Mogas, J., Micaló, P.** (2005). El valor de la fijación de carbono en los programas de forestación. *Boletín Económico de ICE, Información Comercial Española*, 13-28.
- Muenchow, J., Hauenstein, S., Bräuning, A., Bäuml, R., Rodríguez, E. F., Von Wehrden, H.** (2013). Soil texture and altitude, respectively, largely determine the floristic gradient of the most diverse fog oasis in the Peruvian desert. *Journal of Tropical Ecology*, 29(5), 427-438. <https://doi.org/10.1017/S0266467413000436>
- Muñoz-Schick, M., Pinto, R., Mesa, A., Moreira-Muñoz, A.** (2001). “Oasis de neblina” en los cerros costeros del sur de Iquique, región de Tarapacá, Chile, durante el evento El Niño 1997-1998. *Revista Chilena de Historia Natural*, 74(2), 1-15. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2001000200014>
- Nieuwland, B., Mamani, J. M.** (2017). Las lomas de Lima: enfocando ecosistemas desérticos como espacios abiertos en Lima metropolitana. *Espacio y Desarrollo*, 133(29), 109-133. <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201701.005>
- Orrego, J.L.** (2011). *San Juan de Lurigancho*. Blog Pucp. <http://blog.pucp.edu.pe/blog/juanluisorrego/2011/09/20/san-juan-de-lurigancho/>
- Palomino, D., Cabrera, C.** (2007). Estimación del servicio ambiental de captura del CO₂ en la flora de los humedales de Puerto Viejo. *Revista Del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 10(20), 49-59.
- Pandeya, B., Buytaert, W., Zulkafli, Z., Karpouzoglou, T., Mao, F., Hannah, D.M.** (2016). A comparative analysis of ecosystem services valuation approaches for application at the local scale and in data scarce regions. *Ecosystem Services*, 22, 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.10.015>
- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., Watson, R. T., Başak Dessane, E., Islar, M., Kelemen, E., Maris, V., Quaas, M., Subramanian, S. M., Wittmer, H., Adlan, A., Ahn, S. E., Al-Hafedh, Y. S., Amankwah, E., Asah, S. T., ... Yagi, N.** (2017). Valuing nature’s contributions to people: the IPBES approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26-27, 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.006>
- Pérez, H., Luccini, E., Herrera, L., Parodi, M., Matar, M., Barrea, L., Mechni, M., Masramón, E.** (2015). Cuantificación de la captura de CO₂ por la flora nativa de totora en un humedal costero en Perú. *Energeia*, 13(13), 73-80.
- Pérez-Quezada, J.F., Delpiano, C. A., Snyder, K.A., Johnson, D.A., Franck, N.** (2011). Carbon pools in an arid shrubland in Chile under natural and afforested conditions. *Journal of Arid Environments*, 75(1), 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.08.003>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.** (2018). *Retos y oportunidades en la conservación de las lomas de Lima Metropolitana*. <https://www.undp.org/es/peru/publications/eba-lomas>
- Rolando, J. L., Del Castillo, J. D., Padilla, D., Quinteros, Z., Sánchez, E.** (2017). Annual seasonality and diversity patterns of the plant community in a fog oasis ecosystem in the city of Lima. *Tropical Ecology*, 58(4), 781-791.
- Rundel, P.W.** (1978). Ecological Relationships of Desert Fog Zone Lichens. *The Bryologist*, 81(2), 277. <https://doi.org/10.2307/3242189>
- Rundel, P.W., Dillon, M.O., Palma, B., Mooney, H.A., Gulmon, S.L., Ehleringer, J.R.** (1991). The Phytogeography and Ecology of the Coastal Atacama and Peruvian Deserts. *Aliso*, 13(1), 1-49. <https://doi.org/10.5642/aliso.19911301.02>

- Schulz, N., Aceituno, P., Richter, M.** (2011). Phytogeographic divisions, climate change and plant dieback along the coastal desert of northern Chile. *Erdkunde*, 65(2), 169-187. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2011.02.05>
- Schulz, N., Boisier, J.P., Aceituno, P.** (2012). Climate change along the arid coast of northern Chile. *International Journal of Climatology*, 32(12), 1803-1814. <https://doi.org/10.1002/joc.2395>
- Toledo, A.** (2020). *Captura de Carbono en la especie Tillandsia werdermannii y Tillandsia purpurea en las Lomas Arrojadero situada entre los Distritos de Inclán y Locumba, Tacna*. Universidad Privada de Tacna. pp. 82.
- Tovar, C., Infantas, E.S., Roth, V.T.** (2018). Plant community dynamics of lomas fog oasis of Central Peru after the extreme precipitation caused by the 1997-98 El Niño event. *PLoS ONE*, 13(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190572>
- Trinidad, H., Huamán-Melo, E., Delgado, A., Cano, A.** (2012). Flora vascular de las lomas de Villa María y Amancaes, Lima, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 19(2), 149-158. <https://doi.org/10.15381/rpb.v19i2.834>
- Ussiri, D.A.N., Lal, R.** (2017). Introduction to Global Carbon Cycling: An Overview of the Global Carbon Cycle. En *Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation* (Issue C, pp. 61-76). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53845-7_3
- Vásquez, M.** (2008). Comparación de dos métodos de muestreo para el estudio de la comunidad herbácea de Las Lomas. *Zonas Áridas*, 12(1), 166-183.
- Vega-Centeno, P.** (2017). La dimensión urbana de las centralidades de Lima Norte: cambios y permanencias en la estructura metropolitana. *EURE (Santiago)*, 43(129), 5-25. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612017000200001>
- Walkley, A., Black, I.** (1934). An examination of the Degtjareff Method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wang, C., Zhan, J., Chu, X., Liu, W., Zhang, F.** (2018). Variation in ecosystem services with rapid urbanization: A study of carbon sequestration in the Beijing–Tianjin–Hebei region, China. *Physics and Chemistry of the Earth, September*, 0-1. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.09.001>
- Woomer, P.L., Touré, A., Sall, M.** (2004). Carbon stocks in Senegal's Sahel Transition Zone. *Journal of Arid Environments*, 59(3), 499-510. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.03.027>

Artículo original

¿Se están reduciendo los humedales de la costa del Pacífico suramericano? El caso de los humedales de Lima

Are the wetlands on the Pacific coast of South America shrinking? The case of Lima wetlands

✉ Daneska Urbina^{1,2}, ✉ Flavia Rivera-Cáceda², ✉ Héctor Aponte^{1,2,*}

¹ Carrera de Biología Marina, Facultad de Ciencias Veterinarias y Biológicas, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

² Coastal Ecosystems of Peru Research Group, Lima, Perú

Resumen

Los humedales costeros se ven amenazados por las actividades antropogénicas, lo que ha ocasionado cambios en su área. En este estudio se evaluaron los cambios en las áreas totales y la cobertura vegetal de seis humedales costeros de Lima entre el 2002 y el 2019. Para ello, se utilizaron imágenes satelitales, teledetección y un sistema de información geográfica (SIG). Los resultados evidenciaron un incremento en el área de los humedales Albufera de Medio Mundo (+37,51 %) y Laguna El Paraíso (+6,40 %), en tanto que el área de los humedales de Ventanilla (-21,88 %), Puerto Viejo (-7,37 %) y Santa Rosa (-3,17 %) disminuyó. La tasa de cambio promedio del área de estudio (+0,14 % anual) fue mayor al cambio promedio mundial (-1,08 % anual). En cuanto a la cobertura vegetal, tres humedales presentaron un aumento: Albufera de Medio Mundo (+51,54 %), Laguna El Paraíso (+26,03 %) y Humedal Santa Rosa (+12,36 %), pero se apreció una disminución en los humedales de Puerto Viejo (-1,34 %), Ventanilla (-6,62 %) y Los Pantanos de Villa (-18,13 %). Las reducciones pueden deberse a las actividades antropogénicas (agricultura, desecho del desmonte o ganadería) reportadas en estudios previos en las áreas evaluadas, en tanto que el aumento en la cobertura y en el área estaría relacionado con el desarrollo propio de estos ecosistemas cuando están alejados de la población o cuando la vegetación aumenta en los espejos de agua producto de procesos de eutrofización. Sugerimos evaluar la evolución de estos humedales por separado para que no se pierda información sobre el aumento o reducción de sus áreas.

Palabras clave: Clasificación no supervisada; Cobertura vegetal; Humedales costeros; Imágenes satelitales; Índice de vegetación diferencial normalizada-NDVI.

Abstract

Coastal wetlands are threatened by anthropogenic activities that cause changes in the area. The present study evaluated the potential changes in the total areas and the vegetation cover of six coastal wetlands of Lima from 2002 to 2019 using remote sensing and GIS. The results showed an increase in the area of two wetlands: Albufera de Medio Mundo (+ 37.51%) and Laguna El Paraíso (+ 6.40%). On the other hand, the wetlands of Ventanilla (-21.88%), Puerto Viejo (-7.37%), and Santa Rosa (-3.17%) showed a decrease. The average exchange rate of the area (+ 0.14% per year) was higher than the world average change (-1.08% per year). Regarding vegetation cover, three wetlands showed an increase: Albufera de Medio Mundo (+ 51.54%), Laguna El Paraíso (+ 26.03%), and Humedal Santa Rosa (+ 12.36%). On the contrary, a decrease was registered in the wetlands of Puerto Viejo (-1.34%), Ventanilla (-6.62%), and Los Pantanos de Villa (-18.13%). The reductions may be due to anthropogenic activities (agriculture, dumping of construction waste, or livestock) reported in previous studies for these areas. The increases in the coverage and the area may be related to the expected development of ecosystems when they are far from the population while vegetation increases in water bodies may respond to eutrophication processes. We suggest evaluating the evolution of these wetlands independently to avoid losing information about their increase or decrease.

Keywords: Coastal wetlands; Normalized Difference Vegetation Index-NDVI; Satellite images; Unsupervised classification; Vegetal cover.

Citación: Urbina D, Rivera-Cáceda F, Aponte H. ¿Se están reduciendo los humedales de la costa del Pacífico suramericano? El caso de los humedales de Lima. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):985-998, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1699>

Editor: Gabriel Roldan

***Correspondencia:**

Héctor Aponte;
haponte@cientifica.edu.pe

Recibido: 6 de septiembre de 2022

Aceptado: 22 de noviembre de 2022

Publicado en línea: 30 de noviembre de 2022



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

Introducción

Los humedales se consideran uno de los ecosistemas más productivos del mundo (Mitsch & Gosselink, 1993), pues favorecen al reciclaje de nutrientes, brindan seguridad alimentaria y almacenan carbono, su presencia disminuye el impacto de las inundaciones y, además, proporcionan agua dulce y brindan alimento a las especies, incluida la población humana (Constanza *et al.*, 1997, 2014; Farber *et al.*, 2002). Muchos humedales también tienen un gran valor cultural, espiritual y recreativo, y son fuente de inspiración (De Groot *et al.*, 2007; Ramsar, 2018). Por todo ello, es importante establecer medidas para su gestión y conservación, de manera que se preserven dichos servicios ecosistémicos para las generaciones futuras (De Groot *et al.*, 2007).

En Perú los humedales costeros se alimentan del agua proveniente de las cuencas de la vertiente occidental de los Andes, la cual puede llegar directamente a la costa o filtrarse para formar parte de la napa freática, pasando inclusive por irrigaciones, campos agrícolas y urbanizaciones (Aponte *et al.*, 2020). Forman parte de un corredor biológico a lo largo de la costa desértica del Perú (Aponte & Ramírez, 2011) con una gran cantidad de organismos que suman más de 300 especies inventariadas (Pacheco *et al.*, 2015; Aponte & Apeño, 2019; Castillo & Huamantínco, 2020; Pulido *et al.*, 2020). Los humedales se encuentran amenazados por actividades antropogénicas como el crecimiento urbano, el exceso de pastoreo, los incendios, la disposición de desmonte y la introducción de especies exóticas (Ramírez & Cano, 2010; Aponte *et al.*, 2020), lo que genera cambios en el área que ocupan.

El uso de sistemas de información geográfica (SIG) y de teledetección permite evidenciar cambios en los ecosistemas (Lowry, 2007; Flores *et al.*, 2020). El análisis de los índices espectrales más comunes, conocidos como índices de vegetación, resalta las diferencias en la cobertura vegetal (Chuvienco *et al.*, 1999). Uno de ellos, el índice de vegetación normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI), determina tanto la presencia como el estado de la vegetación mediante la diferencia en la reflectividad entre bandas espectrales (Hernández *et al.*, 2014); este índice arroja valores del verdor y proporciona la cantidad de vegetación presente en una superficie midiendo las relaciones entre la energía absorbida y la emitida por los objetos terrestres (Tovar, 2012), con lo cual se puede calcular el área de la cobertura vegetal para una determinada zona, así como sus variaciones en el tiempo.

Ya se han hecho algunas aproximaciones sobre el área que ocupan los humedales de la costa peruana. Por ejemplo, en el Atlas de los humedales costeros del Pacífico se registra el área de cada uno de los humedales de la costa (<https://humedalescosteros.org/atlas/>), y en algunos otros estudios, publicados como artículos científicos e informes técnicos, se aborda la variación del área y la cobertura vegetal de los humedales marino-costeros, por ejemplo, en los manglares de Tumbes-Perú (Príncipe & Céspedes, 2014) y en Los Pantanos de Villa (Flores *et al.*, 2020; Rojas *et al.*, 2020); en estos dos casos el patrón de reducción de las áreas con vegetación es coincidente. Dado que los métodos de evaluación de la extensión, las estimaciones de la tasa de pérdida y la degradación de los humedales a nivel mundial no siempre concuerdan (Lehner & Döll, 2004; Finlayson *et al.*, 2005), es importante saber si los patrones del cambio del área se cumplen también en otros humedales aún no evaluados, así como comparar si tales cambios siguen las tendencias globales (Lehner & Döll, 2004; MacKay *et al.*, 2009; Rebelo *et al.*, 2018).

En ese marco, el objetivo de la presente investigación fue determinar las áreas totales y la cobertura vegetal de seis humedales de la costa de Lima mediante el uso de teledetección y SIG, así como evaluar los cambios entre el 2002 y el 2019.

Materiales y métodos

Área de estudio

Se comparó el área de seis humedales ubicados a lo largo de la costa de Lima: Albufera de Medio Mundo (MM), Laguna El Paraíso (PAR), Humedales de Puerto Viejo (PV), Humedal Santa Rosa (SR), Humedales de Ventanilla (VEN) y Pantanos de Villa (PAN), entre las

latitudes $10^{\circ}58'05.15''$ S y $12^{\circ}34'16.77''$ S (**Figura 1**). Estos humedales forman una franja costera en medio del desierto, son contiguos o cercanos a urbanizaciones, y la mayoría está atravesada por carreteras. Las formaciones vegetales comunes en estos ecosistemas son los juncales (con predominio de *Schoenoplectus americanus* (Pers.)), los gramadales (especialmente especies del género *Sporobolus* o la especie *Distichlis spicata* (L. Greene)), y los totorales de *Typha domingensis* (Pers.) o *Schoenoplectus californicus* (C. A. Mey), que rodean uno o varios espejos de agua (Aponte & Ramírez, 2011; Gonzales *et al.*, 2019). Tres de estos humedales han sido declarados como zonas protegidas por el Estado peruano a través de decretos supremos (D.S.): D. S. 055-2006-AG para el Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa; D. S. 074-2006-AG para el Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla y D.S. 006-2007-AG para el Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo.

El procedimiento descrito a continuación se siguió para el análisis del área de todos los humedales en estudio, con excepción de Pantanos de Villa, donde se calculó solamente la variación de la cobertura y la tasa de cambio a partir de la información disponible en el estudio de Flores *et al.* (2020).

Búsqueda y adquisición de imágenes satelitales e información cartográfica básica

Se adquirieron imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y 8 OLI-TIRS de los humedales estudiados durante el periodo 2002-2019 (**Tabla 1**). Para ello se utilizó la plataforma Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (*United States Geological Service*, USGS) de donde se descargaron las imágenes en formato GeoTIFF. Se seleccionaron aquellas que mostraban poca nubosidad y se procuró que fueran de la misma época del año (por tener la menor nubosidad, se eligieron las de los meses de verano). Todas las imágenes Landsat 7 ETM+ y 8 OLI-TIRS cuentan con una resolución multiespectral de 30 m y una resolución pancromática de 15 m. Como cartografía de base se utilizaron fuentes secundarias a partir de revisiones bibliográficas y se descargó información geopolítica y demográfica del portal del Ministerio de Educación (<http://sigmed.minedu.gob.pe/>).

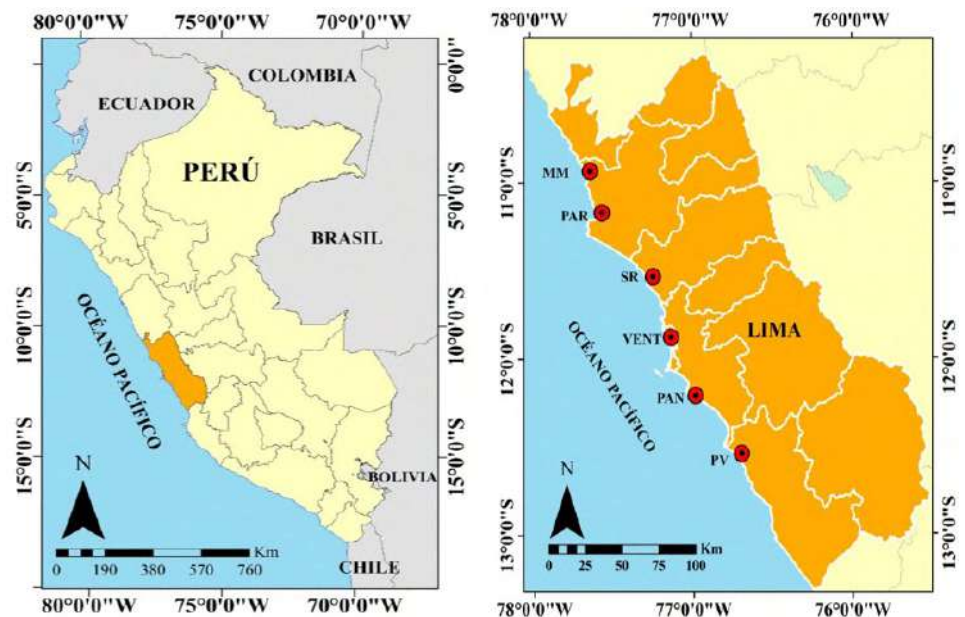


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio. A la izquierda, el mapa del Perú y en naranja el departamento de Lima. La ubicación de los humedales costeros se encuentra señalados en el mapa de la derecha, donde MM: Albufera de Medio Mundo; PAR: Laguna El Paraíso; PV: Humedales de Puerto Viejo; SR: Humedal Santa Rosa; VEN: Humedales de Ventanilla y PAN: Pantanos de Villa.

Análisis, interpretación digital y cálculo del área total

La delimitación de los humedales se basó en el procedimiento explicado por **Condori et al.** (2018): el área se delimita a mano alzada mediante una interpretación visual de las imágenes satelitales en el programa informático Google Earth, con una escala entre 1:400 y 1:1400 dependiendo del humedal (**Tabla 1**), y su función de delimitación de polígonos. Se estableció como límite del humedal el de la distribución de la vegetación de los humedales; los lagos, lagunas y canales asociados se consideraron como parte del humedal. No se consideraron los campos agrícolas.

A continuación se procedió a convertir el polígono digitalizado en un formato shapefile en el programa ARCGIS 10.5. Posteriormente se agregaron las imágenes satelitales y se hizo su respectivo geoprocesamiento (composición de bandas y corrección atmosférica y de calidad de la imagen cada vez que fue necesario). Todos los datos se proyectaron en el sistema de coordenadas UTM del datum WGS84 de la zona 18S. El área se calculó utilizando las capas de polígono para cada humedal.

Cálculo del índice NDVI

Para el cálculo del NDVI se utilizó el programa ARCGIS 10.5 y la herramienta calculadora de trama (*raster calculator*) siguiendo la ecuación (1):

$$NDVI = \frac{(IRCercano - IRRojo)}{(IRCercano + IRRojo)} \quad (1)$$

El rango de valores de este índice fluctúa entre -1 y 1 (de -1 a 0 se considera suelo sin vegetación o cuerpo de agua; de 0 a 1, generalmente suelo con vegetación). Mediante el método de clasificación no supervisada y el índice se clasificó cada imagen utilizando los cinco rangos de la **tabla 2** con base en la clasificación propuesta por **Mohamed Eid et al.** (2020) para diferenciar entre suelos sin vegetación y con vegetación.

Una vez obtenidos los valores de los índices de vegetación para cada imagen, se hizo un proceso de filtrado y suavizado para, posteriormente, sectorizarlos haciendo la conversión de trama a polígono en el programa ARCGIS 10.5 y calcular la cobertura vegetal en las imágenes.

Tabla 1. Fecha de obtención de imágenes satelitales y escala (Google Earth) de cada humedal, 2002 y 2019

Humedales	Landsat 7 ETM+	Escala 2002	Landsat 8 OLI-TIRS	Escala 2019
Albufera de Medio Mundo	9/02/2002	1:800	16/02/2019	1:700
Laguna El Paraíso	22/03/2002	1:1300	16/02/2019	1:1300
Humedal Santa Rosa	9/02/2002	1:700	16/02/2019	1:700
Humedales de Ventanilla	9/02/2002	1:500	16/02/2019	1:400
Humedales de Puerto Viejo	9/02/2002	1:700	14/04/2019	1:500

Tabla 2. Clasificación del NDVI

Valor de NDVI	Clase
-1 a 0	Cuerpo de agua o suelo sin vegetación
0 a 0,4	Vegetación escasa
0,4 a 0,6	Vegetación moderada
0,6 a 1	Vegetación densa

Fuente: **Mohamed Eid et al.** (2020)

Comparación temporal y tasa de cambio anual del área de los humedales

Se comparó el área total de cada humedal en el periodo establecido (2002-2019) con base en los resultados obtenidos previamente y la información actual de su área. La cobertura vegetal obtenida a través de los años servirá para estimar las tasas de cambio anual (T) mediante la ecuación (2):

$$T (\%/año) = \frac{\left(\frac{\text{Área en el año 2}}{\text{Área en el año 1}} \times 100 \right) - 100}{(\Delta \text{tiempo Año2} - \text{Año 1})} \quad (2)$$

Resultados

Área de los humedales

Con base a la delimitación generada mediante el análisis visual de las imágenes satelitales, se obtuvieron las áreas totales de cada humedal en cada año evaluado, la variación multitemporal y la tasa de cambio (**Tabla 3**).

El humedal con mayor área actual es Laguna El Paraíso (652,56 ha), seguido de la Albufera de Medio Mundo (606,34 ha), los Humedales de Ventanilla (278,04 ha), lod de Puerto Viejo (270,45 ha) y el Humedal Santa Rosa (61 ha). Las **figuras 2 y 3** corresponden a los mapas de los humedales en el periodo evaluado (2002-2019); el humedal con mayor variación del área total fue la Albufera de Medio Mundo, con un aumento de 38 % (principalmente en las zonas norte y oeste), seguido del humedal de Ventanilla, donde el área se redujo en 22 % (en las zonas norte y este y en la zona del ACR, con -59,88 ha, -14,26 ha y -3,24 ha, respectivamente); el humedal con menor variación fue el Santa Rosa, que solo se redujo en 2 ha, es decir, el 3 % del área total (en la zona este).

La tasa de cambio siguió la misma tendencia que la variación del área, siendo la mayor tasa (+2,21 % por año) y la menor (-1,29 % por año) la de los humedales de Albufera de Medio Mundo y de Ventanilla, respectivamente. La tasa de cambio estimada para los humedales que han disminuido (Santa Rosa, Puerto Viejo y Ventanilla) fue de -0,64 % al año en promedio; la tasa promedio de todos los humedales evaluados fue de +0,14 % anual.

Cobertura vegetal

La variación multitemporal de la cobertura y la tasa de cambio de cada humedal por cada año evaluado se encuentran en la **tabla 4**.

En la **figura 4** y en la **5** se pueden apreciar los cambios multitemporales de la cobertura vegetal, con patrones similares a los descritos para el área total, lo que evidencia variaciones positivas para los humedales de Albufera de Medio Mundo (+123,24 ha), Laguna El Paraíso (+95,64 ha) y el Humedal Santa Rosa (+5,22 ha), en tanto que los humedales de Puerto Viejo, Ventanilla y Pantanos de Villa presentaron reducciones en su cobertura vegetal (con -3,55 ha, -19,01 ha y -41,76 ha, respectivamente). Por otro lado, la mayor tasa de cambio correspondió a la Albufera de Medio Mundo (+3,03 % por año) y la menor (-1,07 % por año) a Los Pantanos de Villa.

Tabla 3. Área total, variación multitemporal y tasa de cambio de los humedales, 2002 y 2019

Humedales	Superficie (ha)		Variación del área		Tasa de Cambio
	2002	2019	Ha	%	%/año
Albufera de Medio Mundo	440,95	606,34	+165,39	+ 37,51	+2,21
Laguna El Paraíso	613,3	652,56	+39,26	+ 6,40	+0,38
Humedal Santa Rosa	63	61	-2	-3,17	-0,19
Humedales de Ventanilla	355,9	278,04	-77,86	-21,88	-1,29
Humedales de Puerto Viejo	291,98	270,45	-21,53	-7,37	-0,43

ha: hectáreas

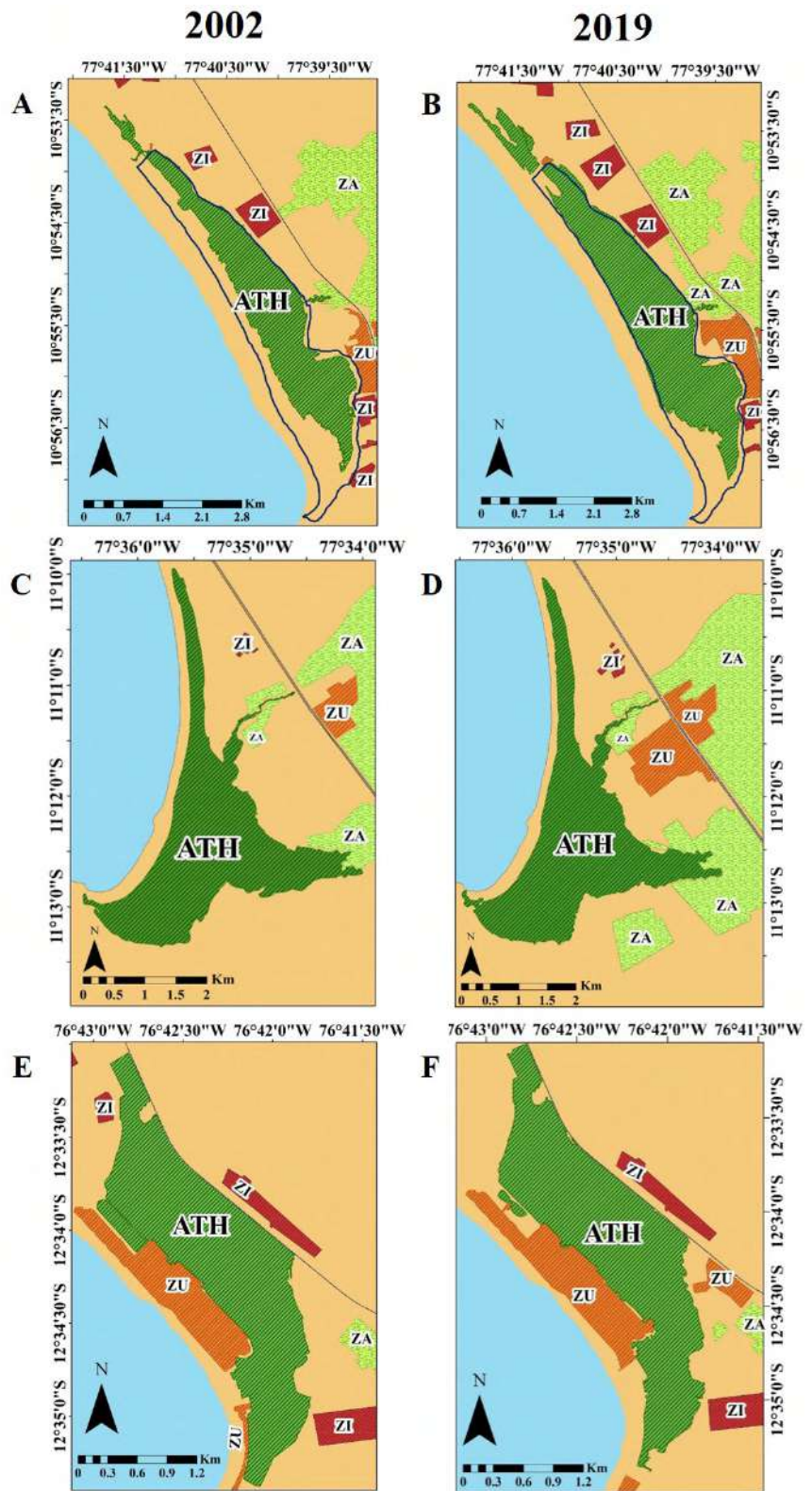


Figura 2. Mapa multitemporal del área total de los humedales (ATH): Albufera de Medio Mundo (A y B), Laguna El Paraíso (C y D) y Humedales de Puerto Viejo (E y F). Las siglas hacen referencia a: ZU= Zona Urbana; ZI= Zona Industrial; ZA= Zona Agrícola y el trazo azul corresponde al territorio categorizado como Área de Conservación Regional (ACR).

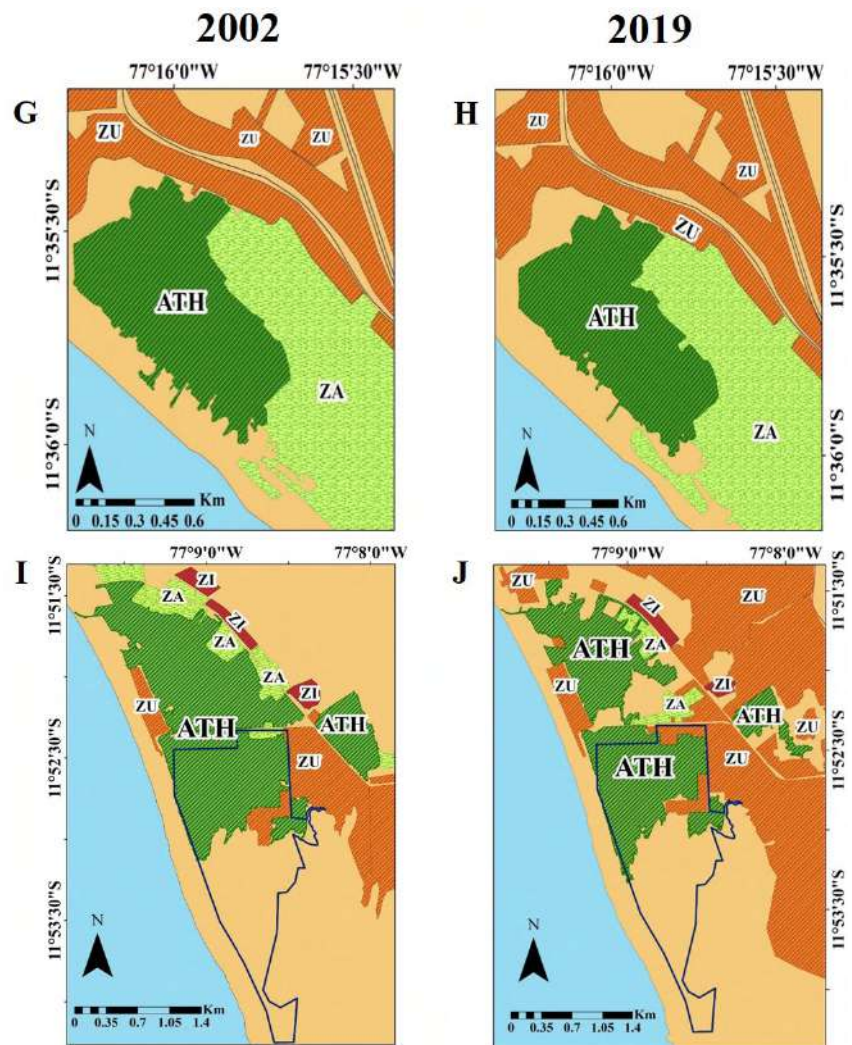


Figura 3. Mapa multitemporal del área total de los humedales (ATH): Humedal Santa Rosa (G y H) y Humedales de Ventanilla (I y J). Las siglas hacen referencia a: ZU= Zona Urbana; ZI= Zona Industrial; ZA= Zona Agrícola. El Humedal de Santa Rosa contiene algunos parches de desmonte y restos arqueológicos; el trazo azul corresponde al territorio categorizado como Área de Conservación Regional (ACR).

Tabla 4. Cobertura vegetal, variación multitemporal y tasa de cambio de los humedales, 2002 y 2019

Humedales	Cobertura vegetal (ha)		Variación de la cobertura		Tasa de Cambio
	2002	2019	Ha	%	%/año
Albufera de Medio Mundo	239,11	362,35	+123,24	+51,54	+3,03
Laguna El Paraíso	367,36	463	+95,64	+26,03	+1,53
Humedal Santa Rosa	42,25	47,47	+5,22	+12,36	+0,73
Humedales de Ventanilla	286,96	267,95	-19,01	-6,62	-0,39
Los Pantanos de Villa	230,39*	188,63*	-41,76	-18,13	-1,07
Humedales de Puerto Viejo	265,11	261,56	-3,55	-1,34	-0,08

ha: hectáreas; *Datos tomados de Flores *et al.* (2020)

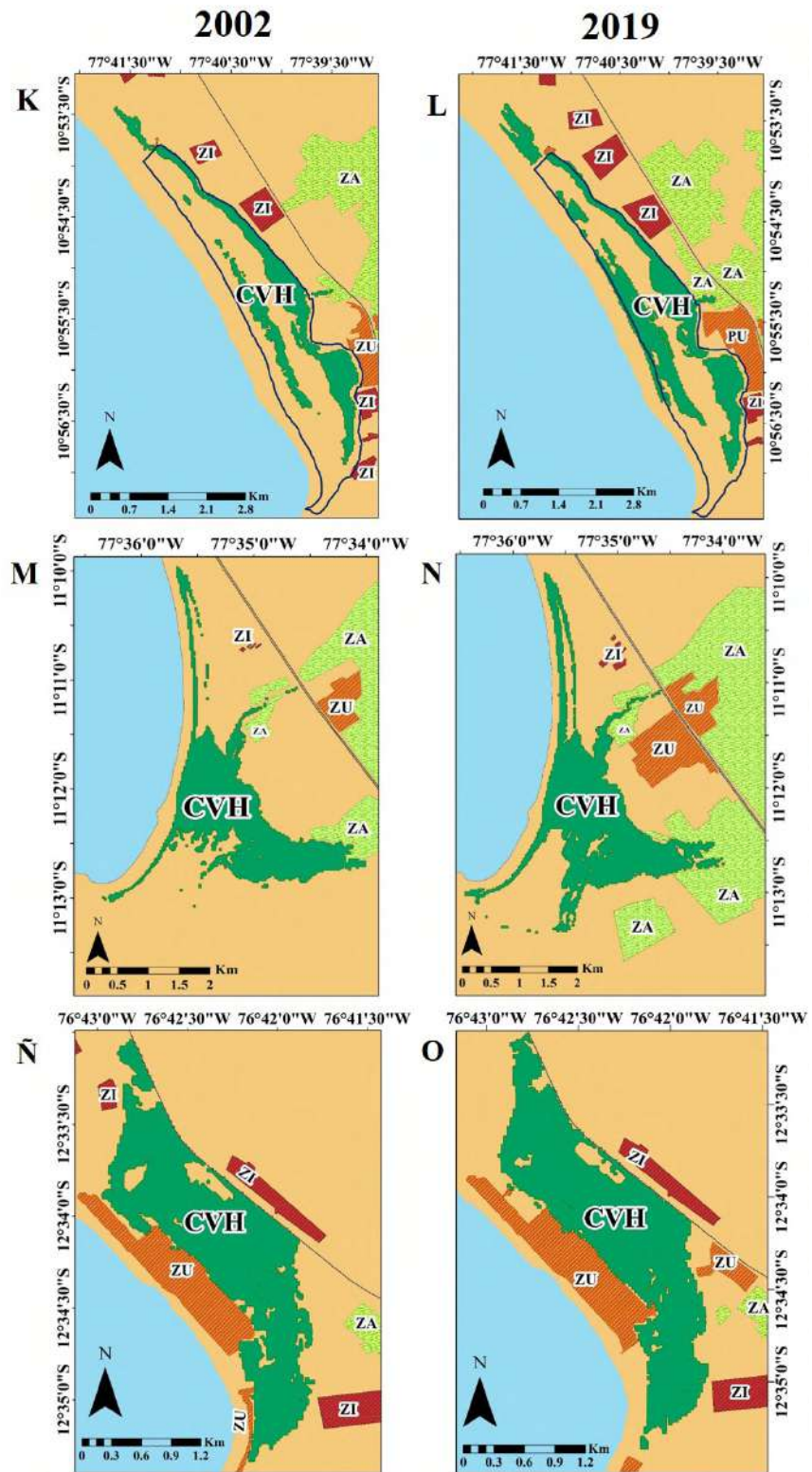


Figura 4. Mapa multitemporal de la cobertura vegetal (CVH) de los humedales de Albufera de Medio Mundo (K y L), Laguna El Paraíso (M y N), Humedales de Puerto Viejo (Ñ y O). Las siglas hacen referencia a: ZU= Zona Urbana; ZI= Zona Industrial; ZA= Zona Agrícola y el trazo azul corresponde al territorio categorizado como Área de Conservación Regional (ACR).

