



ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

Estamos en **Scopus**

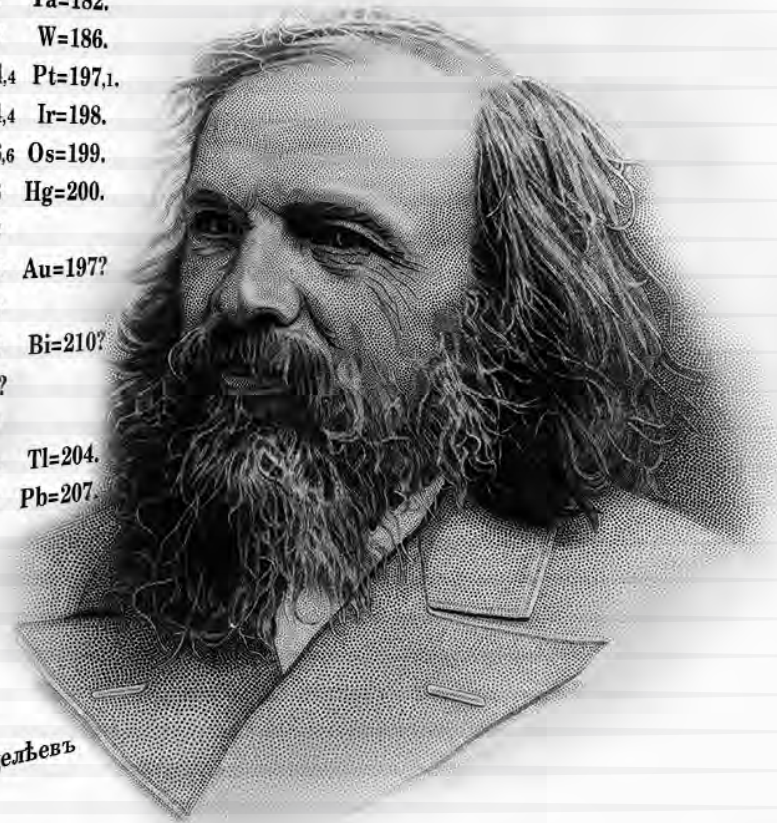
# REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 43 • Número 167 • Págs. 157-342 • Abril-Junio de 2019 • Bogotá - Colombia

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ,  
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВЪСЬ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВЪ.

			Ti=50	Zr= 90	?=180.			
			V=51	Nb= 94	Ta=182.			
			Cr=52	Mo= 96	W=186.			
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,1.			
			Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.			
			Ni=Co=59	Pd=106,6	Os=199.			
			Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.			
H=1			Be= 9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112		
			B=11	Al=27,3	?=68	Ur=116	Au=197?	
			C=12	Si=28	?=70	Sn=118		
			N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?	
			O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?		
			F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127		
			Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204.
				Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207.	
				?=45	Ce=92			
				?Er=56	La=94			
				?Yt=60	Di=95			
				?In=75,6	Th=118?			



Д. Менделѣевъ

Dmitri  
Ivánovich  
Mendelēev  
(1834-1907)



United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization



International Year  
of the Periodic Table  
of Chemical Elements



ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

Estamos en Scopus®

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

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 43 • Número 167 • Págs. 157-342 • Abril-Junio de 2019 • Bogotá - Colombia

## Comité editorial

### Editora

- Elizabeth Castañeda, Ph. D.  
Instituto Nacional de Salud,  
Bogotá, Colombia

### Editores asociados

#### Ciencias Biomédicas

- Luis Fernando García, M.D., M.Sc.  
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.  
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
- Luis Caraballo, Ph. D.  
Universidad de Cartagena, Cartagena, 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, B.Sc., Ph. D.  
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

#### Ciencias del Comportamiento

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

- Fernando Marmolejo-Ramos, Ph. D.  
Universidad de Adelaide, Adelaide, Australia

#### 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, Doctor  
Universidad del Valle, Cali
- Gabriel Téllez, Ph. D.  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- Jairo Roa-Rojas, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia
- Ángela Stella Camacho Beltrán, Dr. rer. nat.  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- Edgar González, Ph. D.  
Pontificia Universidad Javeriana,  
Bogotá, Colombia
- Guillermo González, Ph. D.  
Universidad Industrial de Santander,  
Bucaramanga, Colombia

## Ciencias Naturales

- 15 José Luis Fernández Alonso, Doctor  
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, Dr. rer. nat.  
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
- 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
- Jorge Jácome, Ph. D.  
Pontificia Universidad Javeriana,  
Bogotá, Colombia
- 15 Arturo Acero, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Santa Marta, Colombia

## Ciencias Químicas

- 15 Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia
- Moisés Wasserman Lerner, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia
- 15 Myriam Sánchez de Gómez, M.Sc.  
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

## 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

## Matemáticas

- Jorge Ivan Cossio Betancur, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Medellín, Colombia
- 15 Luis Español González, Doctor  
Universidad de la Rioja, España
- Jaime Ignacio Lesmes Camacho, Dr. phil. nat.  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- 15 Luis Carlos Arboleda, Doctor  
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- 15 Alf Onshuus, Ph. D.  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

---

## Comité científico internacional

- |   |   |   |
|---|---|---|
| 15 Ángela María Guzmán, Ph. D.<br>University of Central Florida,<br>Orlando, Estados Unidos | 15 Carlos Jiménez, Ph. D.<br>Universidad de La Coruña, España   | 15 José Rubens Pirani, Ph. D.<br>Universidade de São Paulo, Brasil  |
| 15 Antoine M. Cleef, Ph. D.<br>University of Amsterdam,<br>The Netherlands                  | Gioconda San Blas, Ph. D.<br>Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas<br>y Naturales, Caracas, Venezuela | 15 Wolfgang Gieren, Ph. D.<br>Universidad de Concepción, Chile  |
| Rodolfo Castillo, Ph. D.<br>Fort Lauderdale, Florida, USA                                   | 15 Alfonso Castro, Ph. D.<br>Harvey Mudd College, Claremont, CA,<br>USA                                   | 15 Pedro Joseph Natham, Ph. D.<br>Centro de Investigación y de<br>Estudios Avanzados, Instituto<br>Politécnico Nacional, México |

---

**Asistencia y coordinación editorial**  
Carolina Acosta

**Corrección de estilo y ortografía**  
Marta Renza

**Diseño y diagramación**  
Johanna Morales

## 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, Colciencias (convocatoria 768 de 2016), categoría B

**Periodicidad:** trimestral  
**Fecha de inicio:** 1936  
**Tamaño:** 21,5 x 28 cm  
**Papel:** propalmate de 90 gr.  
Solicitud de canje

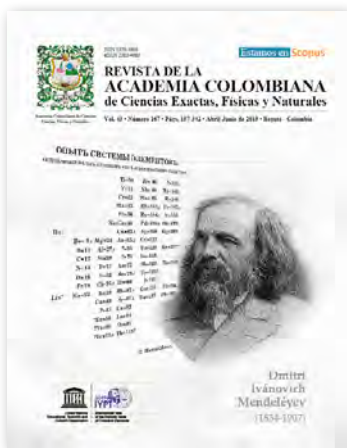
Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

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.

Impreso en Colombia



### Nuestra portada

#### 150 aniversario de la Tabla Periódica de Elementos Químicos

La imagen elegida en tono de grises, marca de agua, resalta el rostro del científico Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907) frente a su importante creación, la Tabla Periódica de los elementos químicos (1869), de enorme trascendencia en la química, la física, la astronomía y en general, en todas las ciencias naturales.