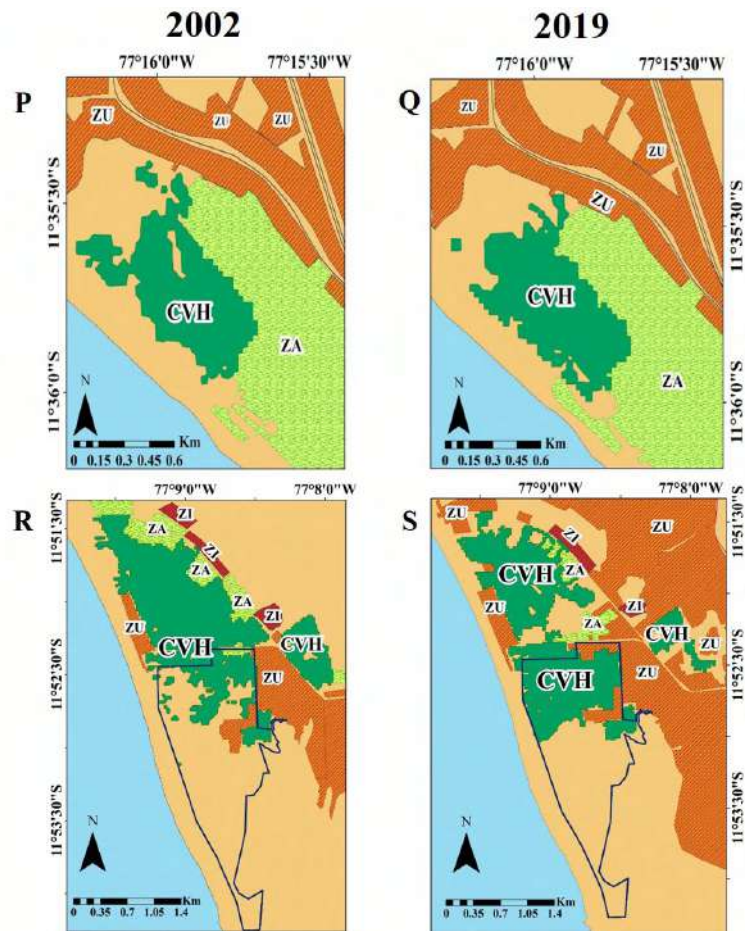


Figura 5. Mapa multitemporal de la cobertura vegetal (CVH) del Humedal de Santa Rosa (P y Q) y Humedales de Ventanilla (R y S). Las siglas hacen referencia a: ZU= Zona Urbana; ZI= Zona Industrial; ZA= Zona Agrícola para el Humedal de Santa Rosa esta zona contiene también algunos parches de desmonte y restos arqueológicos; el trazo azul corresponde al territorio categorizado como Área de Conservación Regional (ACR).

Discusión

Los resultados indican que algunos humedales evaluados presentan una reducción de sus áreas, probablemente relacionada con el crecimiento urbano o el establecimiento de zonas agrícolas o de avicultura (**Figuras 2 y 3**). La disminución del riego para los cultivos agrícolas modifica la infiltración de agua en estos humedales (**Verones *et al.*, 2012**), así como los cambios en el uso del suelo y la disposición del desmonte de construcciones, desechos, basura y otros residuos sólidos (**Aponte *et al.*, 2020; Castillo-Velásquez & Huamantínco-Araujo, 2020**), lo que afecta las condiciones del terreno. La creación de áreas de conservación regional parece tener éxito, ya que sus límites se ven poco afectados por la urbanización, como sucede en la Albufera de Medio Mundo, en tanto que las zonas donde no hay contacto directo con la población parecen conservarse y aumentar su área, como en el caso de la Laguna El Paraíso. Otra causa de la reducción del área en algunos humedales son las invasiones informales de pobladores de bajos recursos, como las reportadas en los Humedales de Ventanilla (**Moschella, 2012**).

Por otra parte, **Aponte & Ramírez (2011)** enfatizan la necesidad de evaluar las granjas destinadas a la avicultura que, amparadas bajo la designación de zona industrial (**Figuras 2 y 3**), han afectado la Albufera de Medio Mundo, la Laguna El Paraíso, los Humedales de Puerto Viejo y los de Ventanilla por su impacto químico, sonoro y visual.

Las actividades agrícolas y ganaderas pueden afectar los humedales reduciendo su área, como se ha visto en los de Ventanilla y Santa Rosa, pero también ocasionan cambios en la estructura de sus comunidades vegetales mediante la introducción de plantas invasoras potenciales, lo que no necesariamente disminuye el área o la cobertura. En este sentido, un caso interesante es el reportado por **González et al.** (2019), quienes recientemente evaluaron el Humedal de Santa Rosa y encontraron nuevas especies para el área, incluidas especies propias de humedales (*Equisetum giganteum* L. y *Wolffiella oblonga* (Phil.) Hegelm.), pero también invasoras potenciales (*Galinsoga parviflora* Cav., *Ipomoea digitata* L., *Medicago sativa* L., *Flaveria bidentis* (L.) Kuntze y *Polypogon viridis* (Gouan) Breistr.). Todo ello resalta la importancia de hacer un seguimiento de sus comunidades vegetales para entender mejor el grado de invasividad (*invasiveness*, *sensu McClay et al.*, 2010; **Gordon & Gantz**, 2011) y el daño que estarían causando esas especies de malezas previamente identificadas. Además, el Humedal Santa Rosa presenta una zona de disposición de desmonte dentro de la zona agrícola, en el lado este (observación personal), que a largo plazo podría cambiar el uso del suelo y convertirse en zona urbana.

Durante los últimos 17 años los incendios se vienen registrando en la mayoría de los humedales estudiados, como el caso de Laguna El Paraíso, Pantanos de Villa, y los Humedales de Puerto Viejo y Ventanilla, siendo las principales causas la quema para el manejo del junco, la totora y el carricillo, la eliminación de plagas, la quema de residuos sólidos, las actividades recreativas con fogatas dentro de los humedales y la quema con fines invasores (**Ramírez et al.**, 2018). A pesar del evidente impacto que estos siniestros ocasionan, es interesante constatar que los humedales tienden a recuperar su cobertura vegetal rápidamente, como en el caso reportado por **Aponte et al.** (2017), lo que implica que esta se recuperaría en el largo plazo, aunque no necesariamente sucedería lo mismo con la biomasa; por ello, es necesario mapear dichos eventos con el fin de corroborar estas observaciones. Además, el almacenamiento y la fijación de carbono dependerán del tipo de humedal, su extensión y otros factores como el tipo de vegetación, la profundidad del suelo y el contenido de nutrientes, entre otros. En el peor de los casos, la degradación de los humedales en el planeta podría liberar 300 millones Tn C/año (**Quintana**, 2018), de ahí la importancia de proteger estos ecosistemas, ya que la fijación del carbono en ellos mitiga los impactos del crecimiento poblacional y del cambio climático (**Pérez et al.**, 2022). En los próximos años también se requerirán estudios que permitan reconocer otros servicios ecosistémicos (por ej., la provisión de beneficios inmateriales como la inspiración) y protegerlos (como en el ejemplo reportado por **Ochoa et al.**, 2022) para promover la implementación de compensaciones a cambio de ellos.

En el presente estudio se encontraron algunas zonas en donde aumentó la cobertura vegetal, por ejemplo, el borde de las lagunas de la zona norte y sur del humedal de Laguna El Paraíso, especialmente con especies como *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla, *T. domingensis* y *Schoenoplectus americanus* (**Aponte & Ramírez**, 2011), cuya cobertura pudo haber aumentado debido a su estrategia de crecimiento clonal y gran adaptabilidad a estos ecosistemas. En el caso de Santa Rosa, la cobertura vegetal aumentó en el cuerpo de agua principal; a esta laguna llegan afluentes provenientes de actividades agrícolas y desagües, lo que ha conducido a su eutrofización (**Verones et al.**, 2012; **Loayza-Basan et al.**, 2018), con la proliferación de plantas acuáticas como *Pistia stratiotes* L. y *Eichhornia crassipes* (Mart.) (**Aponte & Ramírez**, 2011; **Castillo & Huamantínco**, 2020), que eventualmente impide el crecimiento y desarrollo de otros organismos. Es importante continuar el seguimiento espacial y de las variables abióticas, así como el monitoreo del agua, en estos humedales para verificar si aumenta la cobertura vegetal. Si dicho patrón de crecimiento continúa en los próximos años tendrá que evaluarse su mantenimiento en caso de que traiga beneficios, o su control, en caso de que afecte la calidad del ecosistema.

Debe mencionarse, asimismo, que los espacios no cubiertos albergan especies particulares (por ejemplo, algunas aves de los arenales, o aves playeras), por lo que es importante estudiar su diversidad en esos espacios no vegetados, identificarlas y protegerlas adecuadamente (**Apeño & Aponte**, 2022).

En otros humedales costeros del Perú los impactos antropogénicos son similares. Por ejemplo, en el humedal Chochoc (Trujillo, Perú) la destrucción por parte de los pobladores es continua: las lagunas del humedal se rellenan con residuos de construcción para secarlas, hay corrales de animales domésticos cercanos, ganadería vacuna y ovina y cultivos, entre otras actividades, lo que tiene un impacto negativo en la biodiversidad, pues provoca la pérdida de flora, la mala calidad del agua y reduce el área total que ocupan las lagunas (**Ruiz-Santillán et al., 2020**). Otro es el caso del humedal de Carquín (Huaura, Lima), donde se han registrado algunas especies potencialmente invasoras que pueden haber ingresado por los canales o por la interacción con los pobladores; en este humedal en particular, el uso del agua de los canales para lavandería puede contribuir a su deterioro (**Aponte et al., 2020**).

Cabe mencionar que los datos sobre la pérdida de extensión de los humedales en las diversas regiones de Suramérica son escasos, pero dicha disminución estaría asociada con la mala planificación del uso de suelo (**Junk et al., 2013**). En estudios previos se ha demostrado la tendencia a la reducción del tamaño de los humedales costeros a nivel global (**Davidson, 2014; Dixon et al., 2016; Davidson & Finlayson, 2018**) y en Latinoamérica (**Rojas et al., 2020**). Es el caso del humedal de Rocuant-Andalién en Chile, cuya área superficial ha disminuido 10 % en un periodo de diez años por efecto del crecimiento urbano (**Rojas et al., 2019**), lo que coincide con los resultados obtenidos en nuestro trabajo en los humedales de Puerto Viejo y Ventanilla.

También hay que tener en cuenta que los factores ya mencionados, el cambio climático y la presencia de especies introducidas o invasoras originan ecosistemas emergentes (**Hobbs et al., 2006**), los cuales presentan cambios en la composición biótica y en los regímenes de funcionamiento (**Andrade & Castro, 2012**). Este fenómeno se ha apreciado en los humedales de la región (**Aponte, 2022; Aponte & Apeño, 2019**), con implicaciones para la gestión de la biodiversidad, pues ahora habría que establecer corredores de diversidad, intensificar su estudio e, incluso, proteger humedales pequeños.

Según nuestros resultados, la tasa de cambio promedio de los humedales estudiados ha disminuido (-0,64 % anual) menos que a nivel mundial (-1,08 % anual estimado para el siglo XX y principios del XXI en los humedales del mundo) (**Davidson, 2014**); la diferencia es mayor si comparamos el promedio de todos los humedales evaluados (+0,14 % anual) con la cifra mundial o con la tasa de pérdida anual desde el 2000 (-0,85 % a -1,60 % anual) (**Ramsar, 2018**). Todo ello llevaría a pensar que los humedales evaluados se encuentran en mejores condiciones que los del resto del mundo; sin embargo, las tasas por localidad revelan casos (por ej., los humedales de Ventanilla) en los que la disminución se encuentra dentro de dichas tendencias. Ello invita a tomar los resultados con cautela y sugiere que la evolución de los humedales debe evaluarse de manera local.

El estado peruano ha tomado medidas para proteger algunos humedales, entre ellas, la estrategia nacional de humedales, cuyo objetivo es establecer un marco de políticas y proponer actividades que promuevan el uso sostenible y la protección de los humedales y sus recursos como aporte al desarrollo integral del país (**MINAM, 2014**). Como ya se mencionó, una de las estrategias que parece tener éxito es la protección de estos ecosistemas mediante la creación de reservas regionales. En el presente estudio se sientan las bases para entender algunos de los cambios en las áreas y en su cobertura vegetal y brinda información que de seguro será de utilidad para la toma de decisiones, la planificación y la gestión de tales ecosistemas en la costa de Lima.

Conclusión

Nuestros resultados indican que ha habido un aumento del área total y la cobertura vegetal en los humedales de Albufera de Medio Mundo y Laguna El Paraíso, en tanto que en los de Ventanilla y Puerto Viejo estas han disminuido en el periodo estudiado. El NDVI permitió medir los cambios de los humedales en los años evaluados. Por último, las posibles causas de la disminución de las áreas incluyen el crecimiento urbano y el establecimiento de zonas

agrícolas, así como la acción de otros impulsores de cambio específicos de cada humedal. Debe considerarse en todo momento que la disminución de los humedales puede afectar los servicios ecosistémicos que brindan y las interacciones ecológicas.

Contribución de los autores

D.U., F.R. y H.A.: conceptualización; D.U. y F.R.: análisis formal, investigación, metodología y software; D.U., F.R. y H.A.: redacción del borrador del manuscrito, redacción, revisión y edición de la versión final. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Fuentes de financiamiento

La investigación no recibió ningún fondo específico para su realización.

Referencias

- Andrade, G. I., Castro, L. G.** (2012). Degradación, pérdida y transformación de la biodiversidad continental en Colombia, invitación a una interpretación socioecológica. *Ambiente y Desarrollo*, *XVI*(30), 53:71.
- 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/raccefyn.1605>
- Aponte, H.** (2022). Nuevos reportes en los humedales de la costa central del Perú: Comentarios sobre el trabajo de Castillo-Velásquez, et al., 2021. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *46*(178), 287-288. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1568>
- Aponte, H., Ramírez, D.W.** (2011). Humedales de la costa central del Perú: estructura y amenazas de sus comunidades vegetales. *Ecología Aplicada*, *10*(1), 31-39. <https://doi.org/10.21704/rea.v10i1-2.411>
- Aponte, H., Ramírez, D. W., Vargas, R.** (2017). Primeros estadios en la regeneración natural de la vegetación post-incendio en los Humedales de Ventanilla (Lima-Perú). *Ecología Aplicada*, *16*(1), 23-30. <https://doi.org/10.21704/rea.v16i1.900>
- Aponte, H., Apeño, A.** (2019). Riqueza de flora vascular de los humedales costeros de Lima: Una aproximación utilizando estimadores no paramétricos. *Arnaldoa*, *26*(1), 131-138. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.261.26107>
- Aponte, H., Gonzáles, S., Gómez, A.** (2020). Impulsores de cambio en los humedales de América Latina: El caso de los humedales costeros de Lima. *South Sustainability*, *1*(2), e023 (1-5). <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-023>
- Castillo-Velásquez, R.M. & Huamantínco-Araujo, A.A.** (2020). Variación espacial de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en la zona litoral del humedal costero Santa Rosa, Lima, Perú. *Revista de Biología Tropical*, *68*(1), 50-68. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.35233>
- Chuvieco, E., Deshayes, M., Stach, N., Cocero, D., Riaño, D.** (1999). *Short-term fire risk: foliage moisture content estimation from satellite data*. In *Remote Sensing of Large Wildfires*. Berlin: Springer. 17-38. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60164-4_3.
- Condori-Luna, I., Loza-Murguía, M., Mamani-Pati, F., Solíz-Valdivia, H.** (2018). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 - 2014. *Journal of the Selva Andina Research Society*, *9*(1), 25-44.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., Marjan Van Den, C.** (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, *387*(1), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van Der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., Farber, S., Turner, R.K.** (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environ Change*, *26*(1), 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>

- Davidson, N. C.** (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(1), 934-941. <https://doi.org/10.1071/MF14173>
- Davidson, N. C. & Finlayson, C. M.** (2018). Extent, regional distribution and changes in area of different classes of wetland. *Marine and Freshwater Research*. 69(1), 1525-1533. <https://doi.org/10.1071/MF17377>
- De Groot, R., Stuij, M., Finlayson, M., Davidson, N.** (2007). Valoración de humedales: lineamientos para valorar los beneficios derivados de los servicios de los ecosistemas de humedales. Informe Técnico de Ramsar núm. 3. <http://biblioteca.cehum.org/handle/123456789/249>
- Dixon, M.J.R., Loh, J., Davidson, N.C., Beltrame, C., Freeman, R., Walpole, M.** (2016). Tracking global change in ecosystem area: the wetland extent trends index. *Biological Conservation*, 193(1), 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.10.023>
- Farber, S. C., Costanza, R., Wilson, M.A.** (2002). Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological economics*, 41(3), 375-392. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00088-5)
- Finlayson, C.M., D’Cruz, R.** (2005). Chapter 20 inland water systems. In: Hassan, R., Scholes, R., Ash, N. (Eds). *Ecosystems and human well-being: current state and trends: findings of the Conditions and Trends Working Group*. Washington DC: Island Press. pp. 551-583.
- Flores, N., Castro, I., Aponte, H.** (2020). Evaluación de las unidades de vegetación en Los Pantanos De Villa (Lima, Perú) mediante sistemas de información geográfica y teledetección. *Arnaldoa*, 27(1), 176-185. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.271.27119>
- González, S., Aponte, H., Cano, A.** (2019). Actualización de la flora vascular del humedal Santa Rosa-Chancay (Lima, Perú). *Arnaldoa*, 26(3), 867-882. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26303>
- Gordon, D. R., Gantz, C. A.** (2011). Risk assessment for invasiveness differs for aquatic and terrestrial plant species. *Biological Invasions*, 13(1), 1829-1842. <https://doi.org/10.1007/s10530-011-0002-2>
- Hernández, C. G., Escribano, J. A., Tarquis, Y.** (2014). Comparación del índice de vegetación de diferencia normalizada obtenido a diferentes escalas en pastos de dehesa. *Pastos y PAC 2014-2020; 53ª Reunión Científica de la SEEP (9-12 junio 2014)*. pp. 121-128.
- Hobbs, R.J., Arico, S., Aronson, J., Baron, J.S., Bridgewater, P., Cramer, V.A., Epstein, P.R., Ewel, J., Klink, C.A., Lugo, A. E., Norton, D., Ojima, D., Richardson, D.M., Sanderson, E.W., Valladares, F., Vila, M., Zamora, R., Zobel, M.** (2006). Novel ecosystems: Theoretical and management aspects of the new ecological world order. *Global Ecology and Biogeography*, 15, 1-7.
- Junk, W. J., An, S., Finlayson, C. M., Gopal, B., Květ, J., Mitchell, S. A., Robarts, R. D.** (2013). Current state of knowledge regarding the world’s wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic sciences*, 75(1), 151-167. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0278-z>
- Lehner, B., Döll, P.** (2004). Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 296(1-4), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.028>
- Loayza-Basan, K., Castillejos-Paniagua, K., Mestas-Valero, R., Quiliche-Durán, J. P. J.** (2018). Estudio de la teledetección y caracterización fisicoquímica del humedal “El Cascajo”, Santa Rosa, Chancay-Lima, Perú. *INFINITUM...*, 7(1), 52-58.
- Lowry, J.** (2007). La utilización de programas y datos de SIG de bajo costo para el inventario, la evaluación y el monitoreo de humedales. Informe Técnico de Ramsar núm. 2. Secretaría de la Convención de Ramsar. Suiza.
- Lugo, A.** (2009). Conundrums, paradoxes and surprises. A brave new world of biodiversity conservation. Presentado en el *XIII World Forestry Congress*, Buenos Aires.
- MacKay, H., Finlayson, C. M., Fernández-Prieto, D., Davidson, N., Pritchard, D., Rebelo, L. M.** (2009). The role of Earth Observation (EO) technologies in supporting implementation of the Ramsar Convention on Wetlands. *Journal of environmental management*, 90(7), 2234-2242. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.01.019>
- McClay, A., Sissons, A., Wilson, C., Davis, S.** (2010). Evaluation of the Australian weed risk assessment system for the prediction of plant invasiveness in Canada. *Biological Invasions*, 12(1), 4085-4098. <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9819-3>
- MINAM.** (2014). Estrategia Nacional de Humedales. Dirección General de Diversidad Biológica. Perú.

- Mitsch, W. J., Gosselink, J.G.** (1993). *Wetlands*, 2nd Edition. Van Nostrand Reinhold Co., New York, NY, USA. pp. 722.
- Mohamed Eid, A. N., Olatubara, C. O., Ewemoje, T. A., Farouk, H., El-Hennawy, M. T.** (2020). Coastal wetland vegetation features and digital Change Detection Mapping based on remotely sensed imagery: El-Burullus Lake, Egypt. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(1), 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.01.004>
- Moschella, P.** (2012). Variación y protección de humedales costeros frente a procesos de urbanización: Casos Ventanilla y Puerto Viejo. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/4527>
- Ochoa Balbacea, D., Gonzáles, S., Apeño, A., Aponte, H.** (2022). Hábitats prioritarios en un humedal costero del Pacífico: propuesta de un índice basado en servicios ecosistémicos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(178), 182-191. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1569>
- Pacheco, V., Zevallos, A., Cervantes, K.** (2015). Mamíferos del Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa, Lima-Perú. *Científica*, 12(1), 26-41. <https://doi.org/10.21142/cient.v12i1.163>
- 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>
- Pulido, V., Salinas, L., del Pino, J., Arana, C.** (2020). Preferencia de hábitats y estacionalidad de las especies de aves de los Pantanos de Villa en Lima, Perú. *Revista peruana de biología*, 27(3), 349-360. <https://doi.org/10.15381/rpb.v27i3.18681>
- Quintana, R. D.** (2018). Humedales, biodiversidad y servicios eco sistémicos. ¿Hacia dónde vamos? En: Universidad Nacional de San Martín y Fundación Innovación Tecnológica (FUNINTEC). Programa Futuros: Escuela de Posgrado: Agua + Humedales. (Serie Futuros). Buenos Aires: UNSAM Edita, 173-192.
- Ramírez, D. W., Cano, A.** (2010). Estado de la diversidad de la flora vascular de los Pantanos de Villa (Lima-Perú). *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 111-114.
- Ramírez, D. W., Aponte, H., Lertora, G., Gil, F.** (2018). Incendios en el humedal Ramsar Los Pantanos de Villa (Lima-Perú): Avances en su conocimiento y perspectivas futuras. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(3), 347-360. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.398>
- Ramsar.** (2018). Perspectiva mundial sobre los humedales: Estado de los humedales del mundo y sus servicios a las personas. Gland (Suiza). Secretaría de la Convención de RAMSAR.
- Rebelo, L.-M., Finlayson, C.M., Strauch, A., Rosenqvist, A., Perennou, C., Tøttrup, C., Hilarides, L., Paganini, M., Wielgaard, N., Siegert, F., Ballhorn, U., Navratil, P., Franke, J., Davidson, N.** (2018). The use of Earth Observation for wetland inventory, assessment and monitoring: An information source for the Ramsar Convention on Wetlands. Ramsar Technical Report No.10. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat.
- Rojas, C., Munizaga, J., Rojas, O., Martínez, C., Pino, J.** (2019). Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: Lessons for sustainable land use planning. *Land Use Policy*, 80(1), 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.036>
- Rojas, C., Aldana-Domínguez, J., Munizaga, J., Moschella, P., Martínez, C., Stamm, C.** (2020). Urban Wetland Trends in Three Latin American Cities during the Latest Decades (2002-2019): Concón (Chile), Barranquilla (Colombia), and Lima (Peru). *Wetland Science & Practice*, 37(4), 283-293.
- Ruiz-Santillán, M. P., Rodríguez, E. H., Coico, F. M.** (2020). Diagnóstico ecológico del humedal Chochoc. *REBIOL*, 39(2), 3-18.
- Tovar, C. M.** (2012). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva: revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, 238(1), 39-46.
- Verones, F., Bartl, K., Pfister, S., Jiménez-Vilchez, R., Hellweg, S.** (2012). Modeling the local biodiversity impacts of agricultural water use: case study of a wetland in the coastal arid area of Perú. *Environmental science & technology*, 46(9), 4966-4974. <https://doi.org/10.1021/es204155g>

Ensayo

La síntesis química “click” y la “bioortogonal” ganan el premio Nobel 2022

The “click” and “bioorthogonal” chemical synthesis win the Nobel Prize 2022

Este año ganaron el premio Nobel de química K. Barry Sharpless y Morten Meldal por la “síntesis click” y Carolyn R. Bertozzi por la “Bioortogonal”. (Ramström, 2022) Es muy posible que este premio hubiera empezado a gestarse cuando Sharpless recibió su primer Nobel hace 21 años (sí, así como se oye, este es su segundo Nobel en química). Desde entonces expresaba su convicción (Kolb *et al.*, 2001) de que la síntesis química debía dejar de imitar en forma precisa las moléculas naturales, y más bien moverse hacia reacciones más simples, que produjeran mucho menos productos secundarios indeseables y que por su precisión fueran muy eficientes.

La síntesis química es un asunto de gran complejidad. La formación de enlaces estables (por ejemplo, C-C) requiere mucha energía, a veces condiciones y solventes poco “amables” y generan muchos productos indeseables que son de difícil separación. En esas condiciones el rendimiento es bajo, y la producción industrial puede resultar imposible por sus costos. Por otro lado, en los compuestos biológicos se encuentran muchos enlaces débiles, que son fundamentales para su funcionalidad, pero que no podrían ser usados en síntesis por su inestabilidad.

Lo que propusieron los premiados (y otros) fue encontrar unos grupos funcionales que se acoplaran en forma dirigida, con facilidad, y que de todas formas generaran enlaces fuertes, irreversibles en las condiciones usuales en las que vivimos.

Los grupos de Sharpless y de Meldal simultáneamente describieron una buena reacción que cumple con esas condiciones: aquella que se produce entre una azida y un alquino. Las azidas son moléculas con tres átomos de nitrógeno unidos linealmente; los alquinos tienen un enlace triple entre dos carbonos. Estos compuestos reaccionan con un simbólico “click”. Es algo como lo que pasa con las fichas de un lego, que solo pueden unirse en una dirección, pero, que pueden, imaginativamente, construir estructuras muy complejas. En el caso de la “química click” imitando estructuras naturales, o inventando unas que no existen en este mundo, pero que pueden cumplir funciones importantes.

Por supuesto el asunto no es tan fácil. Para empezar, las azidas son tan reactivas que a veces explotan. Para controlar esa reacción, los dos grupos descubrieron que el cobre era un catalizador que promovía la síntesis, sin peligros colaterales, y con rendimientos extraordinarios.

Las promesas de esta tecnología desbordan la imaginación. Ya hay proyectos en todo el mundo que la usan para obtener fármacos (nuevas quimioterapias contra el cáncer y novedosos antibióticos), polímeros con funciones ‘extrañas’ como la conducción de la electricidad, herbicidas, retardantes de la corrosión, matrices para reconstrucción de tejidos vivos y la lista se extiende, mucho más.

Lo que no podían imaginar Sharpless y Meldal era que algo parecido se pudiera hacer en seres vivos. Las condiciones de la reacción de todas formas no son tan amables como para eso, y el cobre, usado como catalizador, es tóxico. Acá aparece la sorprendente contribución de Carolyn R. Bertozzi. La llamó “síntesis bioortogonal”. En geometría ortogonal se

Citación: Wasserman M. La síntesis química “click” y la “bioortogonal” ganan el premio Nobel 2022. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):999-1001, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1790>

Editor: Elizabeth Castañeda

Correspondencia:

Moisés Wasserman;
mwassermann@unal.edu.co

Recibido: 9 de octubre de 2022

Aceptado: 9 de octubre de 2022

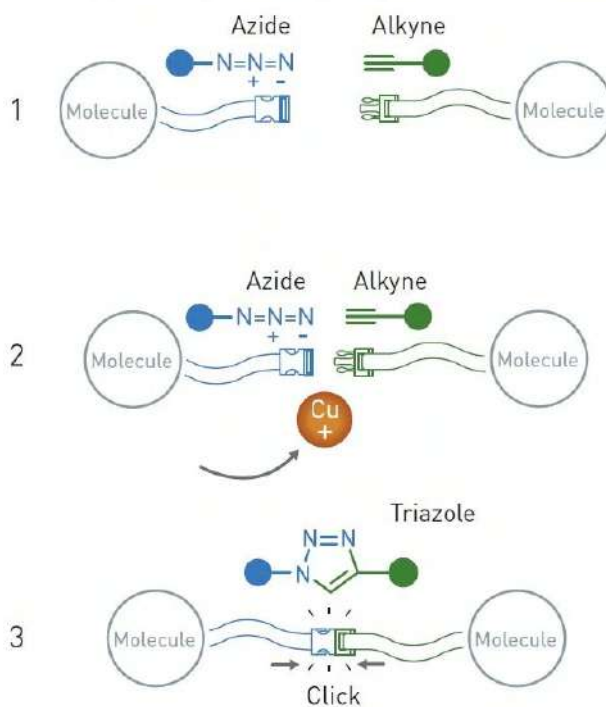
Publicado en línea: 14 de octubre de 2022



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

The click reaction that changed chemistry

Azides and alkynes react very efficiently when copper ions are added. This reaction is now used globally to link molecules together in a simple manner.



©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

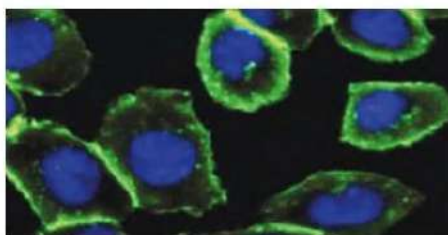
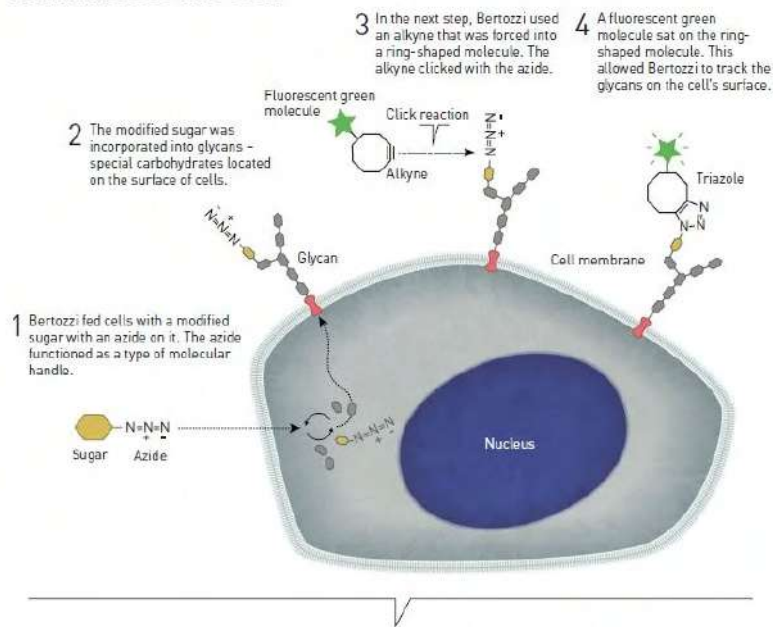
Representación de la síntesis click. Tomado de The Nobel Prize in Chemistry 2022. Popular Science Background. The Royal Swedish Academy of Science, <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2022/popular-information/>

refiere a lo que está perpendicular a un plano. Análogamente en síntesis la ortogonalidad describiría a un conjunto de grupos químicos, completamente independientes, que podrían ser añadidos o removidos en la presencia de otras clases de compuestos, sin interactuar con ellos. Serían grupos ‘indiferentes’ ante la presencia de otros.

Los compuestos “click” desarrollados cumplen perfectamente con esta condición y Bertozzi ya había demostrado que podía lograr que algunos de ellos, tras una manipulación de algunas células, se encontraran presentes en su superficie (**Dube & Bertozzi, 2001**). Sin embargo, para lograr la reacción “click” en células vivas había que encontrar una forma de facilitarla que no dependiera del cobre, que es tóxico. La propuesta que fue desarrollando Bertozzi fue el uso de alquinos cíclicos. El estrés que genera la torción de la molécula cíclica proveía la energía necesaria para reemplazar el catalizador. Así logró algo que parecía un imposible. Poder modificar químicamente la superficie de una célula viva, sin afectar su funcionamiento normal.

También esta química “bioortogonal”, como la “click”, ha abierto posibilidades insospechadas. Ninguna de las dos fue desarrollada con las aplicaciones en mente (aunque científicos tan inteligentes no podían desconocer su potencial). Las dos son usadas hoy en muchos laboratorios, con múltiples y diversos objetivos. Se han convertido en un instrumento excelente para la síntesis química moderna.

Bioorthogonal chemistry illuminates the cell



Bertozzi used the strain-promoted click reaction to track glycans. They have a green glow in the picture. The cell nucleus is coloured blue. Thanks to the glycans' green glow, Bertozzi was able to follow them in the cell.

Image from *Proc Natl Acad Sci USA* (2007) 104:16793-16797

Representación de la química bioortogonal Tomado de The Nobel Prize in Chemistry 2022. Popular Science Background. The Royal Swedish Academy of Science, <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2022/popular-information/>

Moisés Wasserman

Académico Honorario Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Referencias

Ramström, O. (2002) The Royal Swedish Academy of Sciences - 5 October 2022.

Kolb H.C., Finn, M.G., Sharpless, K.B. (2001). Click chemistry: diverse chemical function from a few good reactions. *Angewandte Chemie International Edition*, 40, 2004-2021.

Dube, R.D., Bertozzi, C.R. (2003). Metabolic oligosaccharide engineering as a tool for glycobiology. *Current Opinion in Chemical Biology*, 7, 616-625.

Original article

Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil from *Piper marginatum* leaves obtained by hydrodistillation in pH4, pH7 and pH10

Composición química y actividad antimicrobiana del aceite esencial de hojas de *Piper marginatum* obtenido por hidrodestilación con pH4, pH7 y pH10

Elayne Cristina de Oliveira, Marcílio Fagner Fontes Silva, Clécio Souza Ramos*

Department of Chemistry, Rural Federal University of Pernambuco, 52.171-030, Recife-Pe, Brazil

Abstract

The present study aimed to evaluate possible variations in the chemical composition and antimicrobial activity of essential oils extracted from *Piper marginatum* leaves obtained by hydrodistillation at pH4, pH7, and pH10. When compared, the chemical profiles of the three oils were different. A reduction of major phenylpropanoids *Z*-asarone, dillapiol, and *E*-asarone was observed for samples pH4-EO and pH10-EO as compared to sample pH7-EO. Sesquiterpenes macrocarpene (10.8%), viridiflorene (9.1%), caryophyllene (7.7%), and *E*-nerolidol (6.5%) were the major compounds identified in the pH10-EO sample. Compound α -santonin (36.1%) was identified as a major constituent of the essential oil obtained at pH4. The antimicrobial activity of the essential oils also showed variations in their minimum inhibitory concentration values (MIC). The oil obtained at pH4 exhibited strong activity with an MIC of 78.1 $\mu\text{g/ml}$ for both *Escherichia coli* and *Candida utilis* microorganisms. We evidenced the influence of water pH on the chemical composition of essential oils obtained by hydrodistillation, as well as its importance as a parameter in studies using the hydrodistillation method.

Keywords: *Escherichia coli*; Phenylpropanoid, Piperaceae; Hydrodistillation.

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar posibles variaciones en la composición química y la actividad antimicrobiana de los aceites esenciales de hojas de *Piper marginatum* obtenidos por hidrodestilación con pH4, pH7 y pH10. La comparación indicó que los perfiles químicos de los tres aceites eran diferentes. Se observó una reducción de los principales fenilpropanoides, *Z*-Asarona, dilapiol y *E*-asarona, en las muestras pH4-EO y pH10-EO comparadas con la muestra pH7-EO. Los sesquiterpenos macrocarpeno (10,8 %), viridiflorene (9,1 %), cariofileno (7,7 %) y *E*-nerolidol (6,5 %) fueron los principales compuestos detectados en la muestra pH10-EO. El compuesto α -santonina (36,1 %) fue el componente principal del aceite esencial obtenido con pH 4. La actividad antimicrobiana de los aceites esenciales también mostró variaciones en los valores de la concentración mínima inhibitoria (CMI). El aceite obtenido con pH4 exhibió una fuerte actividad, con una CMI de 78,1 $\mu\text{g/ml}$ tanto para *Escherichia coli* como para *Candida utilis*. El estudio mostró la influencia del pH del agua en la composición química de los aceites esenciales obtenidos por hidrodestilación y la importancia del pH del agua como un parámetro que debe especificarse en los estudios que utilizan el método de hidrodestilación.

Palabras clave: *Escherichia coli*; Fenilpropanoide; Piperaceae; Hidrodestilación.

Citation: de Oliveira EC, Fontes Silva MF, Souza Ramos C. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil from *Piper marginatum* leaves obtained by hydrodistillation in pH4, pH7 and pH10. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(181):1002-1009, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1736>

Editor: Luis Fernando Echeverri

***Corresponding autor:**
Clécio Souza Ramos;
clecio.ramos@ufrpe.com

Received: July 28, 2022

Accepted: October 18, 2022

Published on line: November 17, 2022



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

Introduction

Piper marginatum is a medicinal plant from the Piperaceae family widely distributed in the Amazon rainforest and popularly known as *capeba*, *malvarisco*, pepper-do-mato, *nhandi*, *nhandú*, or pepper-of-the-Indians (Andrade *et al.*, 2008). It is commonly used in infusions against gastrointestinal and liver diseases and snake and insect bites (Hurtado *et al.*, 2016; Chaves & Santos, 2002). Chemical studies of *P. marginatum* have revealed that the plant tissues accumulate amides, prenylated benzoic acids, flavonoids, phenylpropanoids, and aristolactams (Reigada *et al.*, 2007). In previous studies with essential oils from *P. marginatum* leaves, terpenes and phenylpropanoids have been detected and shown to have antioxidant, leishmanicidal, larvicidal, and antifungal activities (Brú & Guzman, 2016; Moraes *et al.*, 2014). Essential oils are usually obtained by hydrodistillation by crushing the plant in water and heating it in a Clevenger apparatus (Lima *et al.*, 2021; Melo-Guerrero *et al.*, 2020). The hydrodistillation of essential oils can cause the loss and degradation of certain volatile compounds due to the long extraction times by thermal or hydrolytic effect (Elyemni *et al.*, 2019). There are many advanced and innovative methods for obtaining essential oils with optimized extraction times and temperatures besides reduced artifacts and the loss of polar molecules, but hydrodistillation remains the simplest and oldest method used to obtain essential oils (El Asbahani *et al.*, 2015). In our study, we aimed at obtaining essential oils from *P. marginatum* leaves by hydrodistillation and pH control of the decoction water to evaluate possible variations in the chemical composition and antimicrobial activity.

Materials and methods

Botanical material

Leaves of *P. marginatum* specimens were collected on March 2019 from a fragment of forest located in the city of Recife, state of Pernambuco, Brazil. The species was identified by Dr. Margareth F. de Sales of the Department of Biology of the Federal Rural University of Pernambuco and compared with a voucher specimen previously deposited in the Vasconcelos Sobrinho Herbarium of UFRPE with the number 48210 (Ramos *et al.*, 2022a).

Obtention of essential oils

For each oil sample obtained, 500 g of fresh leaves of *P. marginatum* were crushed and submitted to hydrodistillation in a modified Clevenger apparatus for 2 h. To obtain the oil in a basic medium, the decoction water was adjusted to pH 10.0 using a 0.1 molL⁻¹ sodium hydroxide solution. To obtain the oil in an acidic medium, the decoction water was adjusted to pH 4.0 using a 0.1 molL⁻¹ sulfuric acid solution. To obtain the oil in a neutral medium, distilled water was used (pH 7.01). The oils were treated with anhydrous sodium sulfate and stored at ±5 °C for further analysis.

Essential oils analysis

Oil samples were analyzed using a Hewlett–Packard 5890 Series II GC chromatograph equipped with a flame ionization detector and a J & W Scientific DB-5 fused silica capillary column (30 m × 0.25 mm i.d.) with a programmed temperature of 60 to 246 °C at 3 °C/min. The temperatures of the injector and the detector were 260 and 280 °C, respectively. Hydrogen was used as carrier gas at a flow rate of 1.0 mL/min; injection was in split mode (1:30) and the injection volume was 1.0 µL of a solution containing 10 mg/mL of oil in hexane. The amount of each compound was calculated from GC peak areas in the order of DB-5 column elution and expressed as a relative percentage of the total area of the chromatograms.

Chemical identification

Oil samples were analyzed using a Varian GC/MS (GC: Varian 431/GC-MS: Varian 220-MS) system operating in the EI mode at 70 eV equipped with a J & W Scientific DB-5 fused silica capillary column (30 m × 0.25 mm i.d.) and a programmed temperature of

60 to 246 °C by 3° C/min. The temperatures of the injector and the detector were 260 and 280° C, respectively. The carrier gas was helium, the flow rate was 1 mL/min, and we used the split mode (1:30) with an injected volume of 1.0 µL of a solution containing 3 mg/mL of oil in hexane. The initial identification of the separated components of the essential oil was done by comparing with previously reported values of retention indices obtained by co-injection of oil samples and C11–C24 linear hydrocarbons and calculated using the Van den Dool & Kratz equation (Van den Dool & Kratz, 1963). Subsequently, the MS acquired for each component was matched with those stored in the Wiley/NBS mass spectral library of the GC–MS system and with other published mass spectral data (Adams, 2007). Terpenes (β -pinene, γ -terpinene, *E*-nerolidol, caryophyllene α -humulene, and α -pinene,) and phenylpropanoids (*Z*-asarone and *E*-asarone) purchased from Sigma-Aldrich, Brazil, were used to identify the volatile components. Dillapiole was previously obtained from *Piper aduncum* leaves essential oil (91.0 %) (Ramos *et al.*, 2022b). All analyses were carried out in triplicate.

Antimicrobial activity

We analyzed this material to evaluate the antimicrobial activity against *Staphylococcus aureus* (02), *Escherichia coli* (86), *Bacillus subtilis* (86) bacteria, and *Candida utilis* (1006) and *Candida albicans* (1009) yeasts. We used Saubouraud liquid culture media for yeasts and Mueller Hinton liquid medium for bacteria. The microplates were grown at 37 °C for 24 h for bacteria and at 30 °C for 72 h for yeasts. After the incubation period, the microplates were treated by adding 10 µL of a 0.01 % resazurin solution and incubated for 3 h. The MIC was defined as the lowest concentration of the samples that inhibited the growth of the microorganism, with the final concentration fluctuating between 2.5 and 2500 µg/mL (Ramos & Bezerra, 2021). Metronidazole was used as a positive control for bacteria and fluconazole for yeasts.

Results and discussion

The yield values of essential oils obtained from *P. marginatum* leaves in neutral (pH7-EO), acidic (pH4-EO), and basic (pH10-EO) mediums were 0.13, 0.06, and 0.12 %, respectively. Analysis by gas chromatography revealed qualitative and quantitative variations in the chemical profiles of the three samples (Figure 1). We identified a total of 37 compounds: 13 in the pH4-EO samples; 16 in the pH7-EO samples, and 17 compounds in the pH10-EO samples, which corresponded to 72.5 %, 93.0 %, and 69.9 % of the total chemical composition of each oil, respectively (Table 1). In the pH7-EO samples, we found monoterpenes, sesquiterpenes, and aromatic compounds, predominantly, phenylpropanoids such as *Z*-asarone (18.2 %), *E*-asarone (15.1%), dillapiole (13.0%) and croweacin (6.0%). The sesquiterpenes macrocarpene (10.8 %), viridiflorene (9.1 %), caryophyllene (7.7 %), and *E*-nerolidol (6.5 %) were the major compounds identified in the pH10-EO samples.

The pH4-EO samples showed the greatest difference between the three oils analyzed; α -santonin sesquiterpene (36.1%) was the major compound and *E*-asarone was the only one present in the three oils. In an aqueous acidic medium, unsaturated terpenes undergo cyclization, hydration, and rearrangement reactions with the formation of carbocation intermediate resulting in mixtures of products similar to those obtained in mediums with neutral pH. Eleven compounds were found only in pH4-EO samples: six of them were identified as oxygenated terpenes and two as non-oxygenated. The six oxygenated terpenes were probably products of the hydration reaction that took place during the process to obtain the oil. In the pH4-EO samples, two carboxylic acids not found in pH7-EO and pH10-EO samples were also identified. The identification of carboxylic acids from essential oils obtained in an acidic medium was expected since the carboxyl groups are protonated while in a basic medium, carboxylates, which have an affinity for the aqueous phase, form.

A quantitative reduction of phenylpropanoids was observed for samples pH4-EO and pH10-EO when compared to sample pH7-EO. The reduction of phenylpropanoids probably occurs due to the oxidative degradation of *Z*-asarone, dillapiole, *E*-asarone, and exalatacin

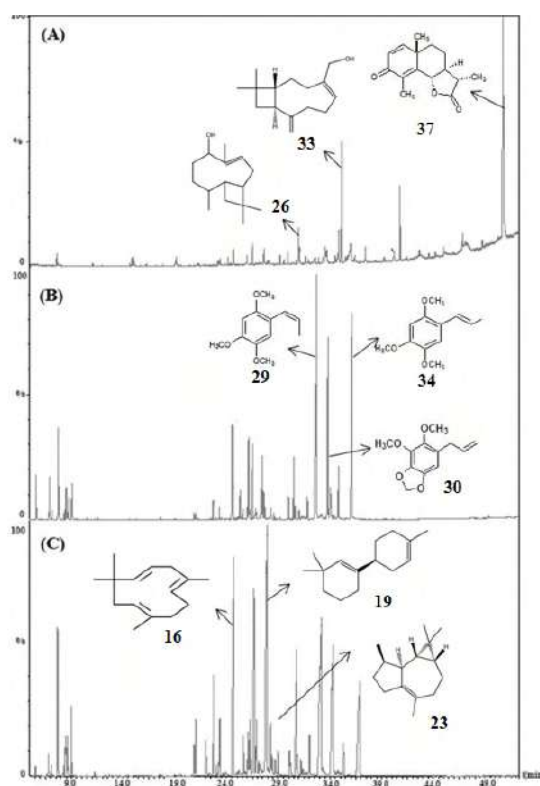


Figure 1. Chemical profiles by GC/MS of essential oils obtained from *P. marginatum* leaves in pH4 (A), pH7 (B), and pH10 (C)

containing allylic and vinylic groups that are susceptible to oxidation in a basic or acidic medium overheating (Turek & Stintzing, 2013), and to the formation of phenylpropanoid dimers, which are non-volatile compounds.

Previous studies with essential oil obtained from the leaves of allopatric species of *P. marginatum* have revealed great variability in the chemical composition with anethole (45.9%), isosafrole (37.3%), *E*-asarone (32.6%), *Z*-asarone (30.4%), anisaldehyde (22.0%), and notosiranol (22.7%) presence, which points to the possibility of having more than seven chemotypes for *P. marginatum* leaves essential oil (Macêdo *et al.*, 2020; Ayres *et al.*, 2021; Hurtado *et al.*, 2016; Vogler *et al.*, 2006). However, this is the first report of α -santonin sesquiterpene identification in the Piperaceae species. The proposed biosynthetic route for the α -santonin involves a sequence of cyclization reactions, rearrangements, and oxidation of germacrene from farnesyl diphosphate (De Kraker *et al.*, 2001), reactions that can be favored in basic or acidic solutions. Forty compounds were identified in essential oils obtained from *P. marginatum* leaves, stems, and inflorescences including germacrene (Autran *et al.*, 2009), a central intermediate in the biosynthesis of several sesquiterpenes (Xu & Dickschat, 2020). A new method developed to obtain and simultaneously fractionate essential oils by hydrodistillation allowed the obtention of qualitatively and quantitatively different chemical profiles of essential oils from *P. marginatum* (Ramos *et al.*, 2022b). The variation in the chemical composition of the essential oil in a plant species is usually attributed to biotic and abiotic factors such as herbivory, climate, and soil composition, but the parameters of the method used to obtain the oil are usually neglected (Afshar *et al.*, 2021; Vafadar *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2016; Paolini *et al.*, 2010). Most studies available in the literature use hydrodistillation to obtain essential oils from plants but do not provide information on the control or specification of the water pH used to obtain the oil. The compounds commonly identified in essential oils obtained from plants

Table 1. Chemical composition of essential oils obtained from *P. marginatum* leaves in neutral (pH7-EO), acidic (pH4-EO) and basic (pH10-EO) mediums

Compounds	IR ^a	pH4-EO		pH7-EO		pH10-EO	
		IR ^b	%	IR ^b	%	IR ^b	%
1. α -pinene	926	-	-	932	3.4	935	1.8
2. β -pinene	973	-	-	974	3.8	970	1.1
3. β -phellandrene	1025	-	-	1029	6.8	1026	5.0
4. 5-methylhexanoic acid	1033	1029	1.7	-	-	-	-
5. <i>E</i> -ocimene	1044	-	-	1040	2.6	-	-
6. γ -terpinene	1054	-	-	-	-	1050	2.4
7. <i>p</i> -methylacetophenone	1179	1185	2.3	-	-	-	-
8. Nonanoic acid	1267	1282	2.4	-	-	-	-
9. β -elemene	1334	-	-	-	-	1333	2.4
10. δ -elemene	1335	-	-	1334	1.0	1336	1.4
11. β -bourbonene	1387	-	-	-	-	1385	3.0
12. Caryophyllene	1417	-	-	-	-	1415	7.7
13. 4,8- β -epoxi-caryophyllene	1423	1408	3.4	-	-	-	-
14. Aromadendrene	1434	-	-	1439	2.1	-	-
15. Metilisoegenol	1451	-	-	-	-	1447	2.1
16. α -humulene	1452	-	-	-	-	1451	2.0
17. Croweacin	1457	-	-	1453	6.0	-	-
18. Ishwane	1465	1452	2.6	-	-	-	-
19. Macrocarpene	1470	-	-	-	-	1473	10.8
20. α -amorphene	1483	-	-	1478	7.3	-	-
21. Himachalene	1481	-	-	1481	2.1	-	-
22. Methyl isoegenol	1491	-	-	1495	1.1	-	-
23. Viridiflorene	1496	-	-	-	-	1493	9.1
24. <i>E</i> - γ -bisabolene	1529	1536	3.2	-	-	-	-
25. <i>E</i> -nerolidol	1561	-	-	1558	4.7	1459	6.5
26. Caryophyllene alcohol	1570	1560	4.3	-	-	-	-
27. Carotol	1594	-	-	1592	1.9	-	-
28. Guaiol	1600	-	-	-	-	1596	4.5
29. <i>Z</i> -asarone	1616	-	-	1616	18.2	1615	1.8
30. Dillapiole	1620	1626	1.7	1630	13.0	-	-
31. 4,6-dimethoxy-5-vinyl-1,2-benzodioxide	1653	-	-	1658	3.9	-	-
32. Exalatacin	1655	-	-	-	-	1655	3.2
33. 14-hydroxy-9-epi-(<i>E</i>)-caryophyllene	1668	1659	8.5	-	-	-	-
34. <i>E</i> -asarone	1675	1679	3.6	1679	15.1	1672	5.1
35. <i>Z</i> -ligustilide	1734	1726	1.8	-	-	-	-
36. 1-docosene	2189	2190	0.9	-	-	-	-
37. α -santonin	2202	2192	36.1	-	-	-	-
Monoterpenes			-		16.6		10.3
Sesquiterpenes			58.1		19.1		47.4
Aromatics			7.6		57.3		12.2
Others			6.8		-		-
Total			72.5		93.0		69.9

^a Linear retention indices from the literature (Adams, 2007); ^b Retention indices calculated from retention times in relation to those of the n-alkanes series on a 30 m DB-5 capillary column

Table 2. MIC values for essential oils obtained from *P. marginatum* leaves in neutral (pH7-EO), acidic (pH4-EO), and basic (pH10-EO) mediums

Microorganisms	MIC values expressed in µg/mL				
	pH4-EO	pH10-EO	pH7-EO	Metronidazole	Fluconazole
<i>B. subtilis</i>	625	2500	2500	2500	-
<i>E. coli</i>	78.1	2500	2500	78.1	-
<i>S. aureus</i>	625	2500	2500	19.5	-
<i>C. albicans</i>	312.5	1250	2500	-	2500
<i>C. utilis</i>	78.1	625	625	-	2.5

are monoterpenes, sesquiterpenes, phenolics, phenylpropanoics, and heterocyclics, which contain various chemical groups of alcohols, ketones, aldehydes, carboxylic acids, esters, and acetates. These compounds in an aqueous base or acid medium under heating can undergo cyclization, hydrogenation, hydration, and dehydration reactions resulting in variations in the chemical composition of the essential oil (Turek & Stintzing, 2013).

Additionally, the antimicrobial potential of essential oils obtained at different pH values also exhibited variation in CMI values against bacteria and yeasts. Our results showed that the pH4-EO oil exhibited greater activity against the gram-negative bacteria *E. coli*, with a MIC of 78.1 µg/ml, while for the yeasts *C. albicans* and *C. utilis* the MIC was 312 µg/ml and 78.1 µg/ml, respectively (Table 2). The strong antimicrobial activity observed for the pH4-EO sample may be associated with the presence of the major compound α -santonin, a sesquiterpene that has been used as an effective drug against infectious diseases caused by worms, which was first isolated from the flower bud of *Artemisia santonica* (Wang et al., 2019). Activity for the pH4-EO sample can also be attributed to the presence of 5-methylhexanoic and nonanoic acids as oils rich in short-chain fatty acids exhibit strong antimicrobial activity (Holanda et al., 2020). The activities of the pH7-EO and pH10-EO samples were considered moderate to weak for all microorganisms tested, with a MIC that varied between 625 µg/ml and 2500 µg/ml for both oils.

Previously, the essential oil from *P. marginatum* leaves containing *E*-nerolidol, *O*-cymene, spathulenol, elemicin, and α -copaene as major compounds showed antimicrobial activity (dos Santos et al., 2021).

Conclusion

Our results showed the effect of varying the pH of the water used in the hydrodistillation on the composition and antimicrobial activity of essential oils from *P. marginatum* leaves. The compounds identified in the samples pH4-EO, pH7-EO, and pH10-EO evidenced intermediates and biosynthetic pathways in common, which indicates that the variations in the chemical profiles observed among these three samples were due to the variations in pH values. Our results also revealed the importance of water pH as a parameter that should be considered in future studies to obtain essential oils by the hydrodistillation method.

Acknowledgments

This study received grants from PRPPG/UFRPE, E.C.O and MFFS. We want to thank UFRPE and FACEPE for providing a scholarship and Centro de Apoio a Pesquisa (CENAPESQ), UFRPE, for the laboratory facilities.

Authors' contribution

E.C Oliveira and M.F.F. Silva: Formal analysis and investigation; Ramos, C. S.: Conceptualization, data visualization, writing, editing, and supervision.

Conflicts of interest

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

References

- Adams, R.P. (2007). Identification of essential oil components by gas chromatography/ quadrupole mass spectroscopy. Allured Publishing Corporation. Carol Stream. Illinois. 468 p.
- Afshar, M., Najafian, S., Radi, M. (2021). The effect of harvest time on the natural product of *Rosmarinus officinalis* L. from South Iran (Fars province), *Natural Product Research*, 11, 1-6.
- Andrade, E.H.A., Carreira, L.M.M., da Silva M.H.L., da Silva, J.D, Bastos, C.N., Sousa, P.J.C., Maia, J.G.S. (2008). Variability in essential-oil composition of *Piper marginatum* sensu lato. *Chemistry & Biodiversity*, 5(1), 197-208.
- Autran, E.S., Neves, I.A., Da Silva, C.S.B., Santos, G.K.N., Da Câmara, C.A.G., Navarro, D.M.A.F. (2009). Chemical composition, oviposition deterrent and larvicidal activities against *Aedes aegypti* of essential oils from *Piper marginatum* Jacq. (Piperaceae). *Bioresource Technology*, 100(7), 2284-2288.
- Ayres, V.F., Oliveira, M.R., Baldin, E., Correa, G.M., Guimaraes, A.C., Takeara, R. (2020). Chemical composition and insecticidal activity of the essential oils of *Piper marginatum*, *Piper callosum* and *Vitex agnus-castus*. *Anal. da Academia Brasileira de Ciências*, 93(3), 1-11.
- Brú, J., Guzman, J.D. (2016). Folk medicine, phytochemistry and pharmacological application of *Piper marginatum*. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 26, 767-779.
- Chaves, C.M.O., Santos, B.V.O. (2002). Constituents from *Piper marginatum* fruits. *Fitoterapia* 73(6), 547-549.
- de Kraker, J.W., Franssen, M.C., Dalm, M.C., de Groot, A., Bouwmeester, H.J. (2001). Biosynthesis of germacrene A carboxylic acid in chicory roots. Demonstration of a cytochrome P450 (+)-germacrene a hydroxylase and NADP+-dependent sesquiterpenoid dehydrogenase (s) involved in sesquiterpene lactone biosynthesis. *Plant Physiology*, 125(4), 1930-1940.
- dos Santos, A.L.M., Araújo, F.A.M., da Silva Matisui, É., da Costa, L.A.M.A., Macedo, A. J., de Lucena, J.M.V.M. (2021). Antimicrobial and antibiofilm properties of essential oils from *Piper marginatum* Jacq. *Research, Society and Development*, 10(11), e514101119967-e514101119967.
- El Asbahani, A., Miladi, K., Badri, W., Sala, M., Addi, E.H.A., Casabianca, H., El Mousadik, A., Hartmaan, D., Jilale, A., Renaud, R.N.R., Elaissari, A. (2015). Essential oils: From extraction to encapsulation. *International Journal of Pharmaceutics*, 483(1-2), 220-243.
- Elyemni, M., Louaste, B., Nechad, I., Elkamli, T., Bouia, A., Taleb, M., Chaouch, M., Eloutassi, N. (2019). Extraction of essential oils of *Rosmarinus officinalis* L. by two different methods: Hydrodistillation and microwave assisted hydrodistillation. *The Scientific World Journal*, 1-6.
- Holanda, L., Bezerra, G. B., Ramos, C.S. (2020). Potent antifungal activity of essential oil from *Morinda Citrifolia* fruits rich in short-chain fatty acids. *International Journal of Fruit Science*, 20(sup2), S448-S454.
- Hurtado, F.H., Lima, R.A., Teixeira, L.F., Silva, S.C.F.F., Azevedo, M.S., Facundo, V.M.A. (2016). Antioxidant activity and characterization of the essential oil from the roots of *Piper marginatum* Jacq. *Ciência e Natura*, 38(3), 1504-1511
- Lima, T.A.A.C., Cunha, L.P., da Silva Ribeiro, J.E.L., Marques, M.O.M., da Paz Lima, M. (2021). Evaluation of volatile constituents, exudation of resin and occurrence of galls of *Protium aracouchini* (Aubl.) Marchand. *Acta Brasiliensis*, 5(3), 88-91.
- Macêdo, C.G., Fonseca, M.Y.N., Caldeira, A.D., Castro, S.P., Pacienza-Lima, W., Borsodi, M.P.G., Castro, K.C.F. 2020. Leishmanicidal activity of *Piper marginatum* Jacq. from Santarém-PA against *Leishmania amazonensis*. *Experimental Parasitology*, 210, 107847.
- Moraes, M.M., da Silva, T.M., da Silva, R.R., Ramos, C.S., da Câmara, C.A. (2014). Circadian variation of essential oil from *Piper marginatum* Jacq. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 13(3), 270-277.
- Paolini, J. Barboni, T. Desjobert, J. M. Djabou, N. Muselli, A., Costa, J. (2010). Chemical composition, intraspecific variation and seasonal variation in essential oils of *Calendula arvensis* L. *Biochemical Systematics Ecology*, 38(5), 865-874.
- Ramos, C.S., da Silva, R.R., Silva, M.F.F. (2022a). Isomerization of (Z)-asarone to (E)-asarone from *Piper marginatum* leaves by the *Quadrus u-lucida* larvae. *Phytochemical Letters*, 47, 164-167.

- Ramos, C.S., dos Santos, D.N.A., Monteiro, L.L., Claudino, J.P.A.D.A., Silva, M.F.F.** (2022b). Use of hydrodistillation to obtain and fractionate essential oils simultaneously. *Brazilian Journal of Analytical Chemistry*, 17, 2179-3425
- Ramos, C.S. & Bezerra, G.B.** (2021). Perfil químico biomonitorado das folhas de *Piper marginatum* durante a ontogenia. *Revista Virtual de Química*, 13(1), 1-10.
- Reigada, J.B., Tcacenco, C.M., Andrade, L.H., Kato, M.J., Porto, A.L., Lago, J.H.G.** (2007). Chemical constituents from *Piper marginatum* Jacq. (Piperaceae) antifungal activities and kinetic resolution of (*R,S*)-marginatumol by *Candida antarctica* lipase (Novozym 435). *Tetrahedron Asymmetry*, 18(9), 1054-1058.
- Melo-Guerrero, M.C., Ortiz-Jurado, D.E., Hurtado-Benavides, A.M.** (2020). Comparison of the composition and antioxidant activity of the chamomile essential oil (*Matricaria chamomilla* L.) obtained by supercritical fluids extraction and other green techniques. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(172), 845-856.
- Silva, A.M. Silva, J.V., Almeida, A., Ramos, C.S.** (2016). Herbivory causes chemical and biological changes on essential oil from *Piper marginatum* leaves. *The Natural Product Journal*, 6(4), 313-317.
- Turek, C. & Stintzing, F.C.** (2013). Stability of essential oils: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(1), 40-53.
- Vafadar, S.Z., Rahimmalek, M., Sabzalian, M.R., Hosseini, H.** (2017). Essential oil and bioactive compounds variation in myrtle (*Myrtus communis* L.) as affected by seasonal variation and salt stress. *Chemistry and Biodiversity*, 14(4), e1600365.
- Van Den Dool, H. & Kratz, P.D.** (1963). A Generalization of the Retention Index System Including Linear Temperature Programmed Gas-Liquid Partition Chromatography. *Journal of Chromatographic A*, 11, 463-471.
- Vogler, B., Noletto, J.A., Haber, W.A., Setzer, W.N.** (2006). Chemical constituents of the essential oils of three *Piper* species from Monteverde, Costa Rica. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 9(3), 230-238.
- Xu, H. & Dickschat, J.S.** (2020). Germacrene A—A central intermediate in sesquiterpene biosynthesis. *Chemistry—A European Journal*, 26(72), 17318-17341.
- Wang, J., Su, S., Zhang, S., Zhai, S., Sheng, R., Wu, W., Guo, R.** (2019). Structure-activity relationship and synthetic methodologies of α -santonin derivatives with diverse bioactivities: A mini-review. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 175, 215-233.

Essay

The pioneering scientific endeavor and contributions of José María González Benito (1843-1903), the first Colombian modern astronomer

Los esfuerzos y aportes científicos de José María González Benito (1843-1903), el primer astrónomo moderno colombiano

Freddy Moreno-Cárdenas¹, Santiago Vargas-Domínguez^{2,*}, Jorge Cuéllar-Moyano¹

¹ Centro de Estudios Astrofísicos (CEAF), Gimnasio Campestre, Bogotá, Colombia

² Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Abstract

Astronomical interest within the current Colombian territory has its roots in the Botanical Expedition of the New Kingdom of Granada (1783-1813), which stimulated the creation of an astronomical observatory in 1803, the first one established in the New World to pursue systematic observations and meteorological studies. After the death in 1816 of its first director, Francisco José de Caldas (1768-1816), during the convulsive independence period, no major astronomical observations were made for decades, with few exceptions. In this work, we delve into the contributions of the astronomer José María González Benito (1843-1903), the main reactivator of the *Observatorio Astronómico Nacional de Colombia* in the second half of the 19th century focusing on his pioneering efforts that draw worldwide attention to the national observatory and to his own private observatory. González Benito stands out as one of the figures most committed to the development of astronomy in the country and the most renowned Colombian in the international astronomical research scene of his time.

Keywords: José María González Benito; *Observatorio Astronómico Nacional de Colombia*; Flammarion Observatory; 19th century; Comets; Mars.

Resumen

El interés astronómico en el actual territorio colombiano tiene sus raíces en la Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada (1783-1813), en cuyo marco se impulsó la creación de un observatorio astronómico en 1803, el primero establecido en el Nuevo Mundo para realizar observaciones sistemáticas y estudios meteorológicos. Tras la muerte en 1816 de su primer director, Francisco José de Caldas (1768-1816), en medio del convulso período independentista, no hubo grandes observaciones astronómicas durante décadas, salvo contadas excepciones. En este ensayo profundizamos en los aportes del astrónomo colombiano José María González Benito (1843-1903), principal reactivador del Observatorio Astronómico Nacional de Colombia en la segunda mitad del siglo XIX, destacando sus esfuerzos pioneros, los cuales volcaron la atención mundial sobre esta instalación astronómica y sobre su observatorio privado. González Benito sobresale como una de las figuras más comprometidas con el desarrollo de la astronomía en el país por su impulso a un campo hasta entonces considerado localmente apenas como una herramienta práctica en tareas de ingeniería como la cartografía. Exponemos, así, las razones para considerar a González Benito como el colombiano más destacado en el panorama de la investigación astronómica internacional de su época.

Palabras clave: José María González Benito; Observatorio Astronómico Nacional de Colombia; Observatorio Flammarion; Siglo XIX; Cometas; Marte.

Citation: Moreno-Cárdenas F, Vargas-Domínguez S, Cuéllar-Moyano J. The pioneering scientific endeavor and contributions of José María González Benito (1843-1903), the first Colombian modern astronomer. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 46(181):1010-1027, octubre-diciembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1795>

Editor: Alberto Gómez

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

Received: October 17, 2022

Accepted: November 18, 2022

Published on line: December 12, 2022



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

Introduction

In the second half of the 19th century, the figure of the Colombian astronomer José María González Benito (1843-1903), hereafter JMGB, is inescapably connected with a large number of works of paramount relevance for the advancement of national science. His great capability to get involved in ideas and projects of various kinds is reflected in a long list of contributions that transcended purely scientific domains and transformed the social and cultural environment of his time. Besides the noteworthy scientific contributions of JMGB in astronomy, which are the main focus of this work, his pioneering contributions in other scientific areas should be considered. In 1871, he pioneered the teaching of stratigraphy in the geology and paleontology courses that he led at the *Escuela de Ciencias Naturales* (School of Natural Sciences) at *Universidad Nacional de Colombia*. His curiosity also led to his interest on bacteriology and microphotography. Since 1895, JMGB alternated his lectures on this subject and on solar physics at the *Instituto Politécnico*. This initiative arose during a meeting with several academics at JMGB's house in 1893 to establish a scientific center to support the study of new branches of human knowledge in the country; later, this private institution would become *Instituto Colombia*. His studies on the microcosm are currently lost. However, it has been established that he used state-of-the-art imported microscopes to undertake studies of great practical utility which he communicated to the local *Academia de Medicina* (Academy of Medicine), formerly known as *Sociedad de Medicina y Ciencias Naturales de Bogotá*, placing him as a national leader in this branch of knowledge.

Our essay is the first using the information from JMGB's autobiography, a manuscript lost for more than a century that was accidentally found in 2018 and transcribed by Armando Martínez Garnica and Ramón García Piment (**González, 2018**). This material is complemented by the biographical description written by **Sánchez (1906)** and **Arias de Greiff (1993)**, among other multiple references and information from national and international historical manuscripts and other sources.

Focusing on JMGB's passion for the cosmos and after reviewing the material that reveals his motivations and contributions to solving decisive astronomy problems of his time, his expertise with instrumentation, and his countless efforts to get involved in fundamental astronomy research, we dare to assert that JMGB is the first Colombian modern astronomer (what we now call an astrophysicist with vast technical and theoretical knowledge), as also acknowledged by other present-day astronomers (**Portilla, 2017**). Besides his purely scientific interest, JMGB was well aware of the importance of popularizing science among the general public. In this sense, as a member of the *Sociedad de la Luz* (Society of Light) at the *Instituto de Artes y Oficios* (Institute of Arts and Crafts) created in 1872 in Bogotá, he displayed countless efforts to spread useful knowledge for the country through his articles about astronomical phenomena in newspapers (e.g., *La Ilustración*) and by motivating others to do so.

Historically, JMGB is mainly recognized for his role as the director of the *Observatorio Astronómico Nacional de Colombia* (OAN) for several periods between 1868 and 1891. During this time, the Observatory fully achieved the goal set at its creation: to carry out continuous astronomical observations with scientific rigor. JMGB did not hesitate to spend his own capital to adequate the premises of the OAN and to acquire sophisticated instrumentation, clear evidence of his commitment to the development of Colombian astronomy.

The OAN was founded in 1803 in Bogotá (**Figure 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>), in the framework of the *Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada* (Botanical Expedition in New Granada) led by the Spanish physician José Celestino Mutis (1732-1808). In the first decades of the 19th century, the Observatory was mainly devoted to meteorological studies and astronomical observations related to cartography (**Bateman, 1954**; **Arias de Greiff, 1993**). Its first director was Francisco José de Caldas (1768-1816), who was shot by the royalists in 1816, during the fight for independence from the Spanish Crown (**Portilla, 2020**). Due to the many adverse

political and social circumstances surrounding the observatory that limited its administration and use, no major astronomical observations were made in the following years, with a few exceptions (Urcochea, 1860; Torres-Sánchez & Salazar Hurtado, 2002).

Here we rescue and compile some of the most remarkable and innovative activities pursued by JMGB, including those related to his role as director of the OAN, an institution he reactivated in the second half of the 19th century. We also highlight the personal astronomy projects that he carried out in his private observatory.