Su fascinante propuesta y recopilación, establece un sistema razonable perfectamente ordenado que permite predecir las propiedades de la materia existente y de los nuevos elementos que podrían aparecer, y que ocuparían espacios precisos dentro de este aparente sencillo ordenamiento de los elementos químicos, que componen la naturaleza, nuestro ser y todo lo que nos rodea.

Fuente: Alejandro Pérez Flórez, Químico, Dr en Ciencias Químicas. Profesor de la Pontificia Universidad Javeriana.



ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

Estamos en Scopus®

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

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 43 • Número 167 • Págs. 157-342 • Abril-Junio de 2019 • Bogotá - Colombia

## Contenido - Contents

<b>Editorial</b>	<b>Mendeléyev y otros artífices de la tabla periódica</b> Mendeléyev and other architects of the Periodic Table <i>Sonia Moreno</i> ..... 163
<b>Ciencias Biomédicas</b> Biomedical Sciences	<b>Potencia del salto en jugadores de fútbol sala después de la utilización del rodillo de espuma y la facilitación neuromuscular propioceptiva en la musculatura isquiosural</b> <b>AO</b> Jump power in futsal players after foam roller use and proprioceptive neuromuscular facilitation in the ischiosural muscles <i>Enmanuel Portilla-Dorado, Andrés Villaquiran-Hurtado, Nancy Molano-Tobar</i> ..... 165
<b>Ciencias Físicas</b> Physical Sciences	<b>Geometric model for interference and diffraction with waves and particles</b> <b>OA</b> Modelo geométrico para interferencia y difracción con ondas y partículas <i>Román Castañeda, Giorgio Matteucci</i> ..... 177
	<b>Aplicación de metamateriales para estimar índices de refracción</b> <b>AO</b> Application of metamaterials to estimate refractive indexes <i>Javier Ricardo Castro-Ladino, Alba G. Ávila-Bernal</i> ..... 193
	<b>Delfines de río: especies indicadoras del estado de salud de los ecosistemas acuáticos de la Amazonia y la Orinoquia</b> <b>AP</b> River dolphins: Species that indicate the state of health of the aquatic ecosystems of the Amazon and Orinoco regions <i>Fernando Trujillo-González, Federico Mosquera-Guerra, Nicole Franco</i> ..... 199
<b>Ciencias Naturales</b> Natural Sciences	<b>Odonatos de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: una lista preliminar</b> <b>AO</b> Odonata of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: A preliminary list <i>Melizza Tobias-Loaiza*, Cesar E. Tamaris-Turizo</i> ..... 212
	<b>Riqueza y distribución de tricópteros inmaduros del departamento del Chocó, Colombia</b> <b>AO</b> Richness and distribution of immature caddisflies in the department of Chocó, Colombia <i>Zuleyma Mosquera-Murillo</i> ..... 219

<b>Comparación de métodos de inoculación de <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i> (Sacc.) Snyder &amp; Hansen, causante del marchitamiento vascular del tomate</b> <b>AO</b>	
Comparison of inoculation methods of <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i> Sacc. (Snyder & Hansen), the causal agent of the vascular wilt of tomato	
<i>Luisa Fernanda Cardona-Piedrahíta, Jairo Castaño-Zapata</i> .....	227

<b>Flujo de CO<sub>2</sub> del suelo bajo diferentes coberturas de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá</b> <b>AO</b>	
Soil CO <sub>2</sub> flux under different land-cover types in the <i>Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental</i> of Bogotá	
<i>María Catalina Lopera</i> .....	234

<b>Caracterización del agente causante de la deformación de los frutos de la uva (<i>Vitis vinifera</i> L.) var. Red Globe en La Unión, Valle del Cauca, Colombia</b> <b>AO</b>	
Characterization of the causal agent of the deformation of the fruits of the grape ( <i>Vitis vinifera</i> L.) var. Red Globe, in La Unión, Valle del Cauca, Colombia	
<i>Silvia Patricia López-Zapata, Jairo Castaño-Zapata, Rafael Arango-Isaza; Dayana Andrea Vásquez-Barajas</i> .....	241