The scientific life of José María González Benito

The Colombian astronomer JMGB (Figure 1) was born on September 1st, 1843 in Zipaquirá, a town located 50 kilometers north of Bogotá in Colombia. From an early age, he was involved in drawing maps and surveying large salt mines around his birthplace under the supervision of Manuel Ponce de León (1829-1899), one of the founders of the *Sociedad Colombiana de Ingenieros* (Colombian Society of Engineers), who was his first prominent mentor and gave him private lessons (Sánchez, 1906; Torres-Sánchez & Salazar-Hurtado, 2002). From him, JMGB learned integral and differential calculus and physics, among other science subjects, at a time when formal education was not standardized in the country. Later, he became a young assistant of Indalecio Liévano (1834-1913), a distinguished Colombian engineer, and was able to contribute to the layout of the railway joining Zipaquirá to Nemocón via Sesquilé and Tausa (Liévano, 1875; Tisnés-Jiménez, 1956; González, 2018). JMGB's many trips to rural areas fostered his interest in geology and paleontology and took him to travel through the mountainous region from Sumapaz to Tunja (Arias de Greiff, 1993). His interest in astronomy arose in 1862 when he was appointed as Liévano's assistant when he became the director of the OAN.

In 1864, JMGB traveled to Europe, where he enrolled in the Central School of Paris and attended some courses at Sorbonne University. This allowed him to meet the famous French scientists Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877) and Jean-Baptiste Boussingault (1801-1887), among others, who further catalyzed the enthusiasm for astronomy of the young Colombian (Sánchez, 1906). When he returned to Colombia in 1866, JMGB was appointed by the government as an assistant at the *Oficina Central del Cuerpo de Ingenieros* (Central Bureau of the Corps of Engineers) and in charge of the diary of observations at the *Observatorio Astronómico de Santafé de Bogotá* (Astronomical Observatory of Santafé de Bogotá) since both places were united at the time. Two years later, JMGB became the first astronomy and meteorology teacher at the recently founded (1867) *Universidad Nacional de Colombia* (UNAL). At that same time, he was appointed by Manuel Ancízar



Figure 1. Portraits of José María González Benito. Left: Photograph of the Colombian astronomer in his 30s. Middle: Painting from 1948 hung at the OAN (photo taken by the authors). We argued that it was based on the photograph on the left. Right: Colorized photograph of the astronomer in his 50s (Sánchez, 1906)

(1812-1882), provost of the university, as the new director of the OAN. However, JMGB would not last long in this position since he decided to return to Zipaquirá, his hometown, to complete his previous and unfinished tasks: the meteorological records of the location and, most importantly, the *Carta Geológica de la Sabana de Bogotá* (Geological Chart of the Plateau of Bogotá) (**Figure 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>), that represented eight years of intense work (**Arias de Greiff**, 1993). This work deserved him an honorable mention in an outstanding event, the 1871 Exhibition of the National Industry, which was the most important in the country (**Revista Científica e Industrial**, 1871). The study was published in scientific journals in Colombia and Germany and served to establish new carbon mines in the region. That same year, he returned to the UNAL, this time as a professor of geology and paleontology, disciplines taught for the first time in the country. During his classes, he used the collection of more than 5.000 pieces of crystallography, mineralogy, geology, and paleontology samples that he had acquired in Paris, as well as other materials collected in his exploration trips. Three months later, he was notified that he had been appointed for the third time as director of the OAN and professor in charge of the master's classes in astronomy and meteorology at the UNAL School of Engineering. His meteorological observations were published in the Annals of the Observatory (1882a, 1882b, 1882c, 1882d, 1882e). Again in 1871, the *Academia de Ciencias Naturales* (Academy of Natural Sciences) was integrated by a national decree into the UNAL's School of Natural Sciences and JMGB became one of its members together with other teachers of the university. During the same period, JMGB was invited to be a member of the *Amigos de la Luz* (Friends of the Light) society whose aim was to promote the popularization of science through courses and outreach activities addressed to the general public. There he was mainly in charge of the topics related to geography and astronomy (**Sánchez**, 1906).

As for his academic work at the OAN, he resigned in 1872 due to differences with the university authorities and colleagues regarding his duties, as well as his refusal to receive a salary and his insistence on paying from his own resources the public services, cleaning, and maintenance of the OAN building and garden. However, he would return for the fourth time to be the director of the OAN that same year in September, but this time as a professor of astronomy and geodesy in the School of Engineering. Then, JMGB decided to spend some time in Europe, mainly in France and England, and his position at the OAN was covered by Luis María Lleras Triana (1842-1885), a renowned mathematician and engineer (**Arias de Greiff**, 1993). During his trip, he visited the observatories of Saint Petersburg and Moscow (**Sánchez**, 1906), and in England, the Queen approved him as consul of the United States of Colombia at Southampton (**Bulletins and Other State Intelligence**, 1874).

In Paris, JMGB's interest in deepening his scientific knowledge took him to enroll in an astronomy course given by the French astronomer Pierre Puiseux (1855-1928) and in a geology course taught by the French geologist and mineralogist Gabriel-Auguste Daubrée (1814-1896), both leading scientists of their generation. During his stay there, he established relations with European scientific institutions such as the Paris Observatory. In 1875, soon after receiving membership to the Royal Astronomical Society in London, he returned to Colombia. In 1882, he became one of the founding members of the French Astronomical Society. His last days were devoted to the creation of the Institute Colombia, where he aspired to integrate the academies of mathematics, moral and ethical sciences, and social sciences. Unfortunately, JMGB died the day before the inauguration of the Institute that was to take place in Bogotá on July 28, 1903 (**Sánchez**, 1906; **Arias de Greiff**, 1993).

His role as director of the *Observatorio Astronómico Nacional de Colombia* (OAN)

One of the first actions of JMGB at the OAN was the reconstruction of the original meridian line damaged during the country's civil wars, which he had helped to build when

he was the assistant of Indalecio Liévano in 1862 (Arias *et al.*, 1987). He was further involved in various actions to strengthen the development of the observatory infrastructure and astronomical instruments during the following half-century. He also stood out for making the OAN known in Europe from the time of his first trips to London and Paris. He established a special connection with the French astronomer Camille Flammarion (1842-1925), a major source of inspiration and information on astronomical issues, but also a close friend for the rest of his life. Flammarion highlighted many times that the OAN was located in a privileged place since it was the closest observatory to the equator, a very important advantage for observing the stars of both the Northern and the Southern hemispheres. Another advantage was its altitude at over 2600 m.a.s.l., which meant it was one of the two highest observatories in the world, an ideal location for better imaging. These qualities were published in the journal of the French Astronomical Society, specifically in the list and description of the world's observatories published in volume VIII of the *Études et lectures sur l'astronomie* with the statement "the Observatory of Bogotá is the closest to Ecuador and the highest in the world" (Flammarion, 1882).

Once in charge of the OAN and after his trips to Europe, JMGB identified the main requirements for an observatory. During the presidency of Rafael Núñez (1825-1894), he managed to obtain a generous financial budget to acquire new instrumentation and to make refurbishments in the premises including the improvement of the surroundings of the observatory with a beautiful garden (Ibáñez, 1891). During his various periods at the head of the institution between 1868 and 1892, JMGB transformed the OAN from a place with no instrumentation that lacked even a telescope into an observatory with modern equipment, a new dome, and a library, which achieved international recognition from the scientific community (Quintero, 2002).

JMGB installed a memorial plaque (Figure 3S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/1795/3323>) at the OAN on July 20, 1881, the anniversary of the country's independence (July 20, 1810), to acknowledge president Núñez's support to the reinstatement of astronomical observations in September 1880 thanks to the new instrumentation.

JMGB summarized the main objectives he proposed for the OAN (González, 1882d) in one of his statements: "Colombia would render a great service to science if the following works, considered of great importance by the scientific world, were carried out in this Observatory:"

- A catalog of the stars, a catalog of double and multiple stars, and a catalog of the nebulae and stellar groups of the Southern Hemisphere
- A continuous study of asteroids
- A special study of solar physics
- Applications of spectral analysis to the study of celestial bodies
- A sustained study on the zodiacal light
- Special selenographic studies
- Assiduous observations on the physical constitution of the planets
- Application of photography to the study of the physical constitution of the Sun, the Moon, and the planets
- A sustained study on shooting stars
- Observation of the transit of Venus in front of the solar disk.

The following are the main improvements and tasks performed by JMGB at the OAN during his periods as director:

- Construction of a movable dome
- Ordinary meteorological observations
- Acquisition of imported meteorology and astronomy equipment including an anemometer, hypsometer, spectrometers, and telescope to properly fulfill the Observatory's different functions.

- Continuous communication with European observatories in England, France, Italy, and the Vatican, and also American and even African observatories, for example, the Chapultepec Observatory and the Algiers Observatory, despite the difficulties to communicate from Bogotá (**González, 1882c**). This allowed the OAN to receive numerous publications from these observatories and keep an updated local library (**González, 1882b**).
- The creation of an OAN publication, the *Anales del Observatorio Astronómico* (Annals of the Astronomical Observatory), with six volumes published between March and November 1882.
- Due to the advances in communications, by the end of the 19th century, the need to establish a zero meridian and create time zones became evident. In this context, the OAN was invited to participate in the 1881 meeting for the adoption of the prime meridian in Washington. JMGB was unable to attend but he delegated Colombia's participation to a North American astronomer (**González, 1882a**).
- JMGB served as an academic international peer reviewer for several studies including De Large's 1895 article.

The Flammarion Observatory

During his travels in Europe, JMGB acquired astronomical instrumentation, and back in Colombia, he decided to equip a private observatory. In 1880, he received the equipment and inaugurated the *Observatorio Flammarion* (Flammarion Observatory) in Zipaquirá, his birthplace, in honor of his friend, the renowned French academic Camille Flammarion. The Flammarion Observatory housed a 1.65 m focal length telescope, a five-prism spectroscope, and many more implements such as chronometers, thermometers, microscopes, and meridian circles (**Flammarion, 1882**). However, on September 3, 1881, JMGB was appointed director of the OAN in Bogotá and he decided to move his observatory to the Los Mártires neighborhood in the capital where he set up very impressive facilities for a private observatory with all the instrumentation, a library, a gallery, and even lodging for the assistant astronomers (**Figure 2**). In May 1882, the Flammarion Observatory was inaugurated with the attendance of prominent Colombian academic figures, the ambassador of France (given that it honored a French citizen), and the Chilean ambassador (**Figure 4S**, left, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>) (**Flammarion, 1882**). Numerous French newspapers covered the event: *Le Petit Journal* (**Figure 4S**, right, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>), *Le Spectator*,

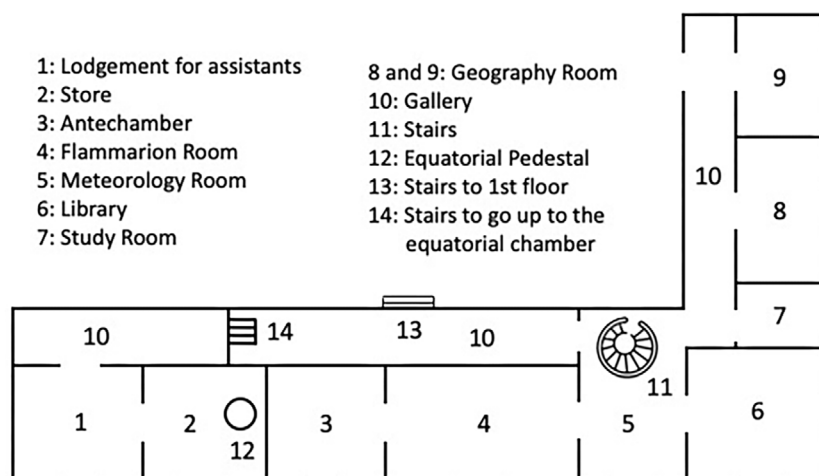


Figure 2. Sketch of the configuration of the Flammarion Observatory inaugurated in 1873 in Bogotá as designed by JMGB. The image was made by the authors based on JMGB's notes and drawings found in the repository of the *Biblioteca Nacional de Colombia*

L'Avenir de Vichy, *Journal de L'Orne*, and *Progrès* highlighting “the inauguration of the Flammarion Observatory in the United States of Colombia, very close to the equator and at a great height of 2640 m.a.s.l.”

The observatory building, however, was not the most suitable one, and JMGB began the construction of a whole new building in 1892, where the observatory would be located on the third and fourth floors. The design of this definitive location was characterized by a movable construction (rotating booth) which allowed JMGB to pursue diurnal and night observations and spectroscopy studies.

Figure 3 (top image) shows a visualization of the Flammarion Observatory as inferred from photographs that we found in photographic archives after a long search. Some were aerial photographs (lower left image) while the last image, from the late 1960s, shows the Observatory nearly a decade before the building was demolished (bottom right image). This is the first time that the view of the Flammarion Observatory is shown in an academic paper; we could not find any visual reference of the construction beside a short mention and photograph in *Revista Semana* (1951). The construction must have been a very remarkable view over the roofs of Bogotá, as shown in photographs from the 1940s and 1950s (**Figure 4**). While the works were being completed, the Flammarion Observatory operated temporarily not far from its final location. Three years later, a new

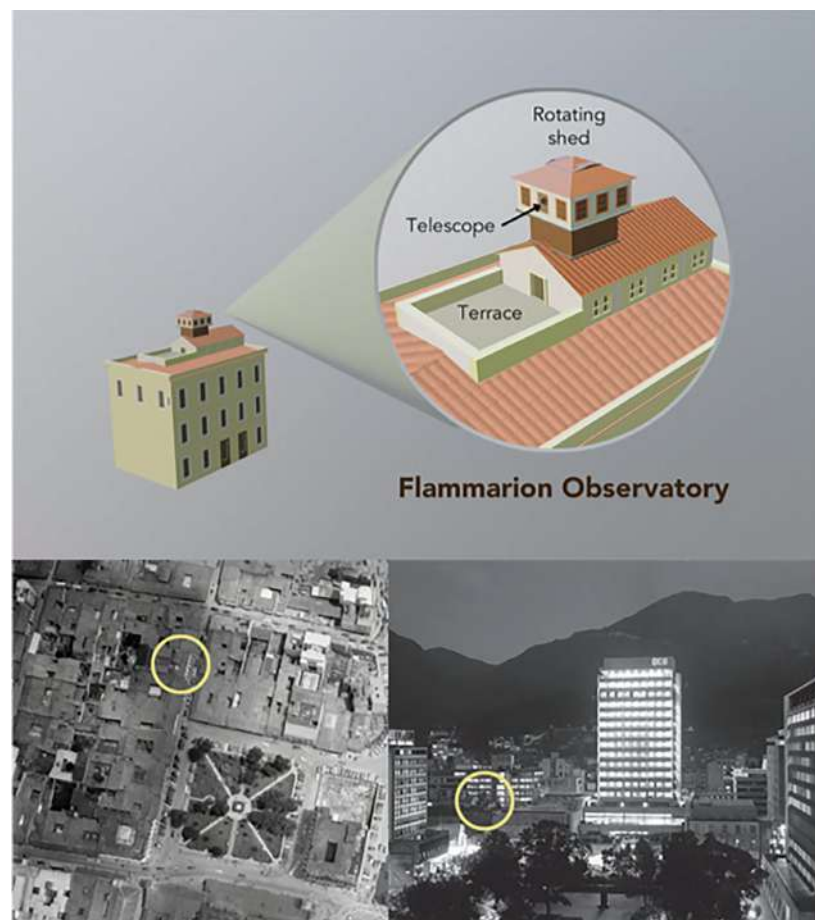


Figure 3. Flammarion Observatory. Top: A 3D sketch of the house that supported the Flammarion Observatory on its terrace made by the authors based on several historic photographs of Bogotá showing the construction from different angles including the aerial view from the 1940s (lower left image) and the last image where the observatory is recognizable from the late 1960s (lower right panel)



Figure 4. Colorized photographs of the surroundings of the Flammarion Observatory where the construction of the booth stands out raising about 20 meters above the ground. Left: Unpublished photograph of the funeral of Margarita Villaquirá, an iconic local figure known as “crazy Margarita”, which took place in January 1942. Middle: Photograph of 1951 from *Revista Semana*. Right: Photograph from the 1940s where the Flammarion Observatory is visible in the background

equatorial telescope with a larger diameter manufactured by the Secretan company in Paris was installed. From this date and during almost a decade until JMGB’s death in 1903, numerous astronomical observations were made there (see comments in the next section), as well as meteorological measurements including temperature values from 1874 to 1895 (Sánchez, 1906), directly requested by Flammarion to compare them with European records as he reported in a private communication (Flammarion, 1895) (Figure 5S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>). His interest in the further development of observational astronomy in Colombia motivated JMGB to propose to the Royal Astronomical Society the construction of another observatory at 3300 m.a.s.l. near Bogotá (Figure 6S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>) as a joint endeavor of the British government and this private Colombian initiative (MNRAS, 1874).

The Flammarion Observatory was later operated by his son-in-law, Manuel Laverde Liévano (Figure 5), but there is very little information on the observations pursued at the facilities other than some eclipse observations, for example, the annular solar eclipse observed in Bogotá on March 7, 1951, made with a 16-cm equatorial telescope and 2 m focal length (Revista Semana, 1951). As a curiosity, the Observatory had one of the first lifts in a private building in the country. In the second half of the 20th century and beyond, no mention of the facilities was made; the building was demolished in the 1980s and no written evidence of its existence was known until our findings.

Astronomical research and main scientific contributions

As we mentioned before, JMGB had a strong interest in the physical sciences in general. During his stays at the OAN, he compiled continuous records of the climate in Bogotá including maximum, minimum, and average temperatures, wind direction, cloud cover, amount of rain, day and night irradiance, and the number of meteors per hour (González, 1871). He was also very interested in geomagnetic and seismological studies for which he installed in his house in Zipaquirá instruments for magnetic and seismographic measurements, i.e., a magnetic needle to register terrestrial magnetic field variations and a seismograph. During the first days of June 1870, he noticed variations in the position of the magnetic needle preceding the occurrence of an earthquake on June 4 and reported the detection (González, 1871). At the OAN, he set up the magnetic needle on building’s roof for continuous registration of the magnetic field direction and he recorded the data in his diary of astronomical-physical observations. On August 30, 1871, he started perceiving abnormal changes in the position of the magnetic needle that pointed $0^{\circ}6'10''$ towards the East and increased in the following

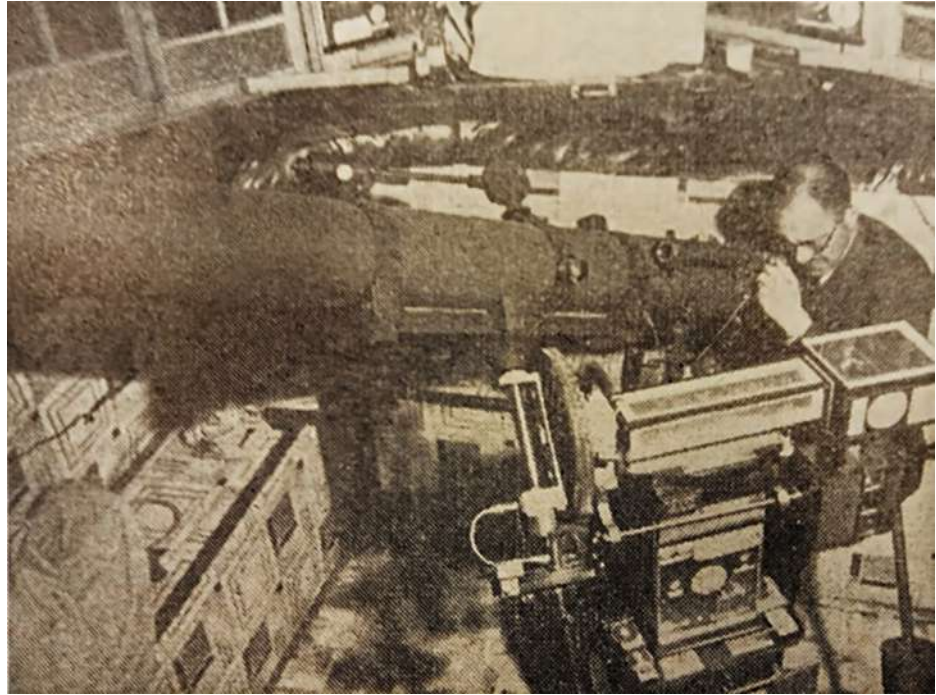


Figure 5. Photograph of the interior of the Flammarion Observatory from the 1950s. Manuel Laverde Liévano, JMGB's son-in-law, is seen observing with the main telescope and instrumentation (*Revista Semana*, 1951)

days. This reminded him of a similar detection the previous year in Zipaquirá, which made him suspect of a possible seismic movement that effectively occurred on September 7, 1871, with a duration of about 15 seconds while the magnetic needle was deviated $0^{\circ}10'50''$ towards the East, as JMGB reported (**González**, 1871).

Among JMGB's scientific interests, astronomy occupied the first place as confirmed in the following presentation of his main astronomical observations, calculations, and investigations referenced especially in international sources.

Solar observations

One of the most interesting phenomena attracting the attention of observers occurs when a planet transits in front of the solar disc. In 1881, Mercury's transit was described by **González** (1882b) as follows: "This phenomenon took place on November 7 last year, at 5 hours, 19 minutes p.m., Bogotá average time, and was observed in this Observatory under convenient conditions despite the proximity of the Sun to the horizon".

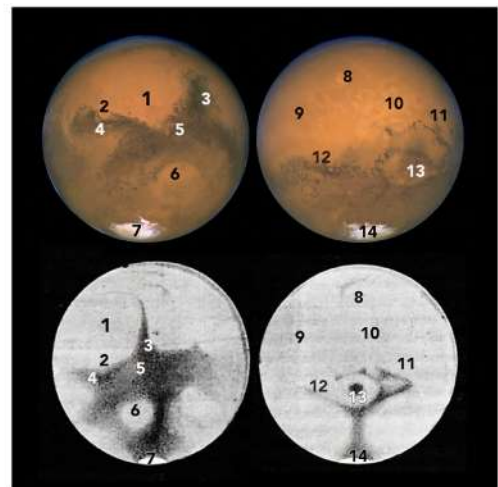
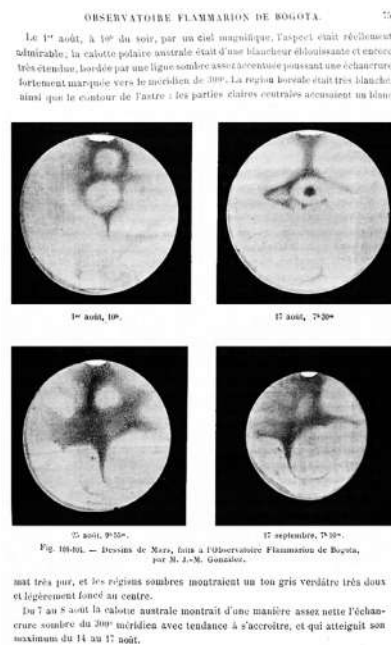
The transit of Venus had long been of interest to scientists despite being less common as it is easier to observe due to the larger size of Venus compared to Mercury. JMGB presented the ephemeris in the Annals of the Astronomical Observatory (**González**, 1882c) including the date and hours in which the transit of Venus would occur on December 6, 1882 (**Table 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>). Given the eventual poor meteorological conditions at the OAN's location in Bogotá, he established an additional observing point at the Flammarion Observatory (**González**, 1882c). The transit of Venus was finally observed in Bogotá with careful attention both at the OAN and the Flammarion observatories. Venus presented the appearance of a large cherry standing out against a greenish background (**Sánchez**, 1906). Solar observations

were a recurrent source of interest for JMGB. In 1894, his drawings of a large sunspot observed by him in August 1893 as evidence of the maximum of the solar cycle number 13 (**Figure 7S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>) were published in *L'Astronomie* (Flammarion, 1893). The caption of the corresponding image says: “Director of the Observatorio Flammarion Bogotá. Observed since its formation. Drawing of the great sunspot of August 1893”. The description of the sunspot was also included in Flammarion (1894).

Mars

In 1894, Mars opposition occurred and Flammarion requested JMGB to send him the drawings of the event he had made from his observatory in Bogotá, which were later published in 1895. The quality of JMGB’s work can be certified by these observations. At that time, he was already a well-known astronomer in Europe and kept continuous communication with his French friend and colleague. Indeed, JMGB made the observations from the Flammarion Observatory and sent 24 drawings, four of which were published in *La Planète Mars et ses Conditions d’Habitabilité* (Flammarion, 1909). Such drawings were completely unknown for the Colombian academic community until we have found them (**Figure 6**). The quality of the images drew the attention of the famous Italian astronomer Giovanni Schiaparelli (1835-1910) who used them for his research (Flammarion, 1909) (**Supplementary information, text, tables and figures**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>)

JMGB’s report was followed by a letter signed by Schiaparelli (**Figure 8S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>) commenting on the Colombian astronomer’s drawings (Flammarion, 1909): “These observations are particularly interesting given the altitude of this observatory established on the equator (4°35’48” N). At the height of 2640 m, the atmosphere is very clear. Mr. Gonzalez is a careful and sincere observer. Of the 24 drawings that the wise founder of this equatorial establishment sent, we



- | | |
|------------------------|----------------------|
| 1. Arabia Terra | 8. Olympus Mons |
| 2. Schiaparelli Crater | 9. Amazonis Planitia |
| 3. Syrtis Major | 10. Tharsis Montes |
| 4. Terra Meridiani | 11. Valles Marineris |
| 5. Huygens Crater | 12. Terra Sirenum |
| 6. Helas Basin | 13. Solis Lacus |
| 7. South Polar Cap | 14. South Polar Cap |

Figure 6. Mars observations. Left: Observations made by JMGB at the Flammarion Observatory and extracted from *La Planète Mars et ses Conditions d’Habitabilité* (Flammarion, 1895). Right: Comparison of Mars observations captured in 1999 by the Hubble Space Telescope with some of the drawings made by JMGB highlighting the main Martian features

chose four to be annexed here in our general documentation. Remarkably, the polar notch and the Main Sea (Lake Mœris) could be observed with the aid of a 108 mm telescope. As for the decrease in the red coloration of the planet with its elevation in the sky, this may be due in part to an effect of our atmosphere that acts on the coloration of the Moon and the Sun, and in part to the objective of the lens, less achromatize, perhaps, by the blue and violet rays”.

Meteor showers and meteorites

From his first contact with astronomy, JMGB had been interested in meteor showers. He observed the Leonids at dawn on November 14, 1867, and together with Liévano, OAN’s director at the time, he organized the observation of the phenomenon. To get more precise data, they contacted the *serenos*, name given to the night guards of the city before the police existed, and explained to them what was going to happen, then they trained them to annotate the number and characteristics of the observed meteors. Unaware of what was happening, some inhabitants of Bogotá thought they were witnessing the end of the world due to the impressive scene. Countless meteors were seen, so many that according to JMGB, “nothing can compare with the grandeur of the spectacle: at one and thirty minutes in the morning, time of departure from the radiant point, some shooting stars were seen, and from two to five, the number was immense, it really looked like a gigantic artificial fire that, radiating from Regulus in the constellation of Leo, spread throughout the celestial vault” (Sánchez, 1906). These observations were made both at the Flammarion Observatory in Zipaquirá and in Bogotá.

A young JMGB reported a myriad of unknown shooting stars on the night of November 24, 1872, whose origin was the constellation of Leo. These observations were published in volume V of the *Studies and readings on astronomy* (Figure 9S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>) printed in Paris (Flammarion, 1874). His work on this topic served to verify Giovanni Schiaparelli’s theory that established that the meteor showers were the result of cometary disaggregation (Flammarion, 1874). Many years later, in 1899, JMGB observed the Leonids and prepared a study explaining their origin and motivating the community to observe the phenomenon and share the data with him (Sánchez, 1906).

Concerning meteorites, JMGB wrote a detailed report of the most important event in the history of Colombia, the Meteorite of Santa Rosa de Viterbo (Flammarion, 1874), fallen in 1810 and studied by Boussingault & Rivero (1823), which was presented by Alexander von Humboldt (1769-1859) to the French scientific community the same year.

Comets

JMGB was also a virtuous and devoted comet observer; he had the advantage of being located close to the equator and, therefore, able to see comets in both hemispheres (Sánchez, 1906). During 1880, he observed a large number of comets, all visible to the naked eye, including the Great Southern Comet, also called 1880 I, Comet 1880 V (discovered by Cooper), which reached a magnitude close to 5, and Comet Hartwig (1880 III) with a magnitude of 5 to 6 (Vsekhsvyatskii, 1964). In 1881, he reported the observation of seven comets from Bogotá: Comet 1881 II, discovered by the astronomer Lewis Swift (1820-1913) from Rochester, New York; Comet 1881 III, discovered by Tebbutt from Australia, widely seen in Colombia and the most beautiful according to JMGB; the periodical Comet Encke; Comet 1881 V Barnard; Comet 1881 VI, discovered by Denning; Comet Schaeberle 1881 IV, and Comet 1881 VIII, also discovered by Swift (González, 1882b).

While directing the OAN, JMGB reported another visitor in a note addressed to the Colombian *Secretaría de Instrucción Pública* (Secretary of Public Instruction) on June 22, 1882 (González, 1882b), which reads as follows: “I have observed this afternoon at 6:30 p.m. a large comet located south of the planet Venus, not far from Procyon, where the constellations Cancer, Can Minor, and Gemini border. Its core is extremely bright, it has

the intensity of a second magnitude star, and its tail, a uniform matte white, extends more than 10°. A comet of such magnitude and beauty has not been observed for a long time. Its tail is directed to Sigma of the constellation of Hydra”. This one is known as the Comet of Wells (1882 I) and was named after the observer who discovered it on March 18 that same year in Albany (USA) in the constellation of Hercules (**Vsekhsvyatskii**, 1964).

During its passage, Comet 1882 I traveled the constellations of the Lyre, Cepheus, Dragon, Giraffe, Perseus, Auriga, and the Bull, until reaching their perihelion on June 11 at a distance of 0.06 astronomical units (AU), then it went through Orion, Gemini, and Cancer. Several observatories reported it very close to the Sun during the day. By June 17, its tail was about 40° long. On the 22nd of that same month, Pakl reported that its core was well defined and had a brightness equivalent to that of a second magnitude star with a 2.5°-wide fan-shaped tail, i.e., characteristics similar to those observed by JMGB and hardly repeatable since its period is more than a million years. **Table 1** lists some of the parameters found by JMGB and another report from **Vsekhsvyatskii** (1964).

At the beginning of September 1882, one of the most striking comets of the 19th century was observed; it was called the Great Comet of September (1882 II) due to the brightness it reached in the middle of the month, equivalent to a star of 0 magnitude, and the length of its tail that reached between 15° and 20° in early October. The first reports of this comet originated in the Gulf of Guinea and the Cape of Good Hope on September 1st (**Kronk**, 1999), and others from New Zealand and an Italian ship on the 1st and 3rd of the same month (**Vsekhsvyatskii**, 1964). Very concerned about what was happening in the sky, JMGB carried out astronomical observations during the early hours of August 14 and reported having seen the comet at dawn that day (**Figure 10S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>). However, in the following days, he could not observe the comet due to poor weather conditions (**González**, 1882e) but he received reports at the beginning of that same month from Boyacá, a region a few hundred kilometers from Bogotá. With this information, JMGB wrote to several European observatories about the observation of Comet 1882 II in mid-September, although in *L'Astronomie* only two very short reports from him appeared on October 5 and 20. Due to a bronchitis he developed as a result of the observation on August 14, JMGB could not continue with the study of the orbital elements of the comet and delegated this work to his colleagues Benjamin Ferreira (1857-1918) and Eloy B. de Castro, who took the coordinates from the Flammarion Observatory and made drawings of the comet with a particular star shape. It is unknown why Flammarion did not publish such observations of this very relevant comet, which apparently was seen in Colombia before other places in the world. From the data collected, JMGB established that the diameter of the comet's hair was 6' 55" and that of the nucleus, 2' 2" at the beginning of October 1882, much bigger than in June when the hair was only one minute in diameter. Furthermore, JMGB calculated that for October 3, the comet would travel an angular distance of 4° 9' 30" in 24 hours and would reach a speed of 30 leagues per second, i.e., four times the speed of the Earth in its orbit around the Sun (**González**, 1882e).

Table 1. Orbital elements for Comet 1882 I assuming parabolic orbit as presented by **González** (1882e) and **Vsekhsvyatskii** (1964), respectively

Orbital elements	González 1882(e)	Vsekhsvyatskii (1964)
Perihelion date	10 June 1882	11 June 1882
Longitude distance perihelion	8,78367	No data
Longitude of ascending node	204° 54' 50"	206.94°
Inclination to the ecliptic plane	73° 47' 30"	73.81°
Perihelion distance (q)	2250000 leagues (10845000 km)	0.0608 AU (9120000 km)

L'Astronomie (1893) reported the news of the discovery of a new comet by the French astronomer Ferdinand Quénisset (1872-1951) on July 9 (**Flammarion**, 1893). Quénisset, who was working at the Juvisy Observatory founded by Flammarion the same year, telegraphed Félix Tisserand (1845-1896), director of the Paris Observatory, and the Central Office in Kiel, Germany, to communicate his discovery. The same journal included reports from observers in various parts of the world. Eyewitnesses in Minnewasta, New York, claimed having observed the magnificent comet the day before, in the constellation Lynx, with a tail extending to the pole star. The amateur astronomer Alfred A. Rordame (1862-1931), from Utah, also observed and reported the comet to Lewis Swift in Rochester. The observation reported by Randolph Sperra from Massachusetts on June 19 seems to be the first report (**Vsekhsvyatskii**, 1964) of an observation with the naked eye. In Colombia, JMGB reported having seen it from Bogotá on July 1 and the following days (**Sánchez**, 1906); he sent the ephemeris for the second semester in 1893, drawings of the comet, and its orbital elements (**Table 2**).

It is not known why the earlier report sent by JMGB before that of the official discoverer Quénisset was not considered (**Arias de Greiff**, 1993). Perhaps, this would have meant changing the name from Comet 1893 II Rordame-Quénisset to Sperra-González and having the first comet in history discovered by a Colombian.

An example of the intense observing activity developed by JMGB at his private observatory is evidenced in the manuscript written on September 14, 1898, with the following statement: "The comet that is currently visible is not the only one, there are no less than five in the following order: Comet Coddington, SE of Antares, or Alpha of the Scorpion, visible as of half-past six in the afternoon; very dim, the telescope is necessary to observe well. Second, a telescopic one in the constellation Capricorn is nearly visible at the same time. Third, Encke's Comet, whose period is three and a quarter years, is visible to the naked eye at the moment, starting at two in the morning, between Gemini and Canis Major. Fourth, another telescopic comet located between the Polar Star and the Alpha of Perseus, in the constellation of the Giraffe, was observed in Bogotá at eleven o'clock at night, and fifth, Comet Wolf, observed in 1891 and slightly visible in the constellation of Aries as of ten at night, passes through the meridian at three in the morning" (**Sánchez**, 1906).

Stargazing

The French Astronomical Society delegated to the OAN the task of methodical observation of the sky and, therefore, entrusted JMGB with the study of astronomical phenomena located in the declinations between 40°N and 55°N (**Sánchez**, 1906). According to an annotation found in **Sánchez** (1906), JMGB apparently worked continuously on this project, although no publications on the subject have been found yet. JMGB also received requests to solve doubts, such as the request sent from the Italian astronomers Annibale de Gasparis (1819-1892), director of the Naples Observatory, and Giuseppe Franchini, in 1882. Franchini had the hypothesis that the sky rotates in mass around the North Pole with a convergent movement, so the phenomena observed in the Boreal Hemisphere should be very different from those observed in the Southern Hemisphere, while de Gasparis

Table 2. Parameters found by JMGB for Comet Rordame-Quénisset 1893 II assuming parabolic orbit

Orbital elements calculated by JMGB	Comet Rordame-Quénisset 1893 II
Perihelion date	1893 July 7,291
Argument of perihelion	47° 7' 15.7"
Longitude of ascending node	337° 23' 25.9"
Inclination to the ecliptic plane	159° 58' 10.3"
Perihelion distance (Log q)	9,828936

maintained that there was uniformity in both regions. Such a request certainly responded to the privileged observation of both hemispheres from the advantageous position near the equator at the OAN. After observing the stars in both hemispheres, JMGB's reply was "that a star located at 80° southern declination describes a parallel equal to that traversed by stars located at 80° northern declination. As for the apparent movement of the Milky Way, an observer in the Boreal Hemisphere would see the same as one observing it in the Austral region; but these are only appearances; given that the movement is uniform as a whole and for each individual star, the law is general" (Sánchez, 1906).