<b>Una nueva especie de <i>Miconia</i> (Melastomataceae) con anteras connadas de Colombia</b> <b>AO</b>	
A new species of <i>Miconia</i> (Melastomataceae) with connate anthers from Colombia	
<i>Humberto Mendoza-Cifuentes, Mauricio Posada-H, Heriberto David</i> .....	250

<b>Un manuscrito de finales del siglo XVII: primera manifestación de un estudio astronómico y cronológico autóctono en territorio neogranadino</b> <b>AO</b>	
A manuscript of the late seventeenth century: first manifestation of an astronomical and chronological autochthonous study in the Nueva Granada	
<i>J. Gregorio Portilla, Freddy Moreno</i> .....	255

<b>Electronic and electrochemical properties of a grid-like structure of Zn(II)</b> <b>OA</b>	
Propiedades electrónicas y electroquímicas de una estructura del tipo de Zn(II)	
<i>Juan D. Villada, Juliana Loaiza, Manuel N. Chaur</i> .....	273

<b>2019 Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos</b> <b>P</b>	
2019, <i>International Year of the Periodic Table</i> (IYPT)	
<i>Sonia Moreno</i> .....	284

<b>La tabla periódica como fundamento para el aprendizaje de la Química y la construcción de conocimiento</b> <b>E</b>	
The periodic table as a foundation for learning chemistry and building knowledge	
<i>Manuel F. Molina C., Liliam A. Palomeque-Forero</i> .....	285

<b>Los lantánidos: ni tierras ni raras</b> <b>E</b>	
The lanthanides: neither earths nor rare	
<i>Fernando Echeverri L., John Jairo Parra B.</i> .....	291

<b>Preliminary characterization of the dominant baroclinic modes of a tropical Andean reservoir during a dry period</b> <b>OA</b>	
Caracterización preliminar de los modos baroclínicos dominantes de un embalse tropical andino durante un periodo seco	
<i>Andrés Posada-Bedoya, Andrés Gómez-Giraldo, Ricardo Román-Botero</i> .....	297

**Integral transforms and extended Voigt functions** **OA**

Transformadas integrales y funciones extendidas de Voigt

*M.A. Pathan* ..... 311

**In Memoriam**

José Luis Villaveces Cardoso ..... 319

**Vida de la Academia**

Palabras Enrique Forero ..... 321

Palabras Clemente Forero Pineda ..... 322

**Carta al editor**

Letter to the Editor ..... 325

**Corrección de autor**

Author's correction ..... 331

**Enfoque y alcance**

Focus and Scope ..... 332

## Mendeléyev y otros artífices de la tabla periódica

Las Naciones Unidas y la Unesco han proclamado el 2019 como el Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos, lo cual coincide con los 150 años de la propuesta que Dmitri Ivánovich Mendeléyev hiciera en 1869, de un sistema periódico que ordenara los elementos químicos. Esta efeméride es un motivo para recordar la magnitud y la trascendencia que la tabla periódica ha tenido en el desarrollo de la humanidad.

Si bien el concepto de materia fue consolidado por Aristóteles, este existía desde antes en el pensamiento chino, indio y hebreo, así como en el mundo griego prearistotélico. Leucipo y Demócrito, este último discípulo del primero, son considerados los fundadores del atomismo. Desde siempre el ser humano se ha preguntado, ¿cuál es el principio de todas las cosas?, ¿de qué está constituido el mundo material?, ¿qué compone el universo? En efecto, observar las infinitas formas, estructuras y colores presentes en los organismos vivos, en el mundo mineral y en todo lo que vemos, deja asombrada cualquier mente, sin importar cuán sabia sea. Más sorprendente, incluso, es que la diversidad relativa y “aparente” de esos infinitos aspectos ha sido construida por la naturaleza a partir de tan solo unos cuantos elementos básicos. Para mayor fascinación y perplejidad, tales elementos siguen un ordenamiento riguroso, con fundamento científico, que explica el papel específico de cada uno de ellos en el proceso evolutivo de la materia, de la cual no somos más que una ínfima parte.