JMGB maintained continuous communication with Flammarion and was informed about the most important projects carried out by the French Astronomical Society, and he wanted to participate actively in one of them: the revision of the measurement of the meridian arc at the equator. This research was suggested by the renowned mathematician Henri Poincaré (1854-1912) and supported by the International Geodesic Association in 1889. Due to political issues, measurements could only start in 1899 right on the border between Colombia and Ecuador extending through the latter to the border with Perú (Littlehales, 1907). With this in mind, JMGB trained a group of Colombian engineers and established communication with the French embassy in Bogotá to bring the necessary equipment to the country and extend the measurement to Colombian territory. However, in 1899 the worst civil war that the Colombian nation has ever faced broke, and the project could not be carried out as initially planned (González, 1902; Schiavon & Rollet, 2017).

Analysis of González Benito's pioneering work in Colombia

In the second half of the 19th century in Colombia, the figure of JMGB was inescapably associated with a large number of studies of great relevance for the advancement of science. His great ability to get involved in initiatives and projects of various kinds from an early age is reflected in the long list of contributions that transcended purely scientific areas to include the social and cultural spheres of his time. As an example, his family business, *González Benito Hermanos*, which he ran with his brothers Eugenio and Fabián in the center of Bogotá (a few blocks from the OAN), had the first private telephone line installed in the city in December 1884 connecting to JMGB's home in the neighborhood of Chapinero, about seven kilometers away (El Comercio, 1884). This represented the very beginning of the public telephone network in the country.

As for JMGB's passion for the cosmos and his role in the modern astronomical scene of his time reflected in his interest in the investigations about Mars, the origin of meteor showers, the understanding of solar activity, and his comet observations, among others, there are enough elements to consider JMGB as the first Colombian modern astronomer.

As director of the OAN and of his private observatory, JMGB made numerous observations on different astronomical objects, especially comets, regardless of the difficulties implied in the mostly cloudy conditions of their location. He observed three comets during 1880, seven in 1881, and Comet 1882 II two weeks before its first report made from New Zealand on September 1, 1882. In 1893, he observed the Comet Rordame-Quénnisset nine days before the observations from the United States and France (designated as the official discovery). In 1898, JMGB identified five more comets. He also observed meteor showers: the Leonids, on November 14, 1867, and November 13, 1899, as well as the unknown one he reported on November 24, 1872, in Andromeda.

Besides his scientific qualities, we must also highlight JMGB's virtues and commitment as an administrator. When he was appointed as OAN's director, the building was in a state of abandonment mainly due to the difficult social and political conditions that Colombia had throughout the 19th century after its independence. He recovered the premises and refurbished part of the infrastructure, renewed the instrumentation, and did not hesitate to spend his own capital to do so as clear evidence of his commitment to the development of Colombian astronomy. Like no other Colombian in the astronomy international scenario, JMGB had a great ability to establish and maintain relationships with relevant people

within the world of science, and his name continued to open doors even decades after his death. His education and his direct contact with the European astronomical environment allowed him to identify and define the functions a modern observatory should fulfill. In Europe, he had the opportunity to acquire telescopes and other state-of-the-art equipment for both his private Flammarion Observatory and the OAN.

JMGB's interest in further consolidating observing sites in Colombia motivated him to propose to scientific societies in the United Kingdom and France the construction of an observatory at an altitude of 3300 m.a.s.l. with the participation of these foreign governments and a private Colombian institution to be funded. Unfortunately, the project did not succeed after JMGB's death, but his effort to consolidate such an observational facility in the high Colombian mountains evidences his clear vision of the development of astronomy and the advantages that this would bring to scientific research in Colombia. Furthermore, his determining connections with some of the international inquiries on astronomy issues of his time demonstrate his robust scientific profile and worldwide significance.

The Flammarion Observatory was his life project. JMGB and Flammarion kept always close and continuous communication, and the French astronomer was the best man at JMGB's wedding. JMGB created the Flammarion Scientific Society, which was the first in the world among the many others formalized in the following years based on the Colombian experience in the cities of Jaen, Argentan, Marseille, and Bruxelles. In 1893, JMGB was presented by Flammarion and Anatole Bouquet de La Grey to the Astronomical Society of France as a founding member. His initiatives and dynamism allowed the first collaboration of Colombian astronomy within an international network for the exchange of information and knowledge.

Although the society of his time was still immersed in civil wars and showed little interest and understanding of science, JMGB fostered fundamental studies in astronomy and showed that it was possible to make important contributions from Colombia even without extensive support from the academic community. An illustration of this is the fact that his detractors finally managed to prevent him from entering the OAN claiming that the science the country needed had no room for JMGB's interest in fundamental astronomy, considered useless and alien to the scientific development that was supposed to be entirely aligned with the premise of astronomy as a tool for engineering towards the development of the country. After this, JMGB responded: "they do not realize that where there is an observer equipped with instruments, there is, in fact, an observatory" (Sánchez, 1906). While part of the national academic community closed its doors to him, internationally, JMGB continued to gain renown.

Flammarion, a prominent figure in the astronomy of his time, openly appreciated JMGB's contributions and included him in his novel *Fin du Monde* where he featured JMGB as the Chancellor of the Colombian Academy of Sciences, one of the world's notable scientists attending a meeting in Paris to assess the damage the Earth would suffer in the imminent event of the collision with a comet (Flammarion, 1894a). There he wrote: "Everyone knew that he was the founder of an observatory located on the same equinoctial line, three thousand meters high, from which the entire planet was dominated and both celestial poles were visible at the same time ... His universal fame also contributed to his being heard with the utmost attention." The observations and drawings made by JMGB of the characteristics of the Martian surface helped Schiaparelli and other later astronomers to develop hypotheses about the possibility of the existence of life on the planet, which today is the object of trips including the use of probes to explore it and investigate astrobiology topics.

During his academic life, JMGB was a member of numerous local societies and groups and was distinguished with multiple honors by, among others, the *Academia de Ciencias Naturales* (1871), the *Instituto de Artes y Oficios* (1872), the *Sociedad Politécnica* (1876), and the *Ateneo de Bogotá* (1884); besides, he was a founder member of the *Sociedad Colombiana de Ingenieros* and the *Instituto Colombia*, created under the same principles of the French Academy. He was also a member of international societies and institutions

(**Revista Ilustrada**, 1898; **Arias de Greiff**, 1993), such as the Royal Astronomical Society (1875), the British Science Association (1875), the Society of Geographical and Historical Studies of Salvador (1892), the Universal Academy of Arts and Sciences of Brussels (1892), the French Astronomical Society (1898), the French Academy in the degree of Official (1898), the Belgian Astronomical Society (1898), the Astronomical Society of the Pacific (1890s), and the French Public Instruction as Officer (1903).

In the Bulletin of the French Astronomical Society in 1903, his obituary was published soon after he passed away (**Figure 7**); there he is recognized as having an “elite spirit and noble heart”.

Conclusions

In this work, we collected evidence from well-known and undisclosed sources that support the assertion that JMGB was one of the most important figures in the history of Colombian astronomy, mainly due to the advances and discoveries he achieved as the result of innumerable investigations and projects although much of his history and studies were lost after his sudden death. Despite his intense scientific life, the legacy of JMGB has not been properly acknowledged in Colombia and his name has been diluted internationally, which were some of the reasons that led us to embark on this work. JMGB’s contributions to astronomy were mostly published in international journals, but we believe that most of his works were lost. His overall contributions, international collaborations, and accomplishments in the field of fundamental astronomy cannot be undervalued if we consider the topics and questions that occupied the astronomy community worldwide at his time.

According to the evidence, JMGB’s works were not very well appreciated by the academic community in Colombia at that time, as its members were more focused on the immediate application of astronomy to engineering tasks such as cartography, delimitation of the territory, and issues related to the standardization of the local time used for telegraphic

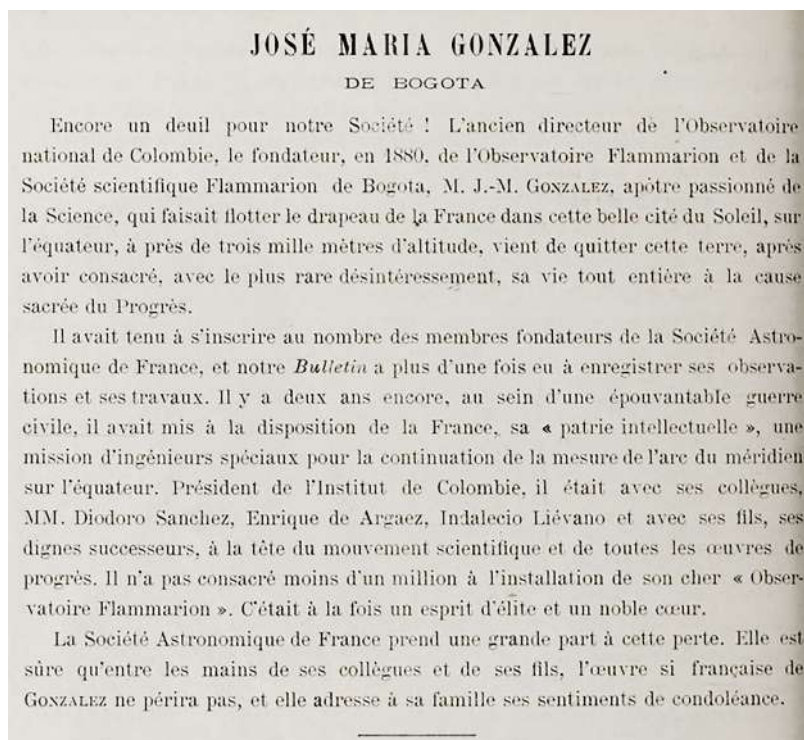


Figure 7. JMGB’s obituary published in the Bulletin of the French Astronomical Society (1903) shortly after his death in 1903

purposes and communications in general (**Quintero, 2002; Benavides, 2020**). JMGB was not very much into those practical aspects; his interests moved around fundamental astronomy issues, and this was not aligned with the idea of the development the country should have as expressed by Abelardo Ramos (1852-1900), president of the Colombian Society of Engineers, in the editorial of the Society's journal written a couple of years before JMGB's contract as director of the OAN ended and was not renewed (**Ramos, 1890**).

The historian Camilo Quintero Toro's article in **Purcell and Arias-Trujillo, 2014**, suggests that the figure of JMGB was intentionally enshrouded by that of Julio Garavito Armero (1865-1920). Garavito, JMGB's successor as director of the OAN, is perhaps the most renowned Colombian astronomer of all time, especially since 1970 when a crater on the Moon was named after him (**Arias et al., 1987**). However, at his time, Garavito was less known by far in the astronomical worldwide community than JMGB and his works were never published in international journals. Garavito's duties as director of the OAN were mostly aligned with the engineering purposes defended by Ramos and other members of the academic community, which overshadowed much of the astronomical work led by JMGB in Colombia. During the first half of the twentieth century, astronomy in Colombia did not have significant changes that would resume JMGB's pioneering actions.

Here our objective was to spread his ideas, projects, and legacy to wider academic circles and the general audience. For such purpose, we were able to collect remarkable chronological documentation (**Table 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>) and evidence that had remained unknown for more than a century. We hope that much more of JMGB's legacy may be recovered to appropriately recognize the figure of a man who can be considered the father of Colombian modern astronomy.

Supplementary information

View supplementary information in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1795/3323>

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the Grupo de Patrimonio del Observatorio Astronómico Nacional de Colombia, the Museo de Bogotá, the Biblioteca Nacional de Colombia, the Biblioteca Luis Ángel Arango, the Archivo Central e Histórico - Universidad Nacional de Colombia, and the Archivo General de la Nación.

Contribution of the authors

JCM: Bibliographic search and contextualization; FMC and SVD: research, bibliographic search, analysis, and writing of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Arias, J., Arboleda, L.C., Espinosa-Baquero, A.** (1987). *Historia social de la ciencia en Colombia*. Colciencias, pp 92-105.
- Arias de Greiff, J.** (1993). *La astronomía en Colombia*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 1a Edición, pp. 95-105.
- Bateman, A.D.** (1954). *El Observatorio Astronómico de Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia. pp. 34.
- Benavides P.** (2020) *Pies en el cielo, ojos en la tierra. Modos de ordenar, tiempos y fronteras en la circulación de saberes astronómicos (1865-1902)*. Tesis doctoral. U. de los Andes.
- Boussingault, J.B., Rivero M.** (1823). Memoria sobre diferentes masas de hierro, encontradas en la Cordillera Oriental de los Andes. *Boletín de Historia y Antigüedades*. Volumen XXVIII, Número 31. Academia Colombiana de Historia, pp. 572-577.
- Bulletins and Other State Intelligence.** (1874). Part 1, p. 238.

- El Comercio** (1884). El teléfono. 3 de diciembre 1884.
- Flammarion C.** (1874). *Etudes et Lectures sur L'Astronomie*. Tomo 5. Gauthier-Villars Imprimeur Libraire, Paris. pp. 170.
- Flammarion, C.** (1882). *L'Astronomie*. Societé Astronomique de France. Paris, p. 31.
- Flammarion, C.** (1893). *L'Astronomie*. Societé Astronomique de France. Paris 1893, pp. 104, 228.
- Flammarion, C.** (1894a). *La fin du monde*, Gauthier-Villars et Fils, Paris, pp. 63, 64, 67.
- Flammarion, C.** (1909). *La Planète Mars et ses Conditons d'Habitabilité*. Tomo II. Gauthier-Villars Imprimeur Libraire, Paris, pp. 74-77
- González, J.** (1871). Física y Meteorología. Temblor del día 7 de septiembre de 1871. *Revista Científica e Industrial*. Bogotá, pp. 12,13.
- González, J.** (1874). Proposed observatory at Bogotá, South America. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 35(1), 12.
- González, J.** (1882a). La adopción de un primer meridiano, *Anales del Observatorio Astronómico Nacional de Bogotá*. Marzo de 1882, pp. 8-16.
- González, J.** (1882b). Nuevos estudios sobre estrellas, *Anales del Observatorio Nacional Astronómico de Bogotá*. Junio de 1882, pp. 50-54.
- González, J.** (1882c). Paso de Venus por el disco del Sol, *Anales del Observatorio Astronómico Nacional de Bogotá*, Noviembre de 1882, (6), 82.
- González, J.** (1882d). Observaciones que deben practicarse, *Anales del Observatorio Astronómico Nacional de Bogotá*, Mayo de 1882, (3), 45-46.
- González, J.** (1882e). El nuevo cometa, *Anales del Observatorio Astronómico Nacional de Bogotá*, Julio de 1882, (5), 66.
- González, J.** (1882e). Fin del Mundo. *La Ilustración*, Bogotá. p. 158.
- González J. M.** (1902). La mesure de l'arc de méridien a l'équateur. *Bulletin de la Société Astronomique de France*. Paris, p. 90-91.
- González, J.** (2018). Autobiografía de José María González, Transcrita por: Martínez-Garnica, A., García Piment, R., 2018. Archivo General de la Nación, *Revista Memoria*, 19, 62-104.
- Ibáñez, P. M.** (1891). Las Crónicas de Bogotá y sus inmediaciones. Imprenta de la luz. Bogotá, p. 193.
- Kronk, G. W.** (1999). Cometography a catalog of comets 1800-1899. Volume 2. Cambridge University Press, London, p. 154.
- Liévano, I.** (1875). Apéndice de las Investigaciones científicas publicadas en 1871 por Indalecio Liévano. Imprenta de Medardo Rivas, Bogotá, p. 2.
- Littlehales, G.W.** (1907). The Recent Scientific Missions for the Measurement of Arcs of the Meridian in Spitzbergen and Ecuador. *Bulletin of the American Geographical Society*, 39(11), 641-653.
- Portilla, J.G.** (2017). Observatorio Astronómico Nacional: sobreviviente del primer intento de construcción de ciencia nacional. En E. Restrepo, C. H. Sánchez, G. Silva (eds.). Patrimonio de la nación. Tomo 1. Colección del sesquicentenario. Bogotá: Nomos Impresores, pp. 340-368.
- Portilla, J.G.** (2020). *Firmamento y atlas terrestre: la astronomía que practicó Francisco José de Caldas*. Facultad de Ciencias Sede Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. p. 252.
- Purcell, F., Arias Trujillo, R.** (2014). Chile-Colombia: Diálogos sobre sus trayectorias históricas. *Ediciones Uniandes*. pp. 62-103.
- Quintero, C.** (2002). La astronomía en Colombia, 1867-1949. *Documentos CESO*, 17, 1.
- Revista Científica e Industrial.** (1871). Exhibición de la Industria Nacional, 12, 1.
- Revista Ilustrada.** (1899). Reseña histórica del Observatorio de Bogotá, 1, 147-149.
- Revista Semana.** (1951). Astronomía. Retina gigante. pp. 26-27.
- Sánchez, D.** (1906). Biografía de José María González Benito. *Anales de Ingeniería*, XIV, 165-166.
- Schiavon, M., Rollet L.T.** (dir.) (2017). *Pour une histoire du Bureau des Longitudes* (1795- 1932), PUN-Edulor, Nancy.
- Ramos, A.** (1890). Editorial. *Anales de Ingeniería*, 37, 7.
- Tisnés-Jiménez, R. M.** 1956. *Capítulos de Historia Zipaquireña* (1480-1830), Vol 1. p. 678.
- Torres-Sánchez J., Salazar-Hurtado, L.A.** (2002). *Introducción a la Historia de la Ingeniería y la Educación en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, pp. 41-45.
- Uricoechea, E.** (1860). Contribuciones de Colombia a las Ciencias i a las Artes, con la cooperación de la sociedad de naturalistas Neo-Granadinos. *Imprenta de El Mosaico*, Bogotá, pp. 106-108.
- Vsekhsvyatskii, S.K.** (1964). *Physical Characteristics of Comets*. NASA and National Science Foundation. Jerusalem. 1964.

Club de revistas

Comentario sobre el artículo

Hedlund B.P., Chuvochina M., Hugenholtz P., Konstantinidis K.T., Murray A.E., Palmer M., Parks D.H., Probst A.J., Reysenbach A.L., Rodriguez-R L.M., Rossello-Mora R., Sutcliffe I.C., Venter S.N., Whitman W.B. (2022).

SeqCode: a nomenclatural code for prokaryotes described from sequence data. *Nature Microbiology*, 7, 1702-1708. <https://doi.org/10.1038/s41564-022-01214-9>

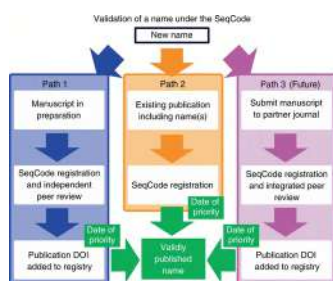


Figura 1. Proceso de validación de un nombre bajo el SeqCode.

¿Qué hay en un nombre?

What's in a name?

*What's in a name? That which we call a rose
By any other name would smell as sweet.*

Romeo y Julieta. William Shakespeare, 1597

Esa pregunta la puso el conocido dramaturgo William Shakespeare en boca de Julieta, para quien Romeo seguiría siendo su amante aun si llevara otro nombre, con lo que sugiere que los nombres serían una convención sin mayor significado individual.

La necesidad de darle un nombre a lo que nos rodea, desde objetos a personas e, incluso, sentimientos y emociones, es un atributo que nos resulta esencial para distinguir, clasificar y comunicarnos. Y aunque es cierto que en algunas ocasiones el nombre de un objeto puede no ser tan importante, este no es el caso para las ciencias. La comunicación efectiva y el intercambio de ideas científicas requieren de nomenclaturas precisas. En las ciencias de la vida esta necesidad es particularmente evidente al hablar de las diversas especies de organismos que habitan nuestro planeta.

Las especies se nombran siguiendo códigos de nomenclatura para garantizar que cada una tenga un nombre único que ayude a entender su relación con otros organismos en el contexto taxonómico. Este nombre único consta de dos partes y sigue el sistema de nomenclatura “binomial” introducido hace casi 300 años por Carl Linnaeus, científico sueco reconocido como el padre de la taxonomía moderna (Venter, 2022). En este sistema, la primera parte identifica el género y la segunda es un nombre específico que distingue la especie de otras en el mismo género. Es así como nuestra especie *Homo sapiens* pertenece al género *Homo* y se distingue de especies ya extintas pero del mismo género, como *Homo erectus* y *Homo neanderthalensis*.

La labor de la taxonomía, es decir, el proceso de clasificación ordenada y jerárquica de los organismos, no está exenta de dificultades. En el caso de los microorganismos procariotas (bacterias y arqueas), la clasificación y la nomenclatura de las especies se complican por varios factores. Para comenzar, es difícil definir lo que constituye una especie. Los microorganismos pertenecientes a la misma especie varían en cuanto a sus funciones y el tamaño de sus genomas debido a su plasticidad y al hecho de que pueden intercambiar genes con otras especies mediante un mecanismo denominado transferencia horizontal de genes. Por otro lado, su tamaño microscópico dificulta la identificación de rasgos distintivos, razón por la cual hoy se utilizan varios parámetros para identificar especies, entre ellos, características morfológicas, metabólicas y genómicas. En los últimos años la secuenciación de genes conservados, como el gen 16S rRNA que codifica para la subunidad pequeña del ribosoma, y de genomas completos, se ha convertido en una ayuda fundamental para la clasificación de microorganismos. El gran número de genomas bacterianos que están en las bases de datos sirve como un recurso de información sólida para la comparación de organismos y la descripción de especies.

Por último, bajo el código de nomenclatura actual (*International Code of Nomenclature of Prokaryotes*, ICNP), cada especie procariota debe tener un representante “tipo” almacenado en alguna colección biológica que sirva como evidencia de su existencia y referencia para estudios posteriores. Este punto es particularmente polémico, ya que la gran mayoría de especímenes microbianos en nuestro planeta no se puede cultivar y se conocen únicamente a través de información genómica obtenida por secuenciación.

No sabemos cuántas especies procariotas hay en el planeta, pero se estima que solo una pequeña proporción del total (<0,2 %) cuenta con nombres asignados en la actualidad (Sutcliffe *et al.*, 2021). El resto, la gran mayoría de los microorganismos no cultivados e identificados solo por secuenciación, permanece sin nomenclatura, pues no cumple con los criterios consignados en el código (Nayfach *et al.*, 2021; Hedlund *et al.*, 2022). Esta situación está causando un embotellamiento de la información dada la expansión de registros microbianos ambientales gracias a los avances en tecnologías de secuenciación para estudiar las comunidades microbianas sin necesidad de realizar cultivos. A partir de estas secuencias de ADN ambiental, o metagenómica, es posible ensamblar genomas procariotes, los denominados *metagenome-assembled genomes* (MAG). Con estos estudios, se ha expandido notablemente el repertorio y el conocimiento sobre la diversidad y la ecología de estas comunidades microbianas (Nayfach *et al.*, 2021).

Con el fin de incluir esta mayoría aún no cultivada de microorganismos en el árbol de la vida y, de paso, también aquellos que se consideran fastidiosos por ser difíciles de cultivar y mantener en una colección, varios investigadores han propuesto un sistema de nomenclatura basado en la secuenciación genómica. Este nuevo código de nomenclatura se llama *Code of Nomenclature of Prokaryotes Described from Sequence Data*, o SeqCode, y utiliza genomas “tipo” para darle nombre a especies procariotas (Whitman *et al.*, 2022). Este protocolo se desarrolló ante la negativa del comité internacional de sistemática de procariotes (International Committee on Systematics of Prokaryotes) a admitir secuencias genómicas como material tipo en su código.

SeqCode busca simplificar el proceso de nomenclatura y unificar la clasificación incorporando microorganismos cultivados y no cultivados. Este sistema permite registrar y validar un nombre utilizando un sistema en línea que sigue guías de nomenclatura y estándares claros para identificar genomas tipo (Hedlund *et al.*, 2022). Se incluyen también aquellos registros que se designan como “*candidatus*”, nombre que se otorga a microorganismos que aún no han sido cultivados, con lo cual se aumenta el registro de especies procariotas y se facilita el intercambio de información en la comunidad científica. Más importante aun es el hecho de incorporar al proceso de clasificación la información genómica y utilizar genomas “tipo”, muchos de ellos obtenidos por secuenciación metagenómica.

La utilidad de SeqCode como sistema de clasificación y su aceptación por parte de la comunidad científica es aún incierta (Pennisi, 2022). Para algunos investigadores es difícil aceptar que una especie se pueda definir exclusivamente con base en un genoma, en particular a partir de los MAG. Para otros, sin embargo, puede ser una herramienta necesaria para clasificar el gran número de especies que se descubren en las exploraciones ambientales. Solo con el tiempo y el uso se podrá validar su utilidad en la taxonomía microbiana. En cualquier caso, este esfuerzo reconoce la relevancia que tiene la información genómica para la clasificación de microorganismos, y abre la posibilidad de organizar, conocer y explorar más a fondo la diversidad microbiana del planeta.

✉ **María Mercedes Zambrano, Ph.D**

Directora Científica Corporación Corpogen
Bogotá, Colombia

Referencias

- Hedlund B.P., Chuvochina M., Hugenholtz P., Konstantinidis K.T., Murray A.E., Palmer M., Parks D.H., Probst A.J., Reysenbach A.L., Rodriguez-R L.M., Rossello-Mora R., Sutcliffe I.C., Venter S.N., Whitman W.B. (2022). SeqCode: a nomenclatural code for prokaryotes described from sequence data. *Nature Microbiology*, 7, 1702-1708. <https://doi.org/10.1038/s41564-022-01214-9>
- Nayfach, S., Roux, S., Seshadri, R., Udvary, D., Varghese, N., Frederik Schulz, F., Wu, D., Paez-Espino, D., Chen, I-M., Huntemann, M., Palaniappan, K., Ladau, J., Mukherjee, S., Reddy, T.B.K., Nielsen, T., Kirton, E., Faria, J.P., Edirisinghe, J.N., Henry, C.S.,

- Jungbluth, S.P., Chivian, D., Dehal, P., ... Eloe-Fadrosh, E.A.** (2021). A genomic catalog of Earth's microbiomes. *Nature Biotechnology*, 39, 499-509. <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0718-6>
- Pennisi, E.** (2022). Microbiologists propose new DNA-based naming system for microbes. Fecha de acceso: noviembre 11, 2022. Disponible en: <https://www.science.org/content/article/microbiologists-propose-new-dna-based-naming-system-microbes>
- Sutcliffe, I.C., Rosselló-Móra R., Trujillo M.E.** (2021). Addressing the sublime scale of the microbial world: reconciling an appreciation of microbial diversity with the need to describe species. *New Microbes New Infect.* 43,100931. <https://doi.org/10.1016/j.nmni.2021.100931>
- Venter, S.N.** (2022). A new way to name bacteria: 300-year-old system revised thanks to scientific advances. Fecha de acceso: noviembre 8, 2022. Disponible en: <https://theconversation.com/a-new-way-to-name-bacteria-300-year-old-system-revised-thanks-to-scientific-advances-193027>.
- Whitman, W.B., Chuvoshina, M., Hedlund, B.P. Hugenholtz, P., Konstantinidis, K.T., Murray, A.E., Palmer, M., Parks, D.H., Probst, A.J., Reysenbach, AL., Rodriguez-R, L.M., Rossello-Mora, R., Sutcliffe, I., Venter, S.N.** (2022). Development of the SeqCode: A proposed nomenclatural code for uncultivated prokaryotes with DNA sequences as type. *Systematic and Applied Microbiology*, 45, 126305. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2022.126305>

Club de revistas

Comentario sobre el artículo

Klunk, J., Vilgalys, T. P., Demeure, C. E., Cheng, X., Shiratori, M., Madej, J., Beau, R., Elli, D., Patino, M. I., Redfern, R., DeWitte, S. N., Gamble, J. A., Boldsen, J. L., Carmichael, A., Varlik, N., Eaton, K., Grenier, J. C., Golding, G. B., Devault, A., Rouillard, J. M., Yotova, V., Sindeaux, R., Ye, C.J., Bikaran, M., Dumaine, A., Brinkworth, J. F., Missiakas, D., Rouleau, G. A., Steinrücken, M., Pizarro-Cerdá, J., Poinar, H. N., Barreiro, L. B. (2022). Evolution of immune genes is associated with the Black Death. *Nature*, 611, 312-319. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05349-x>

¿Cuál es el costo evolutivo de sobrevivir una pandemia? What is the evolutionary cost of surviving a pandemic?

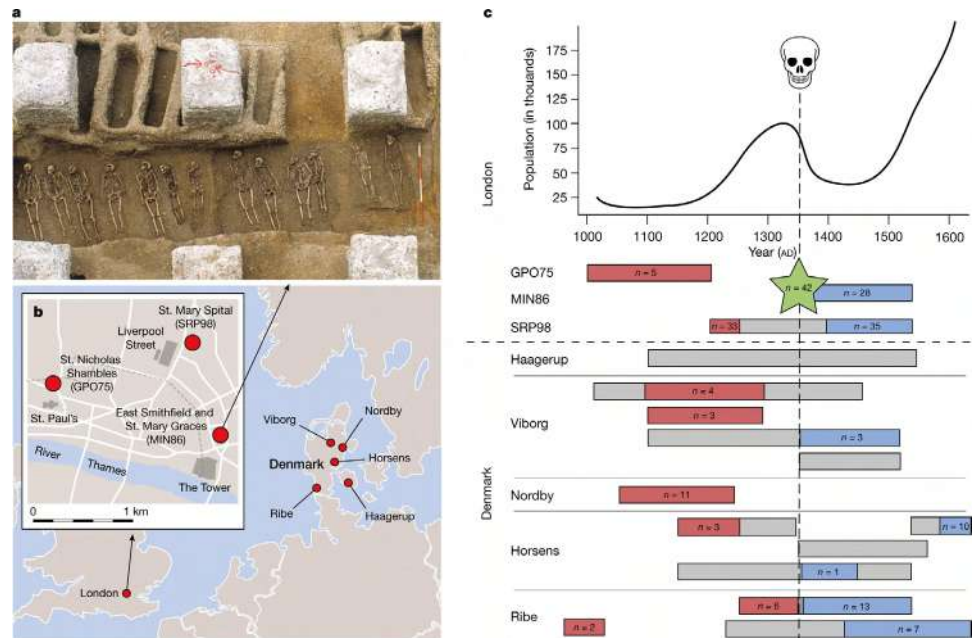


Figura 1. Lugares de entierro masivo y muestra de *East Smithfield*, junto con rangos de fechas y números de muestra finales utilizados para el presente estudio.

Las infecciones son una causa importante de mortalidad en poblaciones humanas y, por lo tanto, ejercen una selección natural, la fuerza creativa y regulatoria de la evolución de las especies. Descrita por Charles Darwin, la selección natural se fundamenta en el concepto de que en un medio natural sobreviven los más aptos o los más fuertes (p.ej., aquellos que sobrevivieron a pandemias como la Peste Negra). Los individuos menos aptos, o más débiles, perecen y sus genes no se transmiten a las siguientes generaciones al no reproducirse.

En algunos estudios en que se han relacionado las frecuencias de variantes genéticas, o polimorfismos, de poblaciones humanas con la diversidad de ciertos microorganismos, se ha establecido que la selección natural dirigida por patógenos es una fuerza relevante en la adaptación local de numerosos genes y, en consecuencia, de proteínas que participan en diversas vías de señalización, incluida la respuesta inmunitaria. Tal es el caso de los genes del complejo mayor de histocompatibilidad, de aquellos que codifican los antígenos de los grupos sanguíneos o de los que codifican para algunas moléculas del sistema inmunitario conocidas como citocinas, entre otros (Gugamalli *et al.*, 2011; Nedelec *et al.*, 2016).

En los años cincuenta del siglo pasado los científicos descubrieron cómo algunos grupos sanguíneos y anomalías en la hemoglobina habrían surgido en áreas endémicas como protección contra el cólera y la malaria, respectivamente. Algunos alelos del gen *APOE4* protegieron a nuestros antepasados contra retrasos cognitivos durante la niñez cuando sufrían diarreas frecuentes y graves, pero ahora aumentan el riesgo cardiovascular y de Alzheimer (Guerrant *et al.*, 2007).

Una investigación colaborativa internacional, publicada recientemente en la revista *Nature* (Klunk *et al.*, 2022), mostró que la Peste Negra, causada por la bacteria *Yersinia pestis*, que acabó con 30 a 60 % de las personas en ciudades del norte de África, Europa y Asia en el siglo XIV, ejerció una significativa presión de selección sobre la población humana, incrementando la frecuencia de ciertas variantes genéticas relacionadas con el sistema inmunitario y aumentando la propensión a las enfermedades autoinmunes.

Los autores del estudio examinaron muestras de ADN de los huesos de más de 200 personas que vivieron en Londres y Dinamarca y que fallecieron antes, durante y después de la Peste Negra. Se identificaron variantes, o polimorfismos, en cuatro genes que protegían o aumentaban la sensibilidad a la infección por *Yersinia*. Uno de los genes, aquel que codifica la enzima aminopeptidasa del retículo endoplásmico 2 (*ERAP2*, por sus siglas en inglés), resultó ser fundamental para la defensa contra la infección. Las personas que poseían dos copias del polimorfismo rs2549794 en este gen produjeron más proteína funcional, en comparación con otra variante que condujo a una versión truncada y no funcional. Poseer dos copias de dicho polimorfismo habría hecho que una persona tuviera un 40 % más de probabilidades de sobrevivir a la Peste Negra que aquellos que tenían dos copias de la variante no funcional. La misma variante se ha asociado con una mayor propensión a las enfermedades autoinmunes e, incluso, se la ha caracterizado como un conocido factor de riesgo para la enfermedad de Crohn, lo que indica que una fuerza de selección natural presente durante una antigua pandemia contribuyó a aumentar la posibilidad de sufrir enfermedades autoinmunes en la era actual.

En Colombia se han desarrollado algunos estudios que sugieren un fenómeno similar con la tuberculosis. Investigadores de la Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB) de Medellín evidenciaron en grupos de población antioqueña que una variante del gen que codifica para el factor de necrosis tumoral (*TNF*) y que produce una citocina inflamatoria, y otra variante del gen de la proteína tirosina fosfatasa no receptora de tipo 22 (*PTPN22*) que codifica para la proteína linfoide tirosina fosfatasa, importante regulador negativo de la activación de los linfocitos T (células del sistema inmunitario), son variantes genéticas de riesgo para enfermedades autoinmunes, pero protegen contra el desarrollo de la tuberculosis (Correa *et al.*, 2005, Gómez *et al.*, 2005, Gómez *et al.*, 2005). No sobra mencionar que las variables medioambientales y los determinantes sociales influyen también en el desarrollo y la gravedad de las enfermedades, en general, y de las infecciones, en particular.

Recientemente, un estudio colaborativo entre investigadores estonios y rusos mostró que el 28 % de los polimorfismos de riesgo en 21 enfermedades autoinmunes e inflamatorias presentan huellas de selección moderada y débil y que algunos de ellos son específicos de la población de estudio (Pankratov *et al.*, 2022).

Se ha planteado que con la pandemia de COVID-19 causada por el coronavirus SARS-CoV-2 pueda ocurrir un fenómeno similar. ¿Qué tanto podrán influir la COVID-19 y la vacunación masiva en la selección de variantes genómicas de susceptibilidad a enfermedades futuras? ¿Cuál será el costo evolutivo de sobrevivir a esta pandemia? Hasta la fecha el virus se ha asociado con el desarrollo de autoinmunidad, tanto latente (presencia de múltiples autoanticuerpos) como clínicamente manifiesta, en particular artritis reumatoide, vasculitis y diabetes mellitus tipo 1 (Anaya *et al.*, 2022), lo que refleja la necesidad de estudiar la interacción entre infección y autoinmunidad para la comprensión de la supervivencia de la especie humana.

✉ **Juan-Manuel Anaya**¹, ✉ **Paul Laissue**², **José A. Cadena Zuluaga**³

¹Miembro correspondiente, Academia Nacional de Medicina de Colombia, anayajm@gmail.com

²Unidad de Enfermedades Huérfanas. Laboratorios BIOPAS. BIOPAS group. Bogotá, Colombia, plaissue@biopasgroup.com

³División de Enfermedades Infecciosas, Departamento de Medicina, Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Texas, San Antonio, EE. UU. cadenzuluag@uthscsa.edu

Referencias

- Anaya, J. M., Herrán, M., Beltrán, S., Rojas, M.** (2022). Is post-COVID syndrome an autoimmune disease? *Expert Review of Clinical Immunology*, *18*, 653-666. <https://doi.org/10.1080/1744666X.2022.2085561>
- Correa, P. A., Gómez, L. M., Cadena, J., Anaya, J. M.** (2005). Autoimmunity and tuberculosis. Opposite association with TNF polymorphism. *The Journal of Rheumatology*, *32*, 219-224.
- Fumagalli, M., Sironi, M., Pozzoli, U., Ferrer-Admetlla, A., Pattini, L., Nielsen, R.** (2011). Signatures of environmental genetic adaptation pinpoint pathogens as the main selective pressure through human evolution. *PLoS Genetics*, *7*, e1002355. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002355>
- Gómez, L. M., Anaya, J. M., González, C. I., Pineda-Tamayo, R., Otero, W., Arango, A., Martín, J.** (2005). PTPN22 C1858T polymorphism in Colombian patients with autoimmune diseases. *Genes and Immunity*, *6*, 628-631. <https://doi.org/10.1038/sj.gene.6364261>
- Gómez, L. M., Anaya, J. M., Martín, J.** (2005). Genetic influence of PTPN22 R620W polymorphism in tuberculosis. *Human Immunology*, *66*, 1242-1247. <https://doi.org/10.1016/j.humimm.2005.11.008>
- Guerrant, R. L., Oriá, R. B., Boissevain, J. R., Patrick, P. D., Lima, A. A.** (2007). Infectious diseases, balanced polymorphisms, and human evolution: a declaration of interdependence. *Current Infectious Disease Reports*, *9*, 83-85. <https://doi.org/10.1007/s11908-007-0001-8>
- Klunk, J., Vilgalys, T. P., Demeure, C. E., Cheng, X., Shiratori, M., Madej, J., Beau, R., Elli, D., Patino, M. I., Redfern, R., DeWitte, S. N., Gamble, J. A., Boldsen, J. L., Carmichael, A., Varlik, N., Eaton, K., Grenier, J. C., Golding, G. B., Devault, A., Rouillard, J. M., Yotova, V., Sindeaux, R., Ye, C. J., Bikaran, M., Dumaine, A., Brinkworth, J. F., Missiakas, D., Rouleau, G. A., Steinrücken, M., Pizarro-Cerdá, J., Poinar, H. N., Barreiro, L. B.** (2022). Evolution of immune genes is associated with the Black Death. *Nature*, *611*, 312-319. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05349-x>
- Nédélec, Y., Sanz, J., Baharian, G., Szpiech, Z. A., Pacis, A., Dumaine, A., Grenier, J. C., Freiman, A., Sams, A. J., Hebert, S., Pagé Sabourin, A., Luca, F., Blekman, R., Hernández, R. D., Pique-Regi, R., Tung, J., Yotova, V., Barreiro, L. B.** (2016). Genetic Ancestry and Natural Selection Drive Population Differences in Immune Responses to Pathogens. *Cell*, *167*, 657-669.e21. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.09.025>
- Pankratov, V., Yunusbaeva, M., Ryakhovsky, S., Zarodniuk, M., Estonian Biobank Research Team, Yunusbayev, B.** (2022). Prioritizing autoimmunity risk variants for functional analyses by fine-mapping mutations under natural selection. *Nature Communications*, *13*, 7069. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34461-9>

Club de revistas

Comentario sobre el artículo

Sachs, J.D., Abdool Karim, S.S., Aknin, L., Allen, J., Brodbø, K., Colombo, F., Cuevas Barron, G., Espinosa, M.F., Gaspar, V., Gaviria, A., Haines, A., Hotez, P.J., Koundouri, P., Larrain Bascuñán, F., Lee, J.K., Pate, M.A., Ramos, G., Srinath Reddy, K., Serageldin, I., Thwaites, J., Vike-Freiberga, V., Wang, C., Khamadi Were, M., Xue, L., Bahadur, C., Bottazzi, M.E., Bullen, C., Laryea-Adjei, G., Ben Amor, Y., Karadag, O., Lafortune, G., Torres, E., Barredo, L., Bartels, J.G.E., Joshi, N., Hellard, M., Kim Huynh, U., Khandelwal, S., Lazarus, J.V., Michie, S. (2022). The Lancet Commission on lessons for the future from the COVID-19 pandemic. *Lancet*; 400, 1224-1280. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01585-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01585-9)

Hallazgos y recomendaciones de la Comisión de Lancet para el COVID-19: una mirada crítica

Findings and recommendations of the Lancet Commission for COVID-19: A critical look

En julio del 2020 la revista Lancet estableció una comisión de 28 académicos para estudiar y hacer seguimiento a la pandemia de COVID 19 y sus consecuencias. La Comisión debía hacer recomendaciones en cuatro áreas temáticas: 1) las mejores formas de suprimir la pandemia; 2) las formas de mitigar la crisis humanitaria desencadenada por esta; 3) las intervenciones para controlar las crisis financieras y económicas que surgirían de la pandemia, y 4) los caminos para reconstruir un mundo más justo, sostenible e incluyente después de ella.

No quisiera dejar pasar la oportunidad para comentar sobre la conformación de la Comisión en sí misma, porque eso influye de alguna manera en las conclusiones sobre las causas de los terribles impactos de la pandemia, los remedios propuestos para mitigar sus efectos y las recomendaciones para tratar de evitar eventos parecidos en el futuro. Lo primero que salta a la vista es que la abrumadora mayoría de los comisionados proviene de países industrializados o laboran en centros de investigación y desarrollo tecnológico situados en esos países. Siete (21 %) de ellos trabaja en países en desarrollo y solo hay cuatro de las regiones más afectadas (Latinoamérica e India). Curiosamente, los comisionados de América Latina son economistas (Colombia y Chile) y no hay ningún representante de Brasil, el país latinoamericano más afectado por la pandemia y uno de los que tuvieron mayor mortalidad en el mundo.

La Comisión se apoyó en el trabajo de 174 expertos divididos en 12 grupos de tarea que revisaron una gran cantidad de información sobre la pandemia. El informe contiene un buen número de análisis sobre el comportamiento de la enfermedad en las diversas regiones del mundo y su impacto epidemiológico y socioeconómico, así como juicios sobre quiénes lo hicieron mejor o peor y los factores que pudieron estar ligados al desempeño de los diversos servicios de salud. Así, la lectura del documento es valiosa porque da una idea resumida del impacto de la pandemia a nivel global en algo más de 40 páginas.

En este comentario me referiré a mis impresiones sobre los principales hallazgos de la Comisión y sus recomendaciones. Dichos hallazgos pueden resumirse de la siguiente manera:

1. Los orígenes de la pandemia son desconocidos. No existe evidencia suficiente para saber con certeza si el virus evolucionó a partir de una especie animal y adquirió una mayor transmisibilidad en los humanos, o si fue producto de una fuga desde un laboratorio de experimentación con virus.
2. La Organización Mundial de la Salud (OMS) actuó de manera lenta y demasiado cauta en las primeras etapas decisivas de la pandemia y se confundió frente a las recomendaciones en torno a la utilidad del uso del tapabocas y la transmisión aérea del virus.
3. La mayoría de los gobiernos actuaron con lentitud y no reconocieron la urgencia de la situación. Además, se sugiere veladamente que de haberse implementado medidas de supresión de la transmisión se habría evitado la diseminación de la enfermedad.

4. La coordinación de los gobiernos, entre otros numerosos aspectos que incluyen las limitaciones a los viajeros y la cooperación para compartir las pruebas de diagnóstico y los datos sobre el avance de la epidemia, fue inadecuada
5. La oposición del público a las medidas de salud pública como el uso de tapabocas, la aplicación de las vacunas, y el papel activo de muchas personas en las redes sociales a la hora de difundir información falsa sobre la pandemia y las vacunas, también fue un factor determinante de la incapacidad para detener la pandemia o mitigar sus efectos de manera más efectiva.
6. Las políticas públicas no atendieron adecuadamente los efectos que la pandemia produjo sobre la desigualdad económica y social. El cierre prolongado de los colegios en muchos países en desarrollo es uno de los ejemplos de cómo las políticas de control aumentaron los efectos de la pandemia a nivel social y económico.
7. Contrario a lo sucedido en países industrializados y de altos ingresos, los servicios de salud de los países en desarrollo no tuvieron la capacidad de atender a los pacientes no COVID durante los picos de transmisión, y muchos programas preventivos de salud colapsaron, lo que es particularmente importante porque el COVID clínico grave afecta más a las personas con enfermedades crónicas
8. El desarrollo de vacunas fue un éxito de la ciencia, pero las organizaciones multilaterales y los países ricos fallaron en cuanto a la entrega equitativa de las vacunas a los países menos desarrollados que, en general, fueron los más afectados por las altas tasas de mortalidad y morbilidad grave.
9. La pandemia ha afectado el avance de las metas de desarrollo en muchos países y los ha hecho retroceder varios años en los indicadores que marcan el avance hacia esas metas.
10. La recuperación económica depende de mantener las altas tasas de vacunación para disminuir la frecuencia de casos graves y de muertes, así como del desarrollo de políticas económicas que mitiguen el efecto de la pandemia.

De estos hallazgos yo resaltaría el sexto y el octavo, los cuales enfatizan cómo muchas políticas de control adoptadas por los gobiernos alrededor del mundo, especialmente en el mundo en desarrollo, terminaron produciendo más daños que beneficios, lo que repercutirá, para mal, en el bienestar de muchas poblaciones por varios años.

Otras conclusiones no responderían a una apreciación justa de la realidad epidemiológica de cada momento. Por ejemplo, culpar a la OMS por reaccionar demasiado lento es desconocer la gran incertidumbre que existía en diciembre de 2019 y enero de 2020 sobre las características del virus y sus modos de transmisión. Para ese momento la OMS solo disponía de los datos que China y un puñado de países de Asia podían proveer en medio de limitaciones para el diagnóstico de la verdadera carga de enfermedad. Por ejemplo, no se conocía el papel de los infectados asintomáticos simplemente porque no había suficiente capacidad para estudiar a los sintomáticos; además, los datos de esos dos primeros meses sugerían una menor transmisibilidad del virus de la que se observó después, algo que es plausible a la luz de los múltiples cambios biológicos que el virus ha tenido desde entonces.

La Comisión por supuesto emite una serie de recomendaciones, algunas más detalladas que otras, sobre cómo poner fin a la pandemia y prevenir o mitigar más efectivamente la emergencia de nuevas amenazas infecciosas. Las recomendaciones podrían dividirse en las que llaman a los países para que implementen o fortalezcan acciones internas y las que proponen acciones multilaterales, por ejemplo, el fortalecimiento de la capacidad de la OMS para responder a las emergencias producidas por enfermedades infecciosas.

A mi modo de ver, la recomendación más importante y estratégica es el llamado que se hace a los países del G20 para que, en conjunto con la Asamblea Mundial de la Salud, establezcan un plan de inversión y desarrollo tecnológico a 10 años encaminado al

estudio y elaboración de nuevas vacunas y mejores insumos en países ricos y pobres como contribución a la mitigación de futuras emergencias. Otra que me parece muy relevante es el llamado a no seguir creando nuevos centros de política global en salud que compitan con la OMS por recursos o por protagonismo. Desafortunadamente, la primera recomendación aparece en el sexto lugar de la lista, quizás porque los mismos comisionados no le dan mucha prioridad, y la segunda está escondida entre muchas otras recomendaciones sobre la OMS que me parecen menos relevantes.

Puedo estar equivocado, pero la gran mayoría de las recomendaciones, incluidas las ubicadas en los primeros lugares (seguir vacunando, usar tapabocas, fortalecer la OMS, etc.) suenan a lugares comunes. Los llamados a fortalecer la OMS se vienen haciendo desde hace muchos años ante el reconocimiento de que sus fondos han disminuido, en parte por el surgimiento de centros de pensamiento fuertemente financiados por “filántropos” con agenda propia que imponen sus prioridades a la OMS valiéndose del poder de sus chequeras. Sin embargo, hasta ahora ninguna de esas iniciativas ha prosperado y muchos comités de la OMS siguen estando en manos de los centros de conocimiento y poder globales, más o menos lo mismo que pasó con la Comisión de Lancet. Otras recomendaciones suenan utópicas, como la creación de un Consejo de Salud Global dentro de la OMS en cabeza de seis de los presidentes de los países de cada una de las regiones en que la OMS tiene oficinas y que se rotarían periódicamente. Pienso que recomendaciones como esta tienen pocas posibilidades de llevarse a cabo—pocos presidentes del mundo tienen tiempo para alejarse de sus problemas nacionales diarios y encargarse de problemas globales—y aun si se implementara, tal comité sería otro más de los tantos que no funcionan adecuadamente.

Pese a las limitaciones que señalo, y que responden exclusivamente a mis opiniones, considero que es un buen ejercicio leer el informe de la Comisión si uno quiere tener una visión global de lo que pasó con los datos de morbilidad y mortalidad a nivel global y conocer la opinión de expertos mundiales sobre las características de la respuesta dada a la pandemia por los diversos sectores de la salud alrededor del mundo.

✉ Fernando de la Hoz Restrepo, M.D. Ph.D.

Profesor titular Departamento de Salud Pública
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá
fpdelahozr@unal.edu.co

Enlace de interés

<https://www.who.int/news/item/15-09-2022-who-responds-to-the-lancet-covid-19-commission>

COVID-19 response: a massive global failure

Widespread failures at multiple levels worldwide have led to millions of preventable deaths and a reversal in progress towards sustainable development for many countries



At a national level, most governments...



The Lancet COVID-19 Commission makes 11 recommendations in three key areas of interest

Practical steps to control and understand the current pandemic

- » Establish global and national vaccination-plus strategies to end the COVID-19 pandemic
- » An intensified investigation into possible origins of SARS-CoV-2, both natural and laboratory-related

Ambitious proposals to enhance multilateralism

- » Maintain WHO as the lead institution for the response to emerging infectious diseases
- » Establish a global pandemic agreement and strengthen the International Health Regulations
- » Reform of WHO governance
- » Regulations for the prevention of pandemics
- » G20 support for finance, research and development, and the production capacities of low-income and middle-income countries
- » New Global Health Fund to ensure Sustainable Development Goal 3 (Health for All), universal health coverage, and functioning health systems

Necessary investments to strengthen the defence against future pandemics

- » Strengthen national health systems and increase investments in primary health care and public health
- » National pandemic preparedness plans
- » Financing for sustainable development and green recovery plans

Illustrations by Elfy Chiang

[Read the full Lancet COVID-19 Commission for more details](https://www.thelancet.com/infographics-do/covid-19-commission-2022)

Opinión

La humanidad llega a los ocho mil millones de habitantes y su futuro está en ascuas

Humanity reaches eight billion inhabitants and its future is in embers

 Carlos Castañeda-Orjuela

ccastanedao@ins.gov.co

Director del Observatorio Nacional de Salud, Instituto Nacional de Salud, Bogotá, Colombia

Según las proyecciones de las agencias de Naciones Unidas, el 15 de noviembre de 2022 la población mundial llegó a los 8 mil millones de habitantes (**United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022**), y sigue creciendo (**Adam, 2022**), aunque a un ritmo algo menor que en los años precedentes. Si bien la disminución de las tasas de crecimiento a nivel global se atribuye a la disminución de los niveles de pobreza, a un mayor acceso a los servicios de salud sexual y reproductiva, así como a la educación y el trabajo por parte de niñas y mujeres, también debe considerarse la influencia de los avances en salud pública en el aumento en la expectativa de vida (**Zarocostas, 2022**). Las tasas de fertilidad, expectativa de vida y mortalidad son las variables demográficas cuya dinámica e interacción influyen en el tamaño poblacional y las perspectivas de crecimiento, pero no aisladas de los contextos político, social y económico a nivel mundial.

Las perspectivas de crecimiento poblacional son diferentes dependiendo de la unidad geográfica que se analice. En países de altos ingresos, donde las tasas de fertilidad han venido reduciéndose de manera significativa, se espera que la población disminuya en los próximos años, o que por lo menos no crezca significativamente, en tanto que en los países pobres, como la mayoría de África y algunos de Asia, se proyecta un importante aumento en la población dadas las altas tasas de fertilidad y el simultáneo aumento en la expectativa de vida de sus gentes (**United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022**), a pesar de que esta sigue siendo la menor del mundo. Es así que el crecimiento poblacional no impacta de manera homogénea a las diferentes sociedades y, como ocurre con muchos otros indicadores en salud pública, es un reflejo de las desigualdades sociales y sus factores determinantes, lo que afecta de manera significativa y adversa a las personas más vulnerables y a los grupos poblacionales diversos y excluidos, y evidencia las diferencias entre países y al interior de ellos.

Este continuo aumento de la población del planeta se relaciona también con la crisis climática que ha venido anticipándose, en tanto que los compromisos de las principales potencias contaminantes para contrarrestarla, aunque no son las regiones más pobladas, no han logrado concretarse en una reducción real y significativa de las emisiones de CO₂ y los gases de efecto invernadero. (**Gugliotta, 2021**). La crisis climática se traduce en enfermedad y muerte, principalmente en los países más pobres y poblados, como consecuencia de la mala calidad del aire, la falta de acceso a agua de calidad y servicios de saneamiento básico, así como la aparición, cada vez más frecuente e intensa, de olas de calor y frío asociadas con el cambio climático, cuya frecuencia e impacto no hará más que empeorar en los próximos años si no se toman las acciones necesarias de forma inmediata. Este panorama se ve agravado con la crisis alimentaria global. Es un hecho que la humanidad ha sido incapaz de garantizar el acceso a alimentos de calidad

en cantidad suficiente para toda la población, lo que se recrudece con la presencia de conflictos armados como el de los últimos meses en Ucrania que, además de las muertes y el sufrimiento causados por la propia intervención armada, ha debilitado la seguridad alimentaria global, generando más hambre y pobreza, no solo en los sitios directamente involucrados, sino en muchos otros, como resultado de la globalización y la dependencia externa para la provisión de materias primas y alimentos.

Dado su objetivo fundamental de mejorar el bienestar de la población, la salud pública, además de hacerle seguimiento a los indicadores de los resultados sanitarios o la organización de los servicios de salud, también debe hacer un monitoreo de las condiciones que determinan tales resultados, incluidos los elementos estructurales que guían el funcionamiento de la sociedad. La salud pública debe denunciar los factores determinantes de los malos resultados en salud y del deterioro del bienestar general. Las políticas económicas, los modelos productivos, las relaciones de explotación y la inequidad que estos causan, determinan el crecimiento poblacional, el cual cataliza, a su vez, las demás crisis con impacto en salud pública que se ciernen sobre el mundo, como la reciente pandemia de COVID 19, aún no superada del todo, en la cual el tamaño de las poblaciones y su densidad tuvieron un papel fundamental.

Nuestra responsabilidad ética y moral como profesionales de la salud pública, al igual que la de las demás ciencias y disciplinas generadoras de conocimiento en salud pública y orientadoras de la formulación de políticas públicas, es poner en evidencia las consecuencias de los problemas de salud derivados del aumento de la población mundial y de la falta de garantías de los derechos fundamentales de todos los que habitamos este planeta. Los responsables de las decisiones, respaldados por la evidencia científica y el conocimiento derivado de otros campos pertinentes, deben garantizar la intervención de los determinantes sociales de la salud de sus poblaciones, y considerar sus consecuencias para el mantenimiento de los medios y sistemas de producción, los modelos económicos y los patrones de consumo. Garantizar nuestra viabilidad como especie implica abordar discusiones profundas, en ocasiones incómodas, para reflexionar sobre el planeta que les vamos a dejar a las generaciones que nos seguirán, pero también a las poblaciones que hoy no gozan de nuestros privilegios.

Referencias

- Adam, D.** (2022). World population hits eight billion — here's how researchers predict it will grow. *Nature* [Internet]; Consulta November 2022. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-03720-6>
- Gugliotta, O.R.** (2021). The Paris Agreement 5 Years Later: The Challenges of Climate Finance and Multilateral Development Banks. *Białostockie Studia Prawnicze*, 26(5), 23-40.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division.** (2022). World Population Prospects 2022: Summary of Results. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3. This report is available in electronic format on the Division's website at www.unpopulation.org. For further information about this report, please contact the Office of the Director, Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations, New York, 10017, USA, by Fax: 1 212 963 2147 or by email at population@un.org.
- Zarocostas, J.** (2022). The UN reports global asymmetries in population growth. *Lancet*, 400 (10347), 148.
-

Anexos

World Population Prospects 2022: Summary of Results

Figures and tables in this publication can be reproduced without prior permission under a Creative Commons license (CC BY 3.0 IGO), <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/>.

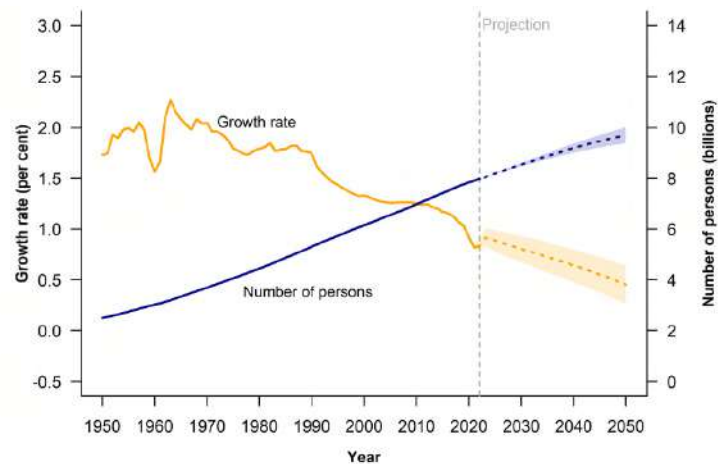
Key messages

- The world's population continues to grow, but the pace of growth is slowing down
- Rates of population growth vary significantly across countries and regions
- Levels and patterns of fertility and mortality vary widely around the world
- The population of older persons is increasing both in numbers and as a share of the total
- A sustained drop in fertility leads to an increased concentration of the population at working ages, creating an opportunity for accelerated economic growth per capita
- More and more countries have begun to experience population decline
- International migration is having important impacts on population trends for some countries
- The COVID-19 pandemic has affected all components of population change, including fertility, mortality and migration
- Population data provide critical information for use in development planning

I. A century of world population trends: 1950 to 2050

Figure I.1

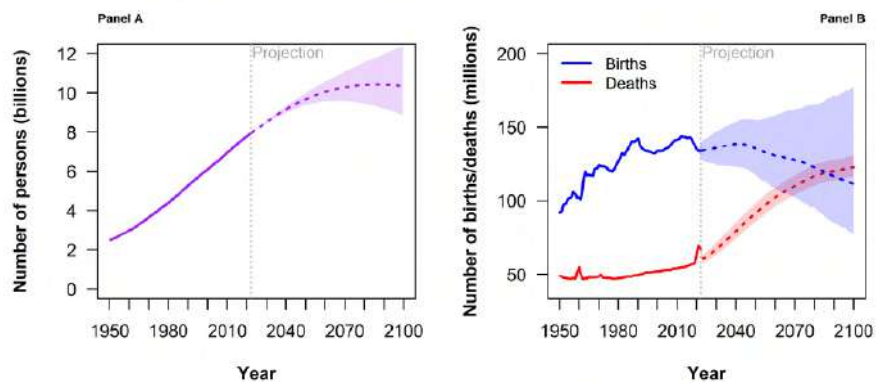
Global population size and annual growth rate: estimates, 1950-2022, and medium scenario with 95 per cent prediction intervals, 2022-2050



III. Long-range population projections to 2100

Figure III.1

Global population size and total number of births and deaths, estimates (1950-2022) and medium scenario with 95 per cent prediction intervals, 2022-2100



Opinión

Las humanidades, las ciencias sociales y el arte en la formación de los científicos

Humanities, social sciences, and art in the education of scientists

El humano es a la vez físico, biológico, psíquico, cultural, social, histórico. Es esta unidad compleja la que está completamente desintegrada en la educación a través de las disciplinas y que imposibilita aprender lo que significa ser humano. Hay que restaurar dicha unidad compleja de tal manera que cada uno desde donde esté tome conciencia de su identidad compleja y de su identidad común. Edgar Morin (1999)

Veo cuatro roles para las humanidades en Colombia hoy en día. El primero está encaminado a fomentar una cultura de pensamiento crítico y debate respetuoso, muy importante en una democracia que se esfuerza por superar profundas divisiones. Si las personas siguen viendo el debate político como un encuentro deportivo, donde el objetivo es derrotar al contrario, la paz está en serios problemas. Martha C. Nussbaum (2015)

La educación no es solo transmisión de conocimientos sino también —y fundamentalmente— el desarrollo y la liberación de la conciencia individual y colectiva de los educandos [...]. Es decir, la plena dignificación del ser humano y el desencadenamiento de su inteligencia, creatividad, afectividad, reflexibilidad, sensibilidad, vocaciones, coraje, espiritualidad, capacidad de trascendencia y todos los demás asombrosos atributos humanos. Rubén Darío Utría (2016)

Una cuestión central de la educación debería ser la formación para la democracia y el ejercicio de una ciudadanía independiente, responsable e informada, consciente de los procesos sociales y participe en el debate político. Y con razón se ha dicho que en los cursos de humanidades se puede adquirir un pensamiento crítico, así como la capacidad de comunicar y escribir con claridad.

Las humanidades no son rentables

Existe una tendencia internacional, incluso en Colombia, a debilitar o suprimir la formación en artes, humanidades y ciencias sociales en el ámbito universitario porque estas no se consideran rentables en una academia que cada vez se orienta más por las señales del mercado, la competitividad en un mundo globalizado y la preparación para los negocios.

Con propiedad señala Martha C. Nussbaum en su libro *Sin fines de lucro – Por qué la democracia necesita de las humanidades*, que las materias de ciencia y tecnología se deben impartir con la mayor calidad, pero que no debe olvidarse que la formación en artes y humanidades permite adquirir la capacidad de desarrollar un pensamiento crítico, de trascender las lealtades nacionales y afrontar los problemas internacionales como “ciudadanos del mundo” y de imaginar con compasión las dificultades del prójimo.

Hoy más que nunca es indispensable el aporte de filósofos que no escriban solo para sus colegas y revistas especializadas, sino también para los seres comunes y corrientes que intentan dar sentido a sus vidas y buscan respuestas ante las incertidumbres y desastres del mundo actual.

Es fácil vislumbrar la importancia de un semestre de filosofía dedicado a la discusión con los estudiantes a cargo de un profesor que adopte el método socrático para estimular la argumentación. Son muchos los temas vitales de los tiempos actuales que podrían plantearse como preguntas y también como una oportunidad para discutir el comportamiento ciudadano a la luz de la ética, el derecho y la cultura.

Igualmente recomendable sería un curso de historia para contextualizar las preguntas y las respuestas, conocer elementos de la trayectoria del propio país, de la región y del mundo, entender y comparar críticamente culturas diferentes a la propia y asimilar las múltiples lecciones que encierra el relato y la apreciación de acontecimientos del pasado.

Las dos culturas

La expresión corresponde a un libro de C. P. Snow, científico y novelista, tomada de su conferencia del 7 de mayo de 1959 en Londres. Es bien posible que ninguno de los asistentes al acto imaginara que iba a escuchar palabras que desatarían una de las más intensas controversias intelectuales en la historia de Occidente. Dijo el conferencista que en las sociedades avanzadas del mundo occidental no podía hablarse de la existencia de una cultura común, pues no existía comunicación, a veces, incluso, había más bien hostilidad entre los científicos y los intelectuales dedicados a las letras, y que esa situación podría impedir el empleo de la tecnología para resolver problemas básicos del mundo.

Agregó que esta incomunicación tenía graves consecuencias políticas, ya que “nos lleva a interpretar erróneamente el pasado, a juzgar mal el presente y a negar nuestras esperanzas sobre el futuro”. Snow consideró inaceptable que el término intelectual se aplicara solo a los letrados y se desconociera la existencia de una intelectualidad científica, y que los primeros tuvieran tanta influencia en las decisiones sociales en detrimento y desconocimiento de la contribución de científicos y técnicos al bienestar de las gentes después de la Revolución Industrial.

En este sentido, en su libro de 2009 *Las tres culturas. Ciencias naturales, ciencias sociales y las humanidades en el siglo XXI*, Jerome Kagan señaló que las culturas no eran dos sino tres, pues era indispensable incluir las ciencias sociales, dada la importancia que habían adquirido en la segunda mitad del siglo pasado. Debe agregarse que faltaría integrar una cuarta, la correspondiente al arte, por la capacidad de sus manifestaciones de expresar lo inefable y, además, por ser fuente potencial de conocimiento y de crítica. Por lo tanto, las culturas son cuatro, lo que lleva a evocar inmediatamente a Edward O. Wilson y su propuesta de la consiliencia de saberes o la unidad del conocimiento.

Si no se acepta plenamente la unidad del conocimiento, al menos debe reconocerse que es fundamental una interacción entre las cuatro culturas. En efecto, existe una tendencia creciente a considerar que todo problema, proyecto o investigación de cierta envergadura requiere la mirada analítica de múltiples disciplinas y profesiones como paso previo a una necesaria síntesis integradora que resuelva el asunto.

Es necesario insistir en la importancia de las humanidades, las ciencias sociales y las artes en la vida académica y extraacadémica. Debe concederse gran valor al estudio de la economía y de la economía política, y reconocer que la formación artística estimula atributos básicos de utilidad para la vida social y para cada profesión en particular. El estudio y la práctica de actividades como la música, la danza, el cine y el teatro facilitan el trabajo en equipo, la comunicación con otros y las habilidades creativas y de innovación, todo ello transferible y aplicable a otros campos. Los talleres de artes visuales, por ejemplo, permiten entender realidades y relaciones no expresables cuantitativamente o en palabras, comentario este que remite a una anécdota atribuida al gran director japonés de cine, Akira Kurosawa. Preguntado por un periodista sobre lo que había querido decir en cierta película, contestó: “Si yo pudiera expresarle en palabras lo que quise decir con la película, entonces no habría hecho la película.”

La educación y el arte

En *La República* Platón se ocupa extensamente de la educación; allí argumenta que el arte, especialmente la música debido a sus atributos de ritmo y armonía, debe ser la base de la educación. Esta noción solo vino a recibir un tratamiento de fondo en el libro ya clásico de Herbert Read *Educación por el arte* (1943). Mucho antes que Edgar Morin, Read propone una educación que integre las diferentes disciplinas y agrega que ella debe contribuir a

despertar, desarrollar e integrar dos atributos esenciales: la percepción y la sensibilidad. Son los artistas quienes más han alcanzado este último ideal y por ello tienen la capacidad de imaginar un más allá y de crear nuevas realidades.

Read ve la educación como el cultivo de los diferentes modos de expresión, de tal manera que niños y adultos aprendan a expresarse bien con sonidos (músicos, poetas, oradores), imágenes (pintores, escultores), movimientos (danzantes, obreros), y herramientas o utensilios (artesanos), todo lo cual se relaciona con el arte e incorpora facultades primordiales (pensamiento, lógica, memoria, sensibilidad e intelecto).

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, al ocuparse de unas recomendaciones de la Misión de Sabios 2019, señala que la educación en artes debe ser el medio que permita crear, compartir y divulgar el conocimiento integral con base en propósitos humanísticos, éticos y democráticos. En este sentido vale la pena detallar la histórica recomendación de la Misión en su informe final:

La práctica artística en diferentes niveles de educación debe ser nuclear y fundamental, no complementaria o accesorio. Igualmente, la educación estética no debe ser un com-partimento separado de otras materias. Por el contrario, toda la formación de nivel básico debe ser orientada con una perspectiva estética, sin perjuicio de que existan espacios específicos para el desarrollo de la expresión propiamente artística.

Se agrega más adelante que la educación artística debe ser un área fundamental del currículo, obligatoria desde la primera infancia y en todos los niveles y modalidades de la formación básica y media, y se pone de presente que es importante que sus contenidos procedan de las diferentes regiones del país, especialmente de la región donde tiene lugar el proceso de enseñanza y aprendizaje.

Asimismo, se recomienda la creación de un sistema nacional de educación y formación artística y cultural, al igual que una política nacional de educación artística y cultural. El Ministerio de Educación debe producir lineamientos para lograr transformaciones curriculares, pedagógicas y evaluativas en la primera infancia y la educación básica y media a partir de una aproximación estética, es decir, que desarrolle la percepción, la sensibilidad y la receptividad.

Un gran ejemplo de integración

En el 2017 ocurrió un hecho de innegable trascendencia y significado. Se fusionaron dos organizaciones internacionales, una dedicada a la ciencia y otra a las ciencias sociales: la primera, fundada en 1932, llevaba el nombre de Consejo Internacional para la Ciencia, y la otra, creada en 1952, recibía el nombre de Consejo Internacional de Ciencias Sociales. Con su integración se creó el Consejo Internacional de Ciencia, del cual hacen parte 40 organizaciones científicas de carácter internacional y 140 de carácter regional, que incluyen academias y consejos de investigación. Este evento constituye un reconocimiento de la necesidad de interacción entre las ciencias naturales y las ciencias sociales que se pone de presente, por ejemplo, en la investigación de los efectos globales del cambio climático. En efecto, el Panel Internacional sobre Cambio Climático incorpora en sus estudios factores climáticos, ecológicos y socioeconómicos, reconociendo, así, los graves impactos de la variabilidad climática sobre las poblaciones humanas.

Sobre la globalización y el proceso de Bolonia de la Unión Europea

Una implicación importante de la globalización sobre la universidad es la tendencia a los currículos y requisitos homogéneos, para lo cual es bueno recordar lo ocurrido con las concepciones alemana y estadounidense de la universidad. En el siglo XIX se concibió en Alemania una casa de estudios que debía reunir simultáneamente la docencia y la investigación, un modelo que fue replicado por las universidades de Estados Unidos con gran éxito en las últimas décadas. Ahora, sin embargo, se revierte la tendencia, pues es Alemania la que intenta imitar lo ocurrido allende el Atlántico.

Muy ilustrativo sobre este intercambio de modelos es la renuncia del profesor Marius Reiser a su cátedra en la Universidad Johannes Gutenberg, en Maguncia, renuncia explicada en una carta de 2009 publicada por el periódico *Frankfurter Allgemeine* y cuyo comienzo dice: “Había una vez una institución a la que llamaban universidad”. Protesta allí por las consecuencias del llamado proceso de Bolonia, un documento aprobado por diferentes instancias de la Unión Europea con el fin, entre otros, de implementar herramientas que faciliten el reconocimiento de grados y méritos académicos y la movilidad y los intercambios entre instituciones universitarias. En este contexto, los grados se homologan con los bien conocidos de *Bachelor*, *Master* y *Doctor* de las universidades de los Estados Unidos.