El escenario anterior invita a repasar, muy brevemente, la gestación del conocimiento en torno a los elementos químicos que condujo a su ordenamiento en una “simple” tabla. Tiempo antes de los postulados filosóficos de marras, el hombre ya conocía y manipulaba nueve elementos esenciales para la supervivencia y el desarrollo de las civilizaciones en la prehistoria y la antigüedad. Algunos de ellos identifican justamente un período o era de desarrollo de la humanidad. Posteriormente se fueron descubriendo poco a poco otros elementos. Entre la edad media y el año 1700 se encontraron seis nuevos elementos. Luego, entre 1735 y el momento en que se declaraba en Colombia la constitución de 1886, surgieron 62 elementos adicionales (en promedio uno nuevo cada 2,5 años). En la primera parte del siglo XX (más exactamente entre 1984 y 1961) entraron en escena 28 elementos más y, desde 1965, se han logrado incluir los 15 restantes, para un total de 118 conocidos hasta el día de hoy. De ellos, solo 90 existen en la tierra, los demás han sido sintetizados en laboratorios especializados y, aunque su tiempo de vida media es muy corto, es posible su identificación y, por supuesto, la asignación de su lugar en el orden perfecto de la tabla periódica.

Como sucede en todos los campos del conocimiento, ese proceso de descubrimiento condujo a la necesidad de organizar la información, con el fin de establecer posibles correlaciones o tendencias. Muchos científicos contribuyeron a establecer una organización sistemática de los elementos. Citaremos solo a algunos de ellos. En el siglo XIX ya se habían hecho mediciones de la masa de los elementos y se conocían algunas de sus propiedades. Cuando se contaba con cerca de 50 elementos, J. W. Dobereiner en Alemania (1829) los organizó en triadas (algunas aún vigentes) y estableció que la masa atómica del elemento intermedio es el promedio de los otros dos. Sin embargo, algunos de los elementos conocidos no cumplieron esta regla. Con cerca de 60 elementos, Chancourtois (1862) fue el primero en plantear una primera tabla periódica en términos del incremento de la masa atómica, reconociendo que las propiedades elementales se repiten cada siete elementos. Sin embargo, ciertos minerales distorsionaron su propuesta. Más adelante, en 1864, Newland descubrió la periodicidad y le dio forma con la ley de octavas (las propiedades se repetían cada octavo elemento). No obstante, su propuesta perdía validez para masas mayores a la del calcio, y muchos lo consideran como uno de los precursores de la actual tabla periódica, dado que fue el primero en proponer espacios en blanco para los elementos aún no descubiertos y que podían explicar mejor la tendencia concebida.

En sus trabajos, Dmitri Ivánovich Mendeléyev, por un lado, y Lothar Meyer, por otro, lograron organizar los 66 elementos conocidos en ese momento en orden ascendente de masas atómicas y de algunas de sus propiedades, generando ocho grupos con base en propiedades similares. La diferencia entre la propuesta de Mendeléyev y Meyer y las demás radicó en anticipar la existencia de varios elementos todavía desconocidos, así como en la predicción de algunas de las propiedades que deberían tener y que explicarían la tendencia propuesta en su sistema de organización. Sin embargo, la identificación de más de una docena de errores produjo críticas, que llevaron a continuar la búsqueda de una propiedad diferente a la masa para organizar coherentemente todos los elementos.

La solución de estos problemas llegó en 1913, cuando Henry Moseley, basándose en experimentos con rayos X, determinó que a partir de la raíz cuadrada de la frecuencia medida de los rayos X emitidos por cada elemento era posible determinar su número atómico ( $Z$ ). Esta metodología experimental pudo superar las inconsistencias de las propuestas de sus antecesores.



Así, hoy se cuenta con la tabla periódica organizada en función del número de protones ( $Z$ ) en el núcleo de cada elemento, y con la configuración electrónica derivada de  $Z$  es posible entender y explicar las propiedades físicas y químicas de los elementos, así como predecir su reactividad y la de sus iones.

Los humanos siempre nos hemos sentido fascinados por el maravilloso mundo que nos rodea y hemos experimentado una infinita necesidad de entenderlo. La tabla periódica es, tal vez, uno de los trabajos científicos colectivos más rigurosos que haya podido concebir el hombre. Allí se sintetiza todo lo esencial del complejo mundo material que conocemos y del cual hacemos parte.

Sonia Moreno, Ph.D.

Miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Editora asociada Ciencias Químicas

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

# Potencia del salto en jugadores de fútbol sala después de la utilización del rodillo de espuma y la facilitación neuromuscular propioceptiva en la musculatura isquiosural

Enmanuel Portilla-Dorado\*, Andrés Villaquirán-Hurtado, Nancy Molano-Tobar

Departamento de Educación Física, Recreación y Deportes, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

## Resumen

En el entrenamiento deportivo se plantea que, probablemente, la flexibilidad es la capacidad física que menos trabajo exige y cuyos resultados genera mayor controversia. Sin embargo, diversas técnicas de estiramiento se implementan como método para la prevención de lesiones. El objetivo de este estudio fue determinar los cambios en la potencia del salto después de implementar dos programas de entrenamiento de la flexibilidad en deportistas de fútbol sala. Se hizo un estudio experimental con evaluaciones antes y después de la intervención, en el cual se aplicaron dos programas de entrenamiento de la flexibilidad de la musculatura isquiosural mediante la técnica de facilitación neuromuscular propioceptiva y el uso del rodillo de espuma. Las pruebas de salto de los futbolistas participantes se evaluaron con electromiografía de los isquiosurales y pruebas de flexibilidad antes y después de la intervención. Se encontró un aumento significativo en la altura del salto con contramovimiento (*Counter Movement Jump*, CMJ) y del salto Abalakov en el grupo que utilizó el rodillo de espuma, en tanto que con la técnica de facilitación neuromuscular se logró un aumento en los valores del salto Abalakov y en el unipodal derecho en comparación con el grupo de control, con diferencias que presentaban significación estadística ( $p \leq 0,05$ ). Se evidenció una disminución en la activación electromiográfica de los músculos semitendinoso y bíceps femoral derecho durante el salto en cuclillas después de la intervención ( $p \leq 0,05$ ). En conclusión, una adecuada planificación y estructuración del entrenamiento de la flexibilidad mediante el uso del rodillo de espuma y la facilitación neuromuscular propioceptiva permitieron mejorar la eficiencia de la contracción muscular y la capacidad de salto en deportistas de fútbol sala de Popayán. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Rendimiento deportivo; Estiramientos; Electromiografía; Rodillo de espuma; Potencia; Facilitación neuromuscular propioceptiva.

## Jump power in futsal players after foam roller use and proprioceptive neuromuscular facilitation in the ischiosural muscles

### Abstract

In sports training, flexibility is possibly the physical capacity that demands less work and whose results generate the greatest controversy. However, different stretching techniques are implemented as a method for injury prevention. This study sought to determine jump power changes after the implementation of two flexibility training programs in futsal players. We conducted an experimental study with pre- and post-intervention evaluations of two flexibility training programs for the ischiosural muscles using proprioceptive neuromuscular facilitation and the foam roller. The futsal players' jumps were evaluated with electromyography of the ischiosural muscles and flexibility tests before and after the intervention. The results showed a significant increase in height in the countermovement and Abalakov jumps in the group using the foam roller while the neuromuscular facilitation technique resulted in a statistically significant ( $p \leq 0.05$ ) increase in the Abalakov and the right unipodal jumps compared to the control group. We found a decrease in the electromyographic activation of the semitendinosus and right femoral biceps muscles during the squat jump after the intervention. In conclusion, adequate planning and structuring of flexibility training with techniques such as the foam roller and the proprioceptive neuromuscular facilitation improved the muscle contraction efficiency and the jumping ability in indoor soccer players from the city of Popayán. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Sports performance; Stretching electromyography; Foam roller; Power; Proprioceptive neuromuscular facilitation stretching.