Al analizar algunos documentos fundamentales de dicho proceso, Reiser señala que el nuevo sistema se basa en estrategias de *marketing*, capacidad competitiva, *management* de las universidades y creación de un espacio económico basado en el conocimiento, y que en ninguna parte se habla del espíritu que exige en sí la formación, ni tampoco se reconoce que el conocimiento, el saber y la inteligencia son valores amados y ansiados por sí mismos.

Se trata de un nuevo capitalismo académico, en el cual el mercado define la relación entre educación y empleo. Ya la educación no se concibe como un bien social colectivo sino como un bien individual y una mercancía del mercado de la educación global. En ese nuevo capitalismo todo gira alrededor del lucro que proporcionan las inversiones en capital humano. Así se expresaba en 2010 la publicación *Páginas sobre política internacional y alemana* del mencionado periódico.

Dos estudios de caso

Para ilustrar algunos aspectos de lo discutido en este artículo de opinión, cabe considerar la situación actual de la ingeniería, al igual que una experiencia de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.

Los paradigmas de la ingeniería

El desarrollo de la ingeniería en el mundo occidental se puede sintetizar en tres grandes paradigmas, generalmente lineales o sucesivos, aunque a veces imbricados. Son ellos el de maestro constructor, el de la ingeniería como arte y el de la ingeniería basada en la ciencia.

Como figura cimera del primer paradigma podría citarse a Filippo Brunelleschi, diseñador y constructor de la imponente cúpula de la basílica de Santa María de la Flor en Florencia. En este paradigma, el ingeniero y el arquitecto se confundían en una sola persona que trabajaba en el sitio de la obra. Este modelo del denominado maestro constructor se dio cuando apenas empezaban a perfilarse lo que serían las futuras profesiones de ingeniería y arquitectura. Debe considerarse que en la antigüedad clásica este paradigma también lo encarnó Vitrubio.

Debido a las exigencias de la Revolución Industrial y gracias a la aparición de las primeras escuelas de Ingeniería en Francia, primero de carácter militar y luego civil, empieza a definirse la profesión como un arte, es decir, como un oficio especializado que exigía destrezas y habilidades muy elaboradas, aunque ya empezaba a afirmarse una fundamentación científica de la profesión. Este segundo paradigma dura más o menos hasta mediados del siglo XX: es el de la ingeniería como arte.

El tercer paradigma, la ingeniería con base científica, aparece después de la Segunda Guerra Mundial, cuando surgen las llamadas ciencias de la ingeniería. Podría señalarse que este paradigma se instala plenamente en el país hacia principios de la segunda mitad del siglo XX.

Hoy, con base en los atributos tradicionales que deben conservarse y otros adicionales, se propone un nuevo paradigma para el siglo XXI, el de "Ingeniero Integrador". Cuando se reconocen las diferentes dimensiones de un determinado problema relacionado con la profesión, es necesario, además del trabajo analítico tradicional, el esfuerzo de síntesis o

integración que permita llegar a soluciones que respondan a la visión multidimensional. O sea, separar para analizar y reunir para sintetizar o complejizar, de modo que el problema aparezca en su contexto natural.

Este cuarto paradigma apenas empieza a desplegarse en algunas universidades. Su cabal desarrollo constituye todo un programa para las facultades de ingeniería en los tiempos que corren, y es el que justifica la formación integral del ingeniero, es decir, su aproximación a las humanidades, las ciencias sociales y las artes.

La visión reduccionista, aquella que se concentra exclusivamente en una tarea aislada, destruye la solidaridad y la responsabilidad. Podría decirse, entonces, que el pensamiento sintético o complejo lleva consigo una misión ética y exige un trabajo interdisciplinario en el que el ingeniero adquiere un papel preponderante en razón de ciertos atributos que le han sido tradicionales y otros que le demanda la nueva situación. Para ello es fundamental que la profesión establezca un diálogo fructífero con otras profesiones y disciplinas, diálogo en el cual el punto de vista del nuevo ingeniero (por ejemplo, cuando habla de soluciones óptimas) puede ser uno de los más determinantes.

Es imperativo formar un nuevo tipo de ingeniero, más culto y más abierto al mundo, con capacidad de crítica, de interpretación y síntesis, de administración y comunicación, un profesional preocupado por los atributos éticos y estéticos de su trabajo, cuya educación integre las visiones científicas y técnicas con las humanistas y artísticas, un ingeniero cercano a la literatura y el arte en general, manifestaciones estas que, además, constituyen otras formas de conocimiento y de crítica. Por supuesto, no todo lo anterior exige asignaturas y seminarios, pues mucho puede obtenerse con actividades por fuera de los currículos y con un ambiente propicio en el campus.

El futuro de la profesión puede mirarse con optimismo si las facultades de ingeniería acometen con urgencia una revisión de las prácticas actuales, con el fin de responder a las nuevas y crecientes exigencias de las comunidades. El papel central de la ciencia y la tecnología en la actual vida social realza la potencialidad de la profesión. Pero en esa nueva visión el ingeniero debe ser muy consciente de las implicaciones políticas, sociales, económicas y ambientales de su acción; de la importancia de interactuar con otras profesiones y disciplinas; de la necesidad de acercarse a otros tipos de conocimiento; y en especial, de una visión crítica de los procesos sociales y de la propia profesión.

Las humanidades en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional

Durante la segunda decanatura de Peter Santa-María en los años sesenta, no sin dificultad y con la importante participación de los profesores Bernardo de Nalda y Daniel Ceballos Nieto, se aprobó un plan de humanidades para sustituir la situación insostenible que las reducía a un curso llamado “Cultura general”, el cual se dejaba en manos de intelectuales invitados, obligados, además, a inventarse el programa respectivo según su leal saber y entender.

La idea central del plan era incorporar un curso de humanidades cada semestre de la carrera, con una intensidad de dos horas por semana. El conjunto de asignaturas se dividía en dos partes: una básica y obligatoria para los cinco primeros semestres del pensum, y luego, una serie de cursos electivos que los estudiantes escogerían a lo largo de los cinco semestres restantes.

El tronco básico incluía asignaturas como Lenguaje, Historia, Sociología, Economía y Problemas del desarrollo, en tanto que en los cursos electivos aparecían otras como Cine o Apreciación musical. Lo anterior se complementaba con una nutrida programación extraacadémica que incluía un cine club, un grupo de teatro y otro de coro, conciertos y, en particular, conferencias que reunieron a connotadas personalidades de la época como Jorge Zalamea, Fernando González, Camilo Torres, Marta Traba, Hernando Salcedo Silva...

Todavía es posible encontrar alumnos de aquella época que agradecen la preparación que esos cursos y actividades extracurriculares les proporcionaron. Es lamentable que haya desaparecido una experiencia pionera en Colombia, encaminada a la formación integral de los ingenieros.

He de decir que para mí fue aleccionador asistir personalmente, dos décadas después, a una discusión en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) que intentaba definir una formación complementaria como la establecida por la Facultad de Minas para los estudios de ingeniería. Asistí a algunas reuniones, pues me encontraba realizando una estadía de tres meses por invitación del MIT. Me parece que es una de las pocas veces en que nos anticipamos a resolver un problema que se discutiría años después en tan prestigiosa universidad.

Darío Valencia Restrepo

Miembro Honorario Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Consideraciones sobre la crisis pesquera mundial

Considerations on the global fisheries crisis

Contribución No 554 del Cecimar, Universidad Nacional de Colombia sede Caribe

La especie *Homo sapiens* se ha encargado de convertirse en la principal amenaza para sí misma. La humanidad está presa de una sicosis suicida y consume voraz e irreflexivamente los recursos naturales del planeta. La lista de amenazas parece interminable y su sinergia está fuera de control: el cambio climático y su hermano siamés, es decir, la destrucción y desertificación de los ambientes naturales, la sobrepoblación asociada a epidemias, la inequidad, la creciente destrucción ambiental y las guerras, incluidas las nucleares, y el terrorismo. Dicen que se necesitan 1,5 Tierras para poder mantener este ritmo autodestructivo; en pocas palabras, estamos *ad portas* de la hecatombe.

Y el océano, el verdadero pulmón e hígado del planeta, está sometido a un intenso y constante bombardeo. Se pueden citar fenómenos como la creciente contaminación y acidificación, la destrucción directa e indirecta del hábitat, las especies invasoras y, por supuesto, la sobrepesca. No hay que olvidar que la pesca es una actividad económica y de supervivencia, cuyas raíces se hallan hondamente afincadas en los orígenes de la humanidad. Su filosofía sigue siendo la de los cazadores paleolíticos: extraer del medio natural la proteína animal sin reposición; el arpón y la red son prácticamente los mismos artefactos inventados hace unos 90.000 años el primero y 24.000 años la segunda.

Sin embargo, esa actividad atávica sostiene hoy a 500 millones de seres humanos, es decir más del 6 % de la población global. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) informa que el volumen de la pesca mundial es de unos 80 millones de toneladas al año, pero, en todo caso, siempre menos de 100 (FAO, 2022); se mencionan, asimismo, cifras de hasta 170×10^6 toneladas cuando se incluye la producción de la acuicultura. Además, no se puede menospreciar la pesca no autorizada, ilegal y antirreglamentaria, que perjudica claramente a los países pobres, escenario normal de las actividades piratas, y que se estima en 20 % del total global, con pérdidas económicas por encima de los 25 mil millones de dólares por año (Myers *et al.*, 2022).

La extracción sistemática de peces es una actividad sin freno. Existen grupos enteros de seres marinos, depredadores tope en las redes alimentarias, que son objeto de una persecución inmisericorde; se destacan los elasmobranquios, en particular los tiburones, acosados sin cuartel porque una porción minoritaria de los humanos consideran que con sus aletas se prepara el mejor y más estimulante de los cocidos (Acero & Polanco, 2017; El Tiempo, 2022). En el mar, paradójicamente, los animales más apetecidos suelen ser depredadores, al contrario de lo que ocurre en tierra firme. De ese modo, son objetivos pesqueros reconocidos el bacalao del Atlántico Norte (*Gadus morhua*) y el atún azul (*Thunnus thynnus*), aunque tampoco se desdénan los Clupeiformes (sardinias y anchoas), comedores de plancton capturados porque sus enormes biomasas garantizan volúmenes de millones de toneladas. Por ejemplo, a mediados de la década de los años sesenta del pasado siglo, Perú alcanzó a pescar más de 15 millones de toneladas al año de una sola especie, la anchoveta del Perú (*Engraulis ringens*), cuya talla promedio es de unos 14 cm. En este caso, el producto de la pesca no está destinado al uso directo del hombre sino a convertirse en harina de pescado para abonar campos y hacer concentrados para animales. Resumiendo, la situación mundial de la pesca no es la mejor: la FAO (2022) registra

que 60 % de los *stocks* se encuentran explotados al máximo nivel posible y otro 34 % ya sobrepasó los topes sostenibles, y las estimaciones más conservadoras sitúan en la mitad del siglo XXI el momento en que la mayoría de los *stocks* pescables colapsarán.

Nueve países atrapan el 54 % de la pesca mundial y solo China, Indonesia y Perú hacen el 30 % de las capturas. El caso de China merece particular atención, pues en unas tres décadas casi cuadruplicó los volúmenes registrados ante la FAO, de modo que desde comienzos de este siglo sus capturas anuales se aproximan o sobrepasan ampliamente los 12 millones de toneladas, es decir siempre por encima del 15 % mundial. Esta situación ha puesto en alerta a la comunidad internacional. Se conoce que el gigante asiático tiene hasta tres mil embarcaciones pesqueras diseminadas por los siete mares y utiliza enormes navíos nodrizas que aprovisionan a los pesqueros, mucho más pequeños, y almacenan el producto. Un carguero refrigerado de bandera china puede tener 14.000 m³ de espacio donde caben miles de toneladas de frutos del mar.

Utilizando tecnología satelital se rastreó la actividad de uno de esos colosos transoceánicos. Un buque determinado tuvo contacto con 70 barcos pequeños en un año. Partiendo de un puerto en su país, la gigantesca embarcación se dirige frecuentemente hacia el costado occidental del subcontinente suramericano. En las aguas frías y ricas al sur del ecuador, las flotas chinas persiguen principalmente al calamar volador gigante, *Dosidicus gigas*. El carguero en mención comienza en agosto sus actividades cerca de las Galápagos, sigue hacia el Perú un mes más tarde y regresa a su base a descargar las toneladas de cefalópodo proveniente del Pacífico suramericano. En diciembre emprende nuevamente su labor, esta vez hacia el occidente, y en enero ya está ubicado en la inmensa plataforma argentina para apoyar la labor de las embarcaciones pesqueras pequeñas (Welch *et al.*, 2022) que persiguen, en este caso, al calamar argentino aleticorto, *Illex argentinus*. De este modo, las capturas de calamares de aguas profundas se aproximan a 3 x 10⁵ toneladas, lo que representa un aumento vertiginoso en 30 años.

Quizá como forma de unirse a la onda del decrecimiento, podría agradecerse que mares netamente tropicales como los colombianos se distingan, no por las abundancias plétóricas de unas pocas especies, sino por su exuberante biodiversidad. De modo que es afortunado que esas gigantes flotillas asiáticas no frecuenten tan continuamente las aguas nacionales. Sin embargo, los colombianos no han necesitado hasta ahora el apoyo directo de ninguna potencia mundial; apelando a toda clase de métodos pesqueros legales e ilegales y en aras de un agresivo e incontrolado desarrollo, hemos logrado llevar buena parte de los recursos marinos renovables más valiosos hasta la extinción comercial. Hoy en día es casi imposible encontrar en los arrecifes nacionales, incluso en los presuntamente protegidos, peces depredadores como pargos (Lutjanidae) y meros (Serranidae) (Chasqui *et al.*, 2017), o invertebrados valorados económicamente como langostas y caracoles. Ya no existen los bancos de ostras de la Ciénaga Grande de Santa Marta, ni es posible consumir un pescado popular como la tradicional mojarra rayada (*Eugerres plumieri*), pues es escasa y sus precios son prohibitivos. Y mejor ni pensar en la realidad del sistema Magdalena-Cauca; desde hace varias décadas se escucha a los funcionarios del renglón pesquero argumentando que la producción acuícola del sistema no ha disminuido, ¡la acuicultura de la exótica tilapia (*Oreochromis niloticus*) ha reemplazado sin problemas a las depauperadas capturas pesqueras!

Aquella frase lapidaria de que Colombia vive de espaldas al mar se aproxima demasiado, desgraciadamente, a la verdad. En 40 años la pesca y las actividades relacionadas han sido administradas por distintas entidades oficiales: el Inderena, el INPA, el ICA (!) y últimamente la AUNAP. Además, se trabaja en un universo absurdo por lo irreal, pues una oficina adscrita a un ministerio maneja los recursos pesqueros, mientras que aquellos seres acuáticos que no se pescan, denominados hidrobiológicos, están bajo la administración de otro ministerio. El enorme inconveniente de ese esquema es que los animales acuáticos que los humanos quisiéramos ver en nuestras mesas se alimentan y son presas de otros seres que no le interesan al consumidor, por ende, se hace imposible conocer, entender y menos conservar los recursos apetecidos si se estudian aislados del ambiente en el que viven. Este

es un llamado a que se apoye decididamente la investigación científica de los recursos marinos y dulceacuícolas colombianos desde un punto de vista ecosistémico como único camino para que se preserven en el tiempo.

Arturo Acero P.

Instituto para el Estudio de las Ciencias del Mar, Cecimar
Universidad Nacional de Colombia sede Caribe
El Rodadero, Santa Marta, Colombia

Referencias

Acero P, A., Polanco F, A. (2017). Biodiversidad íctica de los mares colombianos: riqueza amenazada. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(159), 200-212. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.480>

Chasqui-Velasco, L., Polanco F, A., Acero P, A., Mejía-Falla, P.A., Navia, A., Zapata, L.A., Caldas, J.P. (Eds.) (2017). *Libro Rojo de Peces Marinos de Colombia*. Invemar, Santa Marta. 552 p.

El Tiempo. (2022). Incautan en Chocó una tonelada de tiburones mutilados. *El Tiempo*, 28 de noviembre, 2022.

FAO. (2022). The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. FAO, Roma. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>

Myers, S.L., Chang, A., Watkins, D., Fu, C. (2022). China tiene un gran apetito por la reserva global de pescado. *New York Times*, 13 de octubre, 2022.

Welch, H., Clavelle, T., White, T.D., Cimino, M.A., Van Osdel, J., Hochberg, T., Kroodsmma, D., Hazen, E.L. (2022). Hot spots of unseen fishing vessels. *Science Advances* 8, eabq2109. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abq2109>

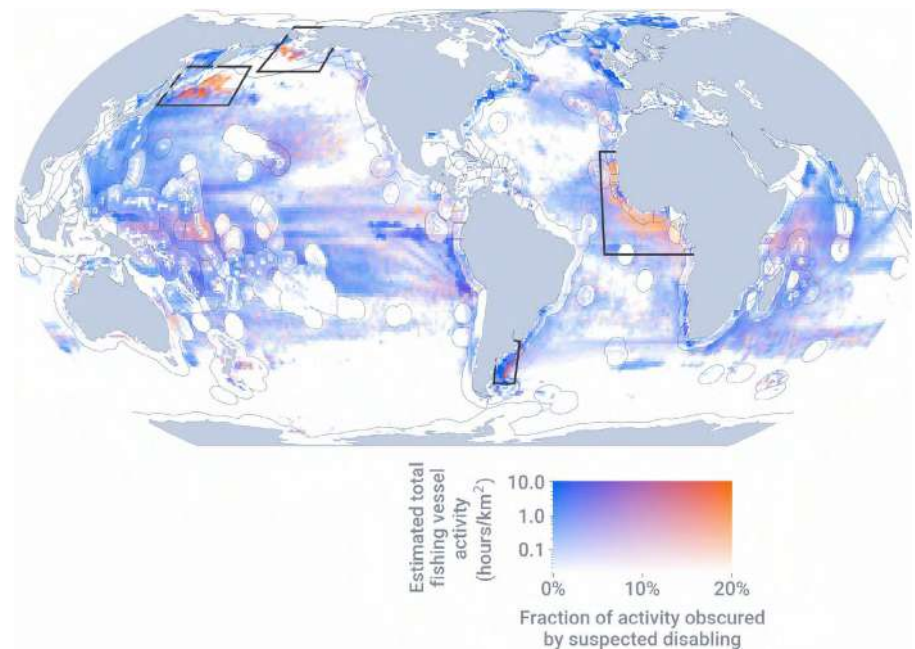
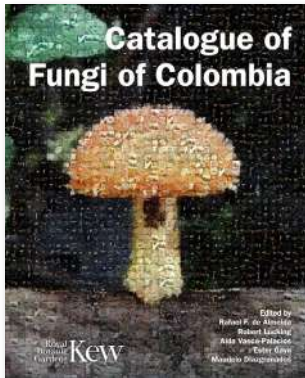


Fig 1. Estimated total fishing vessel activity and the fraction of this activity obscured by suspected disabling events in areas with sufficient satellite reception quality (>10 positions/day). Areas with the highest fishing vessel activity and the highest fraction of activity obscured by disabling occur in three regions of IUU concern: near Argentina and West Africa and in the Northwest Pacific (black boxes). In contrast, fisheries in waters near Alaska, USA are some of the most intensively managed in the world.

Comentario bibliográfico



https://www.researchgate.net/publication/365295495_Catalogue_of_Fungi_of_Colombia

Rafael F. de Almeida¹, Robert Lücking², Aída Vasco-Palacios³, Ester Gaya⁴, Mauricio Diazgranados⁴ (Editors)

¹ Universidade Estadual de Goiás, Quirinópolis, Brazil

² Botanischer Garten und Botanisches Museum, Berlin, Alemania

³ Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

⁴ Royal Botanic Gardens, Kew, Richmond, Reino Unido

Publicada por: Royal Botanic Gardens, Kew & Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. ISBN: ISBN 978-1-84246-790-9; eISBN 978-1-84246-791-6. Projects: Hongos de Colombia. Useful Plants and Fungi of Colombia

Catálogo de los hongos de Colombia Catalogue of fungi of Colombia

“El maravilloso mundo de los hongos, una de las formas de vida que habita el planeta Tierra desde hace más de 500 millones de años”

El *Royal Botanic Gardens* (Kew) del Reino Unido y el Instituto Humboldt de Colombia se complacen en presentar el Catálogo de hongos en Colombia, obra única en su contenido. Este valioso documento recopilado en 16 capítulos, es el resultado de innumerables expediciones que contaron con el concurso de 48 investigadores y diversas instituciones nacionales y extranjeras que han aportado al conocimiento de nuestros hongos a lo largo de más de 200 años.

Colombia se cuenta entre los 17 países megadiversos del mundo, con casi el 10 % de la biodiversidad del planeta. Es el primer país en cuanto a la diversidad de aves y orquídeas, ocupa el segundo lugar en anfibios, mariposas y peces de agua dulce, el tercer lugar en palmeras y reptiles y el cuarto lugar en mamíferos. La diversidad de los hongos en Colombia no se conoce bien; hasta el presente se han registrado 7.241 especies, es decir, el 5 % de las conocidas en el mundo. En ese total se incluyen las especies liquenizadas y los organismos similares a los hongos.

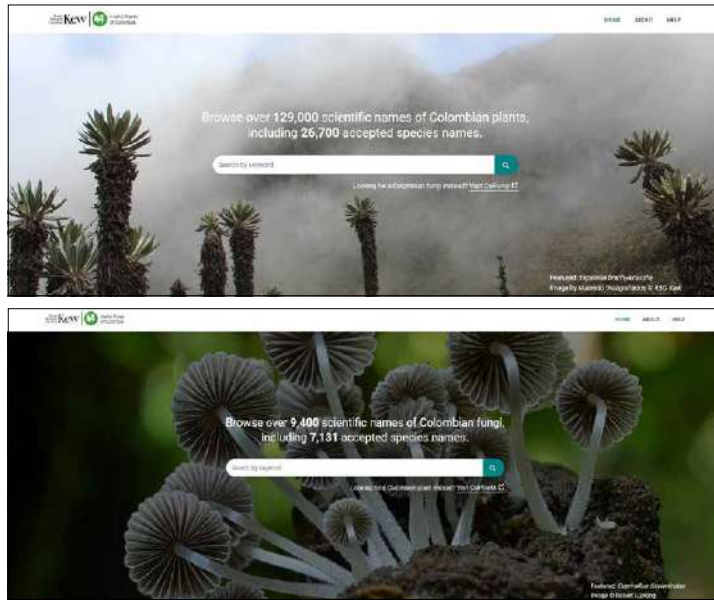
El conocimiento de los hongos acumulado durante los últimos 500 años ha conducido a grandes descubrimientos, de los cuales quizás el más célebre sea *Penicillium notatum*, organismo hallado por Alexander Fleming que dio lugar al desarrollo de los antibióticos, y otros de importancia en la alimentación humana, como *Agaricus campestris*, el famoso champiñón, además de aquellos empleados en la biotecnología para el desarrollo de medicamentos.

Este invaluable documento, bellamente ilustrado con imágenes impecables, constituye el primer registro completo de las 7.241 especies de hongos registradas en Colombia, pertenecientes a 455 familias y 1.790 géneros, lo que evidencia una vez más la inmensa biodiversidad de nuestro país debida a su ubicación geográfica y a su gran riqueza de ecosistemas y climas, lo que ha significado que ocupe el segundo lugar en el mundo después de Brasil, un país siete veces más extenso. Cabe señalar que dicha riqueza es vulnerable a la extinción, fenómeno que ya amenaza a plantas y animales por el uso indiscriminado de fungicidas y por los efectos del cambio climático.

A nivel global, los Ascomycota constituyen el filo o división más diversa entre los hongos, con 92.725 especies. Estos hongos pueden ser saprofitos, patógenos de animales, plantas y otros hongos, o simbioses en asociación con algas, como los líquenes, o como las ectomicorrizas y los endófitos en mutualismo con plantas. Vale anotar que mientras en el mundo los líquenes corresponden al 13 % del total de las especies de Ascomycetes registradas, en Colombia corresponden al 52 % de las especies anotadas en ColFungi. Los hongos liquenizados constituyen una parte sustancial de la riqueza colombiana de hongos, con 2.670 de las 7.241 especies registradas en el catálogo.

Hay una gran diversidad de hongos pertenecientes al filo Basidiomycota asociados con las royas y carbonos, los cuales se caracterizan por ser patógenos obligados de plantas vasculares que también son muy diversas. Las royas pertenecen al orden Pucciniales (Pucciniomycotina) y los carbonos a diversos órdenes de Ustilaginomycotina y desde tiempos remotos ambos se conocen porque atacan los cultivos de cereales como el trigo (afectado por la roya *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* o por el carbón *Ustilago tritici*). El inventario de royas de Colombia incluye 493 especies y el de carbonos 71, además de 10 especies de levaduras del orden Exobasidiales (Ustilaginomycotina).

En Colombia se registra una gran diversidad de hongos pertenecientes a la clase Hyphomycetes en los bosques amazónicos de tierras bajas, con un registro de 524 especies, pero con un número estimado entre 638 y 975. Además, se ha catalogado un número



ColPlantA (<https://colplanta.org/>) and ColFungi (<https://colfungi.org/>) site homepages.

elevado de especies (474) en los bosques de roble, representado en su mayoría por especies de ectomicorrízicos, lo que lo ubica en el segundo ecosistema más abundante en especies de hongos del país, con una riqueza estimada entre 566 y 847 especies.

Se presenta, asimismo, una lista de 382 especies de hongos útiles clasificadas en ocho categorías generales de uso. La de mayor número de usos es la de alimentos, seguida de los usos medicinales. El empleo de los hongos ha acompañado el desarrollo del bienestar humano desde los albores de la civilización enriqueciendo la dieta con nuevos productos, aumentando la asimilación de fuentes vegetales e, incluso, contribuyendo a la conservación de las fuentes de proteína.

La biodiversidad biológica de Colombia se refleja en la flora, la fauna y los microorganismos, incluidos los hongos. Sin embargo, los hongos parecen ser elementos invisibles, desestimados por los responsables de las políticas de conservación y excluidos de los instrumentos legales que protegen las especies y los ecosistemas del país. Esta desatención se debe en parte al desconocimiento que se tiene de ellos. Considerando que este es un país de diversidad fúngica, se espera que haya cerca de 300.000 especies, de las cuales se conocen, como ya se mencionó, solamente 7.241, incluidos 2.670 hongos liquenizados.

En resumen, el catálogo presenta una lista de verificación completa de los hongos de Colombia y es uno de los resultados centrales del proyecto Plantas y Hongos Útiles de Colombia, UPFC, desarrollado por un equipo multinacional de investigadores. La lista incluye taxones supraespecíficos, especies aceptadas y autores, sinónimos y autores, nombres comunes, origen de las especies, información geográfica (regiones, departamentos, rango de elevación), modo trófico, especies y familias hospedantes o en asociación, estado de conservación global y nacional y evaluaciones de riesgo de extinción para nombres aceptados, así como el nivel 1 de la categoría de uso. Por su valioso contenido, se recomienda esta obra como libro de consulta para estudiantes, investigadores y legisladores.

Comentario final: *Nos sorprende la capacidad de reproducción de la especie humana, que acaba de superar los 8.000 millones, pero es insignificante al compararla con la capacidad de reproducción de los hongos: por ejemplo, **Fomes aplanatus** de la clase Hyphomycetes, puede producir 5,4 trillones de esporas en solo seis meses, equivalente a 30 billones de esporas por día, 1,25 billones por hora, 21 millones por minuto y 350.000 por segundo.*

Jairo Castaño-Zapata, Ph.D.

Miembro de Número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Contents

	Preface	7
	Executive Summary	11
	Foreword	13
	Acknowledgements	15
	List of Contributors	17
Chapter 1	The Useful Plants and Fungi of Colombia (UPFC) project: delivering mycological knowledge to support conservation and sustainable development	19
Chapter 2	Two Centuries of Mycological History in Colombia	33
Chapter 3	Diversity of Fungi of Colombia	45
Chapter 4	Diversity of Basidiomycota in Colombia	49
Chapter 5	Diversity of Non-Lichenised Macro-Ascomycota of Colombia	67
Chapter 6	Diversity, Ecogeography, and Importance of Lichens of Colombia	77
Chapter 7	Diversity of Environmental Yeasts of Colombia: A Systematic Review	93
Chapter 8	Micromycetes of Colombia: Focusing on the Hidden Diversity	105
Chapter 9	Diversity of Rust and Smut Fungi of Colombia	113
Chapter 10	A Critical Assessment of Biogeographic Distribution Patterns of Colombian Fungi	121
Chapter 11	Diversity, Functional Groups, and Community Structure of Fungi of Colombia	139
Chapter 12	Useful Fungi of Colombia	151
Chapter 13	Biotechnology of Fungi of Colombia	165
Chapter 14	Fungal Conservation in Colombia	175
Chapter 15	Fungi in Colombian and International Biological Collections	189
Chapter 16	Annotated Checklist of Fungi of Colombia	209
	Checklist	216
	Laminae	427
	Index of Families	459
	Index of Genera	463
	Alphabetical List of Synonyms	473
	Alphabetical List of Misapplied and Doubtful Names	507

CHAPTER 3

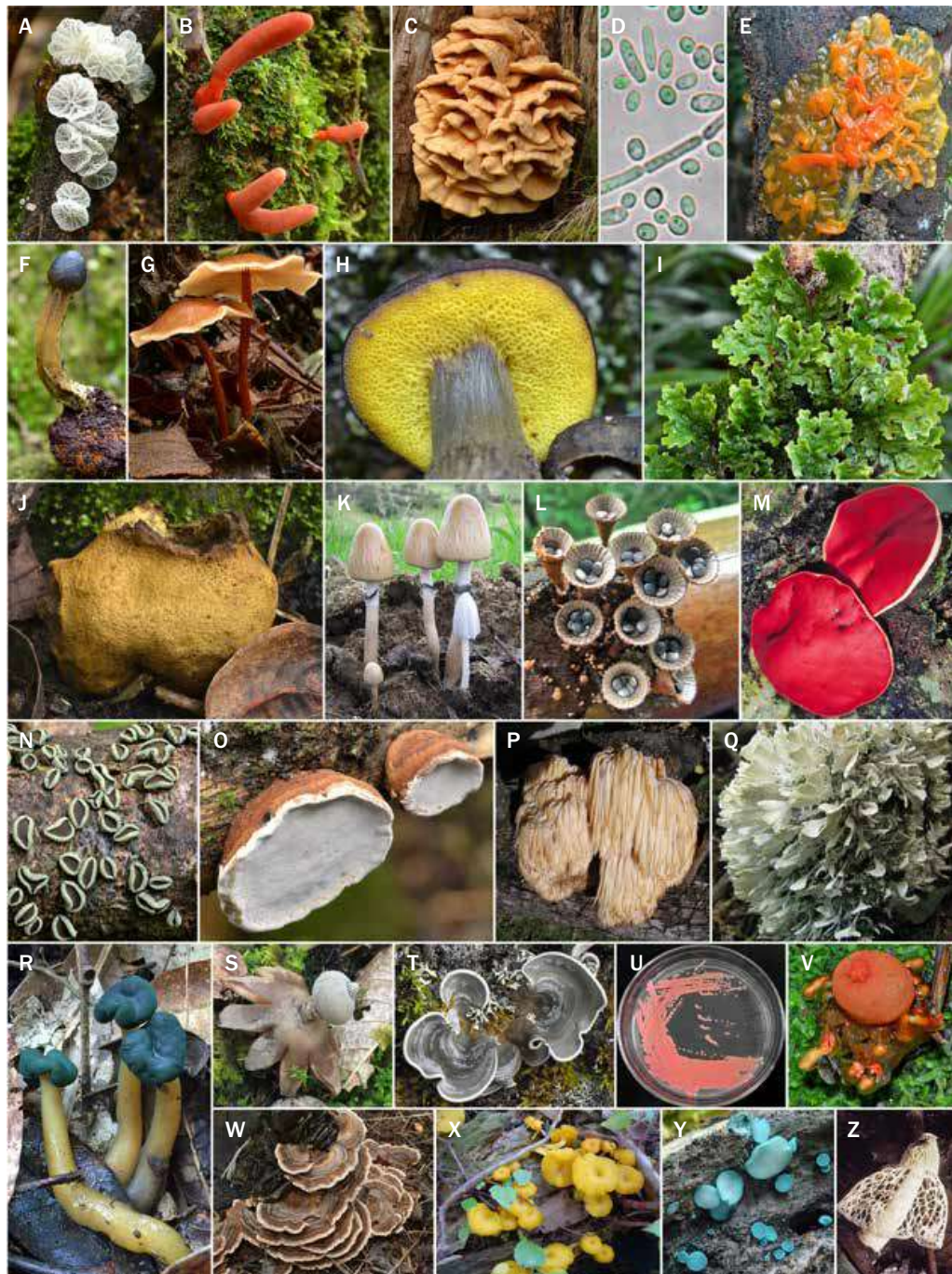


FIGURE 2. Examples of fungi of Colombia representing a diversity of lifestyles and phenotypes of spore-bearing structures. **A** *Campanella caesia*. **B** *Cordyceps nidus*. **C** *Laetiporus sulphureus*. **D** *Candida* sp. **E** *Auricularia mesenterica*. **F** *Tolyposcladium capitatum*. **G** *Laccaria laccata*. **H** *Boletus* sp. **I** *Yoshimuriella peltigera*. **J** *Scleroderma flavidum*. **K** *Panaeolus semiovatus*. **L** *Cyathus striatus*. **M** *Phillipsia domingensis*. **N** *Rhytidhysterium columbiense*. **O** *Cerioporus scutellatus*. **P** *Hericium erinaceus*. **Q** *Hydnopolyporus fimbriatus*. **R** *Leotia lubrica*. **S** *Gaeastrum pectinatum*. **T** *Cora elephas*. **U** *Rhodotorula* sp. **V** *Calostoma cinnabarinum*. **W** *Trametes versicolor*. **X** *Collybia plectophylla*. **Y** *Chlorociboria aeruginascens*. **Z** *Phallus indusiatus*. Photographs: A, B, C, F, G, I, J, N, O, Q, T, W, Y: Robert Lücking. D, U: Mauricio Ramírez. E, L, R, S: Aída Vasco-Palacios. H, V: Bibiana Moncada. K, M, P, Z: Ana Esperanza Franco-Molano. X: Ana Cristina Bolaños.

In Memoriam



Ernesto Guhl Nannetti

El pasado 25 de julio de 2022, luego de una larga enfermedad, falleció en Bogotá Ernesto Guhl Nannetti, académico de número de esta Academia reconocido por sus contribuciones al ambientalismo en Colombia. Aunque muchos miembros de la Academia conocen sus aportes, tal vez no saben cómo su vida personal se entretejió con su trayectoria profesional y académica. En este corto obituario me propongo describir algunos de los hitos más importantes de ese entramado.

Ernesto Guhl Nannetti nació en Bogotá en el seno del hogar conformado por Ernesto Guhl Nimtz, ciudadano alemán de larga trayectoria académica y uno de los pioneros de la geografía en Colombia, y Ana Luisa Nannetti, una de las primeras mujeres que obtuvo una posición permanente en la Orquesta Sinfónica Nacional de Colombia. Ernesto hijo fue el primogénito de los cuatro hijos de la familia Guhl Nannetti. Desde muy niño vio cómo su padre viajaba por todo el país, tratando de comprender la exuberancia y la diversidad de la geografía ecuatorial, tan distinta a la de su nativa Alemania. Cuando ya tuvo edad suficiente para acompañar a su padre, Ernesto hijo participó en muchos de estos viajes, que le ayudaron a entender las dimensiones ambientales y sociales del país. Ernesto Guhl Nannetti estudió en el Gimnasio Moderno, en donde la formación liberal basada en los métodos innovadores de Ovidio Decroly y María Montessori contribuyó a fomentar su curiosidad y su afán de aprender. Una de las cosas que mi padre mencionaba con más cariño de su paso por el colegio eran las clases de observación en que se llevaba a los estudiantes a algún lugar para que observaran cuidadosamente lo que ocurría allí y lo consignaran todo en un diario. En ellas mi padre desarrolló la capacidad de observación que lo caracterizaría el resto de su vida. También fueron importantes en su formación las excursiones del colegio a muchos lugares de la geografía nacional. Entre las que más honda impresión le causaron recordaba aquellas en que tomaban el barco de vapor por el río Magdalena y la visita en que conoció el mar, donde él se sentía siempre muy a gusto. También marcaron mucho a mi padre los viajes en los que los dos Ernestos pudieron participar, muchos de ellos con la anuencia del colegio. Mi papá rememoraba las anécdotas del viaje que mi abuelo y el padre Ramírez hicieron por tierra hasta la ciudad de Quito. Mi papá era el encargado de llevar la bitácora de viaje, en la que anotaba los tiempos de viaje, el estado de las vías y los lugares por los cuales pasaban y sus características. Esta misma tarea la tuve yo en muchos de los viajes que luego hicimos en familia.