### \*Correspondencia:

Enmanuel Portilla-Dorado; [efportilla@unicauca.edu.co](mailto:efportilla@unicauca.edu.co); **Recibido:** 27 de febrero de 2019; **Aceptado:** 2 de mayo de 2019; **Editor:** Luis Fernando García

## Introducción

El fútbol sala es un deporte de alta intensidad, con movimientos acíclicos variados y de corta duración. Durante un juego, los atletas cambian de actividad cada 3,28 segundos y recorren entre 105 y 160,2 metros por minuto; entre el 20 y el 26 % de dichas distancias se hace con una intensidad superior al 85 % de la frecuencia cardíaca máxima (Rodríguez-Santa Cruz, *et al.*, 2016).

Una característica del juego es la ejecución de *sprints* máximos repetidos y de corta duración. En los desplazamientos de alta intensidad es posible discriminar los niveles de rendimiento de los jugadores: cuanto mayor es el rendimiento, mayor es la tendencia a que el jugador recorra una distancia mayor en alta intensidad durante el juego (Matzenbacherab, *et al.*, 2014). Arins, *et al.* (2015) y Carminatti, *et al.* (2015) hacen referencia a las características fisiológicas del fútbol sala, deporte en el que el sistema adenosintrifosfato - fosfocreatina (*adenosine triphosphate: ATP and phosphocreatine: PC, ATP-PC*) es la principal fuente de energía para alcanzar máximos esfuerzos de corta duración.

La capacidad de salto es una de las cualidades más importantes y determinantes en la práctica deportiva y constituye un gesto básico en el deporte que se prioriza en las rutinas de entrenamiento (López, *et al.*, 2015; Picabea & Yanci, 2015; Aniotz, *et al.*, 2015). El salto como acción multiarticular exige niveles de fuerza con un adecuado control motor y coordinación intramuscular e intermuscular. Los principales músculos que intervienen en el salto vertical son los extensores de rodilla, cadera y tobillo, en cuya ejecución contribuyen aproximadamente con el 49, el 28 y en 23 %, respectivamente (Luarte, *et al.*, 2014).

En este sentido, es importante resaltar que actividades como el salto, el *sprint* y los cambios de dirección implican una alta intensidad y activación de la musculatura de los miembros inferiores, especialmente de los músculos isquiosurales, que son sometidos a una gran exigencia del ciclo estiramiento-acortamiento, e involucran esfuerzos con gran variedad de movimientos y una elevada concentración de las fibras musculares rápidas, lo que requiere que el músculo sea lo suficientemente flexible para almacenar y expulsar energía elástica, beneficiando el rendimiento y disminuyendo la posibilidad de sufrir lesiones (Ayala, *et al.*, 2010). Además, la relación entre la potencia muscular y los gestos deportivos del fútbol sala puede verse influenciada por la edad, el entrenamiento, la adaptación previa al evento y los aspectos madurativos (Ogura, *et al.*, 2007).