Ya graduado como bachiller, en 1960 entró a estudiar Ingeniería Civil en la Universidad de los Andes. En ese entonces los estudiantes de ingeniería de los Andes completaban su formación en alguna universidad de los Estados Unidos, por lo que mi papá se graduó de ingeniero civil de la Universidad de los Andes y de la Universidad de Notre Dame, en South Bend, Indiana, donde vivió dos años y se interesó en la ingeniería de transportes. A su regreso a Colombia se vinculó a la firma de ingenieros consultores Salgado, Meléndez y asociados y su primer trabajo tuvo que ver con la adecuación de la vía de Bogotá a Villavicencio. Recorrió y conoció la zona de influencia de la carretera con mucho detalle. Después trabajó en la Corporación Financiera del Transporte, donde estuvo a cargo de la construcción de los primeros terminales de transporte del país y desempeñó un

papel importante en la modernización de los buses y camiones del país. Su trabajo en esta entidad lo llevó a viajar por todo Colombia, muchas veces con su familia. Recuerdo esos viajes a Popayán, Neiva, Ibagué, y cómo a lo largo del recorrido mi papá nos contaba sobre el paisaje, la gente y cómo vivía, y la historia de los sitios por los que íbamos pasando.

Posteriormente trabajó como ingeniero consultor en varias firmas, y a finales de la década de 1970 se vinculó como profesor de cátedra a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. A pesar de su experiencia en transporte, el curso que dictó no era sobre este tema, sino de Geografía Económica de Colombia. En sus clases se empeñaba en que los jóvenes ingenieros comprendieran la heterogeneidad del territorio del país y pensarán en soluciones acordes con sus distintos contextos. Unos años más tarde se vinculó de manera permanente a esta Universidad, combinando las labores docentes con las administrativas. Fue decano de Ingeniería y en esa calidad impulsó la reforma de las mallas curriculares con el fin de incorporar un componente de formación humanística, y luego, como vicerrector, contribuyó al fortalecimiento de la institución.

Sus intereses de investigación fueron muy diversos durante su vinculación a Uniandes. Naturalmente, trabajó en temas de transporte e hizo publicaciones sobre los tiempos de viaje entre distintos lugares del país. Sus intereses en ciencia y tecnología lo llevaron a investigar sobre el tema, a colaborar en los cursos de formación humanística y, dado su conocimiento del país, diseñó con otros profesores un curso que se llamó “Colombia hoy”. También en esta Universidad fueron consolidándose sus intereses en temas ambientales. A principios de la década de 1990 su contribución fue clave para que se publicaran libros como “Nuestro futuro común”, “Por el bien de la Tierra”, y “La Suerte de la selva”, entre muchos otros; asimismo creó un Centro de Estudios Ambientales en el que se sembró la semilla del interés por dichos estudios en muchos profesores y estudiantes de la Universidad.

Durante el gobierno de Ernesto Samper Pizano fue designado como viceministerio de Medio Ambiente y contribuyó a poner en marcha la institucionalidad ambiental del país. Uno de los logros más relevantes de su paso por el ministerio fue la puesta en marcha de los institutos de investigación que conforman el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Mi padre mencionaba cómo fue buscando a las personas idóneas para ejercer como los primeros directores de estos institutos, que, a pesar de todas sus debilidades, representan una gran fortaleza de la institucionalidad ambiental en el país. Desde el ministerio logró vincular a profesionales en distintas áreas y formar una generación de ambientalistas, muchos de los cuales están hoy a cargo de la gestión ambiental del país. Hasta los últimos días de su vida estuvo involucrado de manera muy activa con el Sinchi, el Invemar y el Instituto Humboldt.

En 1997 se retiró del Ministerio de Medio Ambiente y creó el Instituto Quinaxi para el Desarrollo Sostenible, que se convirtió en un espacio para centrar la gestión ambiental en los ámbitos local y regional y reflexionar sobre los retos ambientales del país. Fue desde Quinaxi que su pensamiento ambiental se fue refinando, y donde las interacciones con otras figuras del ambientalismo colombiano se profundizaron y contribuyeron de manera muy importante y pertinente a los debates ambientales del país. Fue en esta época cuando mi padre me ayudó a escoger mi camino en la vida, en la academia, la geografía y el ambientalismo.

Respaldo por su experiencia, el pensamiento de mi padre fue siempre muy agudo en la empresa de entender la dimensión ambiental desde la complejidad. Una de sus críticas frecuentes a la gestión ambiental era que las propuestas para enfrentar los problemas usualmente eran fragmentadas y su enfoque no reflejaba las interconexiones entre lo ambiental, lo político, lo social y lo económico.

Publicó tanto artículos y libros académicos como reflexiones en periódicos y revistas y desde Quinaxi continuó su labor docente como conferencista invitado en distintos escenarios. Pero tal vez es su último libro “Antropoceno: la huella humana. La frágil senda hacia un mundo y una Colombia sostenibles”, publicado en coedición de la Pontificia Universidad Javeriana y la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, el que plasma con más claridad sus aportes intelectuales al ambientalismo en el país. Como lo dijo él mismo en varios de los eventos de lanzamiento del libro, pasó 40 años pensando en él y tres años escribiéndolo. Este libro representa el legado de mi padre y, como lo han señalado distintos ambientalistas, su lectura debería ser obligatoria para cualquier estudiante interesado en el medio ambiente y en la relación entre sociedad y naturaleza.

Andrés Guhl Corpas

Profesor Asociado, Departamento de Historia y Geografía, Universidad de los Andes
Correo: aguhl@uniandes.edu.co

Agradecimientos - Acknowledgements

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 46, números 178, 179, 180 y 181.

El comité editorial de la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales expresa sincero agradecimiento a los revisores que han participado durante el año 2022, en la valoración crítica de los artículos presentados a la revista, por su valiosa contribución, esfuerzo y tiempo dedicado.

Alberto Gómez	Freddy Rafael Pérez	Marcela Jaramillo
Aldair Rosero	Gabriel Roldán	Margarita Jaramillo
Andrés Cárdenas Rozo	Gerardo Antonio Aymard Corredor	María Cristina Carrasquilla Ferro
Andrés Rodríguez Toro	Germán Antonio Pérez Alcázar	María Guiomar Nates Parra
Ángel Salazar Martínez	Gloria María Restrepo	María Piedad Baptiste
Ángela Hernández	Guillermo Duque	María Sagrario Millán García-Varela
Ángela Stella Camacho Beltrán	Guillermo Páramo	María Teresa Rúgeles
Armando Espinosa	Gustavo Niño-Vega	Mario Alberto Quijano
Arturo Acero	Hanz Yecid Ramírez	Mario Zapata
Becher Quinodoz	Héctor Ramírez-Chávez	Mauricio Ruiz
Benjamín Alonso Fernández	Hernando Campos	Mauricio Salazar Yepes
Carlos Arturo Parra Vargas	Horacio Torres Sánchez	Michael Vega
Carlos Lasso	Jaime Humberto Escobar	Mónica Díaz
Carolina Castellanos Castro	Jaime Ricardo Cantera	Nicolás Castaño
Carolina González	Javier Colmenares	Paola Lasso
Clara Helena Sánchez	Jesús Orlando Rangel Churio	Pedro Filipe de Brito Brandão
Claudia Nohemy Montoya Estrada	John W. Taylor	Pedro Prieto
Claudia Urueña	Joaquín Pelkowski	Robert Lücking
Claudia Verónica Luna	John Fredy Barrera Ramírez	Roberto Daniel Torroba
Críspulo Enrique Deluque toro	Jorge Podestá	Rocío Alexandra Ortíz Paz
Darwin Morales	José Alexander Álvarez Bustamante	Román Eduardo Castañeda-Sepúlveda
David Díaz Escandón	José Daniel Pabón Caicedo	Sergio Solari
Diana Castaño	José Gregorio Portilla Barbosa	Silvia Alicia Flores
Diego Fernando Córdoba	José Jaime Henao Osorio	Silvia Lucía Villabona González
Diego Fernando Simijaca Salcedo	José Manuel Gutiérrez Jiménez	Sonia Luz Albarracín
Donald Taphorn	José María Rincón	Sonia Moreno Guáqueta
Edison Osorio	Julián Rojas-Morales	Vianny Plaza
Eduardo Bagagli	Karol Prieto	Víctor Julio Setina
Edgar Darío Obando Paredes	Kiliany Karcia	Víctor Manuel Martínez Arias
Edgar Rueda	Lederson Gañán Betancur	Víctor Pacheco
Edgardo Londoño-Cruz	Leider Palacios Palacios	Whady Felipe Flórez Escobar
Eduardo Posada Flórez	Ligia Edith Zamora Alfonso	Yasmin Alomia
Edwin Cadena	Luis Carlos Arboleda Aparicio	Yuliana Serna
Enzo Aliaga Rossel	Luis Enrique Cuca	Zbigniew Jaroszewicz
Fabián Moreno Rodríguez	Luisa Fernanda Cardona Piedrahita	
Felipe Guhl	Luz Gidia Gil	
Francisco Antonio Villa	M. Gonzalo Andrade-C.	

Índice de autores - Index of Authors

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 46, números 178, 179, 180 y 181.

- Aarom Llanos, 550
Adriana Gracia C, 426
Adriana Sánchez, 769
Alberto Gómez Gutiérrez, PhD FLS, 438, 570, 577, 685, 863
Alejandro Molina, 50
Alejandro Navarro-Morales, 959
Alejandro Salazar, 769
Alex Enrique Ordóñez-Hoyos, 169
Alex Mauricio Jimenez-Ortega, 108, 690
Alexander Carvajal-Florian, 426
Alexander Henao, 482
Alexander More, 393
Alexander Velasquez-Valencia, 460
Alexis Jaramillo-J, 90
André Aptroot, 751
Andrés Franco-Herrera, 406, 567
Andrés Rosales-Rivera, 656
Ángela M. Rendón, 769
Angela María Guzmán Hernández, 920
Angela Stella Camacho-Beltrán, 580
Antony Apeño, 182, 380
Arturo Acero P., 1047
Astrid Blandón, 50
Atilon Vasconcelos de-Araújo, 217
Benjamín Quesada, 769
Bernardo Gómez Moreno, 587
Camilo Bayona-Roa, 939
Carlo D. Rojas, 482
Carlos A. Parra Vargas, 628
Carlos Alberto Andrade-Amaya, 758
Carlos Arias, 325
Carlos Blanco-Cervantes, 137
Carlos Castañeda-Orjuela, 1038
Carlos David Otálora-Rincón, 406
Carlos Jaramillo, 482, 769
Carlos Villacís, 311
Catalina González, 769
Catherine Jaller, 27
César Pulgarín, 832
Clara Inés Giraldo-Aristizábal, 169
Clara Villegas-Palacio, 769
Clarice Maia-Carvalho, 217
Clécio Souza Ramos, 1002
Críspulo E. Deluque Toro, 628
Cristhian Raúl Rossi-La Torre, 947
Cristian Andres Collazos-Astudillo, 959
Cristian Guzmán-Soto, 206
Daneska Urbina, 985
Daniel Felipe Chau-Rojas, 356
Daniel R. Matute, 866
Daniel Ruiz-Carrascal, 769
Darío Valencia Restrepo, 1041
Darly Gabriela Muñoz-Lara, 169
David A. Landínez Téllez, 628
David Soto, 50
Dayenari Caballero, 482
Diana López, 233
Diana María Quintana-Saavedra, 758
Diana Ochoa-Balbacea, 182
Diego Giraldo-Cañas, 742
Diego Huseth Ruiz-Valderrama, 959
Diego Jaramillo, 939
Diego Malca-Rodríguez, 971
Diego Ossa-Calderón, 460
Dolors Armenteras, 248, 769
Dora Janeth García-Jaramillo, 714
Dora Nancy Padilla-Gil, 372
Edgar E. González-Jiménez, 339
Edier Soto Medina, 165, 751
Eduino Carbonó-Delahoz, 154
Elayne Cristina de Oliveira, 1002
Estefanía Arredondo-Ferrer, 233
Estela Quintero-Vallejo, 769
Etna Milena Sánchez-Castelblanco, 675
Favián Arenas, 325
Fernanda Viana-Diniz, 217
Fernando de la Hoz Restrepo, M.D. Ph.D., 1034
Flavia Rivera-Cáceda, 985
Freddy Moreno-Cárdenas, 1010
Gabriela Tubón-Usca, 7
Gabriela Vaca-Altamirano, 7
Galileo Violini, 834
Gentil Ayala-Vivas, 514
Gerardo Tibaná Herrera, 565
German Blanco-Cervantes, 137
Germán Otalora, 27
Germán Poveda, 769
Germán Y. Ojeda, 482
Gheny Krigsfeld Shuster, 482
Giovanni Jiménez-Sánchez, 769
Harley Quinto-Mosquera, 514
Harry Gutiérrez, 514
Héctor Aponte, 182, 380, 730, 971, 985
Heliana Arias, 550
Henry Copete, 50
Horacio Torres-Sánchez, 646
Hugo Mantilla-Meluk, 108, 690
Irma Quintero-Pertuz, 154
Irvin Tubón-Usca, 7
Isabel C. Hoyos, 769
Isai Sánchez, 393
J. Alejandro Martínez, 529, 769
J. Orlando Rangel-Ch., 90
J. Silva-Valencia, 877
Jacobo Arango, 769
Jaime Aguirre-Ceballos, 356
Jaime H. Escobar, 482, 769
Jaime R. Cantera K., 567
Jairo Castaño-Zapata, Ph.D., 118, 714, 1050
Jairo Roa-Rojas, 628
Janet Barco, 769
Javier A. Cuervo Farfán, 628
Javier Vallejos, 393
John Fredy Barrera-Ramírez, 68
John M. Gonzalez, 27
Jonard David Echavarría-Rentería, 108
Jorge Cuéllar-Moyano, 1010
Jorge Martín Molina-Escobar, 50
José A. Cadena Zuluaga, 1031
José D. Pabón, 769
José Gregorio Portilla Barbosa, 819
José Rancés Caicedo-Portilla, 959
José Vallejos, 393
Jovanna Vanessa Ramos-Angulo, 131
Juan C. Ortiz, Mario Conde, 795
Juan C. Villalba-Malaver, 169
Juan Camilo Vieda-Ortega, 356
Juan Camilo Villegas, 769
Juan Carlos Agudelo-Martínez, 470
Juan Carlos Santos-Barbosa, 27
Juan F. Salazar, 769
Juan G. McEwen, 866
Juan Manuel López-Vásquez, 118
Juan P. Ramírez, 959
Juan Pablo Heredia-Martín, 675
Juana Ángel, 811
Juan-Manuel Anaya, 1031
Kristinne Echávez-P, 154
Laura D. Villegas, 769
Laura Johana Mojica-Candela, 470
Leila Priscila-Peters, 217
Leison Palacios-Mosquera, 108, 690
Libor Šmejkal, 617
Lidis María Martínez-Cuesta, 192
Lina Berrouet, 769
Lina I. Ceballos-Bonilla, 769
Lina María Acosta-Hílamo, 169
Lina María Correa-Guarnizo, 460
Linda Jaramillo, 50
Lorena Urbano, 131
Luis F. García, 815
Luis J. Hernández, 27
Luisa M. Cano, 529
M. Alejandra Carmona, 529
Manuel D. Zuluaga, 769
Manuel Franco, 811
Marcela Guevara-Suárez, 27
Marcela Jaramillo, 261
Marcílio Fagner Fontes Silva, 1002
Maria Francineide Ribeiro-Gomes, 217
María Mercedes Zambrano, Ph.D, 807, 1028
Marie Jöelle Giraud-López, 356

Martha Patricia Ramírez-Pinilla, 697
Mauricio Rivera-Correa, 585
Melizza Tobias-Loaiza, 206
Moisés Wasserman, 999
Mónica Sirley Celis-Granada, 460
Natalia Hoyos, 769
Nathaly Pérez-Muñoz, 169
Nelson Ceballos-Aguirre, 714
Néstor Pérez-Buitrago, 470
Oscar J. Mesa, 769
Oscar M. Gómez, 866
Paola A. Arias, 529, 769
Paul Laissue, 1031
Paúl M. Velazco, 690
Paula Irene Polanía-Zenner, 406
Paulo César Tigreros-Benavides, 406
Peter Paul Bunyard, 823
Rafael González-Hernández, 617
Renzo P. Piana, 393

Richard Guzmán-Martínez, 758
Robert Lücking, 751
Robert Salazar, 574, 939
Roberto González, 617
Robison Buitrago-Sierra, 233
Robyn D. Appleton, 393
Rolando Barahona, 769
Román Castañeda, 899, 902
Rosana Pérez, 325
Sandra Carlina Rivas-Zúñiga, 169
Sandra M. Patiño-Rojas, 261
Santiago Arango-Aramburo, 769
Santiago Bustamante-Granada, 714
Santiago Vargas-Domínguez, 1010
Sara C. Vieira, 769
Sebastián Escobar-Florez, 482
Sebastián Gomez, 482
Sebastián López, 50
Sergio Andrés Mejía Macía, 496

Sergio Antonio Lizcano-Gutiérrez, 697
Sergio Gonzales, 182, 730
Silvia Patricia López-Zapata, 714
Silvia Restrepo, 27
Víctor Danilo Palacios-Mayoral, 108, 690
Victor H. Guerrero-Palomino, 971
Viktor V. Lemesenko, 36
Walter Ricardo López, 714
Wilmar L. Cerón, 769
Yamid Arley Mera-Velasco, 131, 169
Yaneth Del Socorro Muñoz-Saba, 356
Yennifer García-M., 90
Yesid Carvajal-Escobar, 769
Yosselyn Lozano-Ocaña, 7
Yucely del Carmen Copete-Mosquera, 690
Yuley Cardona, 769
Yuliana Chala-Velásquez, 460
Zuleyma Mosquera-Murillo, 192

Índice de artículos - Index of Articles

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Volumen 46, números 178, 179, 180 y 181.

Ciencias Biomédicas Biomedical Sciences

Artículo de revisión

Métodos de obtención y aplicación de nanopartículas magnéticas en el tratamiento y diagnóstico del cáncer: una revisión

Methods for obtaining and applying magnetic nanoparticles in cancer diagnosis and treatment: A review 7

Original article

Seroreactivity to SARS-CoV-2 in individuals attending a university campus in Bogotá, Colombia

Seroreactividad al SARS-CoV-2 en trabajadores de un campus universitario en Bogotá, Colombia 27

Original article

Possible new mitochondrial mechanism of vitamin C anticancer activity

Posible nuevo mecanismo mitocondrial de la actividad anticancerígena de la vitamina C 36

Ensayo

Premio Nobel de fisiología o medicina en 2022: una revalidación de la evidencia molecular de los parentescos más recientes del *Homo sapiens* en el árbol de la vida

Nobel Prize in Physiology or Medicine in 2022: a revalidation of molecular evidence for the most recent kinship of *Homo sapiens* in the tree of life 863

Original article

***Paracoccidioides restrepiensis* has undergone a severe population bottleneck**

Paracoccidioides restrepiensis ha experimentado un grave cuello de botella 866

Artículo de revisión

Hacia una estructura de investigación y educación para la prevención de accidentes por incendios y explosiones en Colombia

Towards the creation of a research and education structure for the prevention of accidents due to fires and explosions in Colombia 50

Artículo de revisión

Encriptación de información mediante procesamiento óptico

Information encryption using optical processing 68

Artículo de revisión

Hacia una estructura de investigación y educación para la prevención de accidentes por incendios y explosiones en Colombia

Towards the creation of a research and education structure for the prevention of accidents due to fires and explosions in Colombia 50

Artículo de revisión

Encriptación de información mediante procesamiento óptico

Information encryption using optical processing 68

Ciencias Físicas Physical Sciences

Ciencias Físicas Physical Sciences	Artículo original	
	Lógica cuántica: enfoque reticular ortocomplementado modular y tesis de la interpretación parcial	
	Quantum logic: modular orthocomplemented lattice approach and partial interpretation thesis	311
	Artículo original	
	Resolviendo el problema de valores propios complementarios mediante un algoritmo cuasi-Newton	
	Solving the eigenvalue complementarity problem using a quasi-Newton algorithm	325
	Original article	
	Multifunctional nanostructured platform for sequential release of therapeutic molecules	
	Plataforma multifuncional nanoestructurada para entrega secuencial de moléculas terapéuticas.....	339
	Artículo original	
	Efecto Hall cristalino en el antiferromagnético colineal no convencional NiF₂	
	Crystal Hall effect in an unconventional collinear antiferromagnet NiF ₂	617
	Artículo original	
	Rare-earth ferrobismuthites: ferromagnetic ceramic semiconductors with applicability in spintronic devices	
	Ferrobismutitas de tierra rara: cerámicos ferromagnéticos semiconductores con aplicabilidad en dispositivos espintrónicos	628
Opinión		
Sinergia en las ciencias básicas para la solución de problemas de ingeniería		
Synergy in the basic sciences for the solution of engineering problems	646	
Artículo original		
Exponentes críticos estáticos, efectos de anisotropía, Hall y magneto-calórico, e interacciones magnéticas en cintas de aleaciones basadas en FeCr, FeCo y MnFe		
Static critical exponents, anisotropy, Hall and magneto-caloric effects, and magnetic interactions in FeCr, FeCo, and MnFe-based alloy ribbons	656	
Original article		
Spin-selective insulators		
Aislantes de espín selectivo	877	
Ensayo		
A propósito del premio nobel de física 2022: ¿comprender la naturaleza es asunto de la razón, de la intuición o de la tecnología?		
Regarding the Physics Nobel Prize 2022: Is nature understanding a matter of reason, intuition or technology?	899	
Original article		
Confinement and spatial entanglement: phenomenology of a new interference principle		
Confinamiento y entrelazamiento espacial: la fenomenología de un nuevo principio de interferencia	902	
Artículo de revisión		
Óptica y fotónica: ciencia y tecnología de la luz		
Optics and photonics: Light science and light technology	920	
Artículo original		
Potencial Vector Eléctrico y la Ley de Biot-Savart en Electroestática		
Electric Vector Potential and the Biot-Savart like law in Electrostatics	939	

Original article

Environmental changes during the last 1800 years in the Neguanje mangrove, Tayrona National Natural Park, Colombian Caribbean

Cambios ambientales en los últimos 1800 años en el manglar de Neguanje, Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe colombiano 90

Artículo original

Presencia confirmada del murciélago marrón de Chiriquí, *Eptesicus chiriquinus* (Chiroptera: Vespertilionidae), en el departamento de Chocó, Colombia

Confirmed presence of the Chiriqui brown bat, *Eptesicus chiriquinus* (Chiroptera: Vespertilionidae) in the department of Choco, Colombia 108

Original article

Assessment of the level of adjustment of three epidemiological models in the analysis of epidemics with incidences less than 100% such as the lethal wilt of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Evaluación del nivel de ajuste de tres modelos epidemiológicos en el análisis de epidemias con incidencias inferiores al 100% como la marchitez letal de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) 118

Artículo original

Caracterización de drosophilidos en zona urbana de Popayán (Cauca) Colombia

Characterization of drosophilides in the urban area of the city of Popayán (Cauca), Colombia 131

Artículo original

Estructura y composición de la ictiofauna presente en el tramo bajo del río Córdoba, Sierra Nevada de Santa Marta, Caribe colombiano

Structure and composition of the ichthyofauna present in the lower section of the Córdoba River, Sierra Nevada de Santa Marta, in the Colombian Caribbean 137

Artículo original

Análisis del riesgo de invasión de malezas introducidas asociadas a cultivos de banano en el departamento del Magdalena, Colombia

Analysis of the risk of invasion of exotic weeds associated with banana crops in the department of Magdalena, Colombia 154

Original article

New records and a key for species of *Synarthonia* (lichenized Ascomycota: Arthoniaceae) in Colombia

Nuevos registros y una clave para las especies de *Synarthonia* (Ascomycota liquenizada: Arthoniaceae) en Colombia 165

Artículo original

Evaluación fitosanitaria de *Juglans neotropica* y *Quercus humboldtii* en arbolado urbano de Popayán-Cauca, Colombia

Phytosanitary evaluation of *Juglans neotropica* and *Quercus humboldtii* in an urban woodland of Popayán-Cauca, Colombia 169

Artículo original

Hábitats prioritarios en un humedal costero del Pacífico: propuesta de un índice basado en servicios ecosistémicos

Priority habitats of a Pacific coastal wetland: Proposal for an index based on ecosystem services 182

Artículo original

Variación espacial de la comunidad de algas del perifiton en quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó, Colombia

Spatial variation of the periphyton algae community in streams of the San Juan River basin, Chocó-Colombia 192

Artículo original

Variación estructural de familias de macroinvertebrados acuáticos y su relación con la calidad del agua en quebradas asociadas con cultivos de café y ganadería vacuna en el sector de La Tagua, Sierra Nevada de Santa Marta

Structural variation of families of aquatic macroinvertebrates and their relationship with the quality of water in streams associated with coffee crops and beef cattle in La Tagua, Sierra Nevada de Santa Marta 206

Original article

Diversity and antibacterial activity of endophytic fungi of the Amazonian medicinal plant *sucuba* [*Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson]

Diversidad y actividad antibacteriana de hongos endofíticos de la planta medicinal amazónica *sucuba* [*Himatanthus sucuuba* (Spruce ex Müll. Arg.) Woodson] 217

Artículo original

Uso de refugios artificiales como estrategia para la conservación de murciélagos

Use of artificial refuges as a strategy for the conservation of bats 356

Artículo original

Veliidae (Hemiptera: Gerromorpha) en el piedemonte andino-pacífico en el suroeste de Colombia

Veliidae (Hemiptera: Gerromorpha) in the Andean-Pacific piedmont in South-West Colombia 372

Artículo original

Caracterización de la diversidad de aves en un humedal altamente intervenido del Pacífico suramericano

Characterization of bird diversity in a highly impacted wetland in the South American Pacific 380

Artículo original

Registros notables de mamíferos en una cordillera aislada, amenazada y no protegida en la depresión de Huancabamba, norte de Perú

Noteworthy records of mammals from an isolated, threatened, and unprotected mountain range in the Huancabamba depression, northern Perú 393

Artículo original

Distribución espacial y temporal de microplásticos flotantes en aguas del Caribe central colombiano

Spatial and temporal distribution of floating microplastics in waters of the Colombian central Caribbean region 406

Artículo original

Nuevos registros y estado del conocimiento de heterobranquios marinos (Mollusca: Gastropoda) en el departamento del Atlántico, Caribe colombiano

New records and status of knowledge of marine heterobranchs (Mollusca: Gastropoda) in the department of Atlántico, Colombian Caribbean 426

Artículo original

Relación histórica de dos pioneros de la biogeografía tropical en la cordillera de los Andes: Alexander von Humboldt y Francisco José de Caldas

Historical account of two pioneers of tropical biogeography in the Andes: Alexander von Humboldt and Francisco José de Caldas 438

Artículo original

Peces del complejo lagunar Peregrinos, río Caquetá, municipio de Solano, Caquetá, Colombia

Fishes of the Peregrinos lagoon complex in Caquetá River, municipality of Solano, Caquetá, Colombia 460

Artículo original

Variación estacional de abejas euglosinas (Apidae: Euglossini) en el norte de la Orinoquia colombiana

Seasonal variation of Euglossine bees (Apidae: Euglossini) in the North of the Colombian Orinoquia 470

Artículo original

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

Evaluation of organic waste from marketplaces to produce bacterial enzymes 675

Ensayo

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

On Gregor Mendel's Bicentenary: A Commemoration of His Heritage and Heirs 685

Original article

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

Extensión del rango y mapa de distribución actualizado de *Hsunycteris cadenai* (Chiroptera: Phyllostomidae) 690

Artículo original

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

Morphological characterization of the embryonary stages of the freshwater stingray *Potamotrygon magdalenae* (Elasmobranchii: Potamotrygonidae) 697

Artículo original

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

Reaction and yield of tomato micrografts (*Solanum* spp.) inoculated with vascular wilt-causing *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen 714

Artículo original

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

Taxonomic diversity and patterns of flora diversity in coastal wetlands of Perú 730

Artículo original

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

Monographic studies in South American Agavaceae. First report of *Furcraea foetida* for Ecuadorian and Peruvian floras 742

Original article

New records of lichen genera and species for Colombia

Nuevos registros de géneros y especies de líquenes para Colombia 751

Artículo original

Comparación de la riqueza de insectos utilizando dos métodos de recolección en un humedal costero del Pacífico suramericano

Comparison of insect richness with two collection methods in a coastal wetland of the South American Pacific 947

<p>Ciencias Naturales Natural Sciences</p>	<p>Original article New records of the introduced gecko <i>Lepidodactylus lugubris</i> (Duméril & Bibron, 1836) (Squamata: Gekkonidae) in Colombia and update of its geographic range in the country Nuevos registros del gecko introducido <i>Lepidodactylus lugubris</i> (Duméril & Bibron, 1836) (Squamata: Gekkonidae) en Colombia y actualización de su distribución geográfica en el país 959</p>
	<p>Artículo original Reservas de carbono en un ecosistema del desierto suramericano: el caso de Lomas de Amancaes, Lima, Perú Carbon storage on an ecosystem of the South American desert: The case of Lomas de Amancaes (Lima-Perú) 971</p>
	<p>Artículo original ¿Se están reduciendo los humedales de la costa del Pacífico suramericano? El caso de los humedales de Lima Are the wetlands on the Pacific coast of South America shrinking? The case of Lima wetlands 985</p>
<p>Ciencias Químicas Chemical Sciences</p>	<p>Artículo original Materiales carbonosos jerarquizados derivados de la borra de café para su aplicación en supercondensadores Hierarchical carbonaceous materials derived from spent coffee grounds for application in supercapacitors 233</p>
	<p>Ensayo La síntesis química “click” y la “bioortogonal” ganan el premio Nobel 2022 The “click” and “bioorthogonal” chemical synthesis win the Nobel Prize 2022 999</p>
<p>Ciencias de la Tierra Earth Sciences</p>	<p>Original article Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil from <i>Piper marginatum</i> leaves obtained by hydrodistillation in pH4, pH7 and pH10 Composición química y actividad antimicrobiana del aceite esencial de hojas de <i>Piper marginatum</i> obtenido por hidrodestilación con pH4, pH7 y pH10 1002</p>
	<p>Artículo original Cambios en los patrones espaciales de área quemada en Colombia, ¿qué ha pasado en las dos primeras décadas del siglo XXI? Changes in the spatial patterns of burned area in Colombia, what happened in the first two decades of the 21st century? 248</p>
	<p>Artículo original Estimación espaciotemporal de la recarga potencial en un sistema pseudokárstico tropical Spatio-temporal estimation of the potential recharge in a tropical pseudokarst system 261</p>
	<p>Original article Upper Pleistocene deposits from the Cauca Valley Depósitos del Pleistoceno Superior en el Valle del Río Cauca 482</p>
	<p>Artículo original El Mapa de Timaná: versión de puño y pluma de Francisco José de Caldas Francisco José de Caldas’ long lost <i>Timaná Map</i> 496</p>
<p>Artículo original Contenido de nutrientes, acidez y textura del suelo en áreas degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico Nutrient content, acidity, and soil texture in areas degraded by mining in the biogeographic Chocó 514</p>	

**Ciencias
de la Tierra**
Earth Sciences

Artículo original

Estimación y pronóstico de radiación solar en el valle de Aburrá – Colombia

Estimation and forecast of solar radiation in the Aburrá Valley- Colombia 529

Artículo original

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

The advance of the coastline of the peninsulas of Bocagrande and Castillogrande and the construction of the Breakwater in 1758 in Cartagena de Indias 758

Artículo original

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

Methodological implications and inconsistencies of Colombia's Third National Communication on Climate Change 769

Artículo original

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

The hurricane that affected San Andrés Island in 1911 795

Essay

The pioneering scientific endeavor and contributions of José María González Benito (1843-1903), the first Colombian modern astronomer

Los esfuerzos y aportes científicos de José María González Benito (1843-1903), el primer astrónomo moderno colombiano 1010

Matemáticas
Mathematics

Original article

Análisis matemático de un modelo metapoblacional para la dinámica del dengue

Mathematical analysis of a metapopulation model for dengue dynamics 550

Opinión/ Opinion

La necesidad de una comunicación científica liderada por autores e instituciones

The need for scientific communication led by authors and institutions 565

Las grandes manchas de plásticos en los océanos

The big plastic stains in the oceans 567

James Lovelock: la visión de un científico excepcional

James Lovelock: the vision of an exceptional scientist 823

La humanidad llega a los ocho mil millones de habitantes y su futuro está en ascuas

Humanity reaches eight billion inhabitants and its future is in embers 1038

Las humanidades, las ciencias sociales y el arte en la formación de los científicos

Humanities, social sciences, and art in the education of scientists 1041

Consideraciones sobre la crisis pesquera mundial

Considerations on the global fisheries crisis 1047

Comentario bibliográfico/ Bibliographic commentary

¿Por qué dependemos de la biodiversidad?

Why do we depend on biodiversity? 279

En busca del origen	
In search of the origin	570
Métodos Matemáticos. Segunda edición extendida	
Mathematical methods. Second extended edition	574
Catálogo de los hongos de Colombia	
Catalogue of fungi of Colombia	1050
Club de revistas/Journal Club	
Club de revistas	
Journal Club	281
El genoma humano: llenando los vacíos	
Human genome: filling the gaps	577
Reconociendo a las mujeres extraordinarias en la historia de la entomología médica	
Acknowledging extraordinary women in the history of medical entomology	580
Ranas de cristal	
Glassfrogs	585
Primera imagen del agujero negro en el centro de nuestra galaxia	
First image of the black hole at the center of our galaxy	587
Un microorganismo que no lo es: Candidatus Thiomargarita magnifica	
A microorganism that is not: Candidatus Thiomargarita magnifica	807
Las evidencias que sitúan el origen del SARS-CoV-2 en el Mercado Mayoritario de Mariscos de Huanan, Wuhan	
The evidence that places the origin of SARS-CoV-2 in the Majority Seafood Market of Huanan, Wuhan	811
La paleomicrobiología molecular permite dilucidar el origen de la plaga	
Molecular paleomicrobiology allows to elucidate the origin of plague	815
Procesos tempranos de las cortezas planetarias revelados por el sitio de eyección del meteorito marciano más antiguo	
Early planetary crustal processes revealed by the oldest Martian meteorite ejection site	819
Vida de la Academia	
La ciencia, un antídoto contra los conflictos sociales sin fin	
Science, an antidote to endless social conflicts	832
Un Plan Regional para Educación, Ciencia y Tecnología, Reflexiones de un neo-académico de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.	
A Regional Plan for Education, Science and Technology, Reflections of a neo-academic of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences	834
Cartas al editor	
Letters to the editor	287
In Memoriam	
Ángela Restrepo Moreno	289
Gabriel Poveda Ramos	590
Alberto Morales Alarcón	594
Carlos Corredor Pereira	596
Ernesto Guhl Nannetti	1054

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.raccefyfyn.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.raccefyfyn.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.