Es así como en 1999, Bosco, *et al.* (citado por Dal Pupo, *et al.*, 2016), aseguraron en su estudio que las propiedades neuromusculares del atleta pueden ser mejoradas con el entrenamiento y la adaptación del deportista. Uno de los hechos controvertidos en el entrenamiento y el rendimiento deportivo han sido los beneficios y las contraindicaciones de la práctica de algún método de estiramiento neuromuscular para la potencia del salto. Es claro que la capacidad de salto

y de amortiguación del individuo es importante para lograr optimizar el rendimiento en el deporte, y que el poco tiempo que se tiene para entrenar esta habilidad es una problemática común entre los entrenadores, por lo cual el desarrollo de esta cualidad requiere entrenamientos no solo eficaces sino también seguros y realizables en poco tiempo (Ruiz, 2013; Sainz-de-Baranda-Andújar & Ayala, 2010; Lavandero, *et al.*, 2017).

En algunos estudios se ha registrado un descenso en la capacidad de la contracción máxima voluntaria al realizar algunas técnicas como los estiramientos estáticos y la facilitación neuromuscular propioceptiva (Nelson, *et al.*, 2013), pero en otros no se ha encontrado una disminución en la capacidad de salto vertical después de realizar varios tipos de estiramiento muscular (Ogura, *et al.*, 2007; Woolstenhulme, *et al.*, 2006).

Por otro lado, las actividades de salto, velocidad y cambios de dirección, acciones frecuentes en el fútbol sala, son de alta exigencia para el ciclo de estiramiento-acortamiento del músculo, sin embargo, poco se recurre a los programas de entrenamiento, desconociendo que los isquiosurales son músculos poliarticulares con una elevada concentración de fibras musculares rápidas, lo que lleva a que el músculo se acorte y las unidades de músculo tendinosas no sean lo suficientemente flexibles para almacenar y expulsar la gran cantidad de energía elástica que beneficia la contracción muscular (Ayala, *et al.*, 2010).

En este contexto, las técnicas de entrenamiento de la flexibilidad se vienen incorporando a los procesos de desarrollo deportivo, aunque la falta de estudios en la región sobre estas nuevas propuestas, como el uso de la técnica de facilitación neuromuscular propioceptiva y la utilización del rodillo de espuma, ha resultado en una insuficiente evidencia científica sobre su rendimiento en el fútbol sala. Por ello, en este estudio se propuso determinar los cambios en la potencia de los saltos después de la implementación de dos programas de entrenamiento de la flexibilidad en deportistas de fútbol sala.

## Materiales y métodos

**Diseño y muestra.** Se hizo un estudio experimental, comparativo, con evaluaciones antes y después de la intervención. La muestra se seleccionó de forma aleatoria e incluyó a 23 jugadores masculinos de fútbol sala de un club deportivo participante en el torneo nacional de ascenso de esta disciplina del 2018. La participación en la investigación se ajustó a los siguientes criterios de inclusión: pertenecer y tener el reconocimiento como jugador por parte del club, no presentar ninguna lesión o enfermedad que impidiese la participación durante la intervención, participar de forma voluntaria y firmar el consentimiento informado. Los criterios de exclusión tenidos en cuenta fueron: no cumplir con el 90 % de las sesiones de entrenamiento, no completar las pruebas previas y posteriores a la intervención, el retiro voluntario y presentar lesión o enfermedad durante el programa de intervención.

**Procedimiento.** Los objetivos del estudio se compararon con las directivas, los entrenadores y los deportistas, y estos últimos aceptaron la participación firmando el consentimiento informado. Posteriormente, se hicieron las evaluaciones previas a la intervención, en las cuales se recolectó la información sociodemográfica y los antecedentes deportivos de cada atleta (días de entrenamiento a la semana, horas de entrenamiento por sesión, años de práctica del deporte, posición de juego, dominancia, antecedentes de lesiones y práctica de otra disciplina deportiva) (Álvarez-Pérez & López-Aguilar, 2018) mediante una encuesta previamente ajustada en una prueba piloto.

Una vez se recolectaron los datos, se evaluó la composición corporal mediante la toma de medidas antropométricas (masa corporal, talla, índice de masa corporal, porcentaje de grasa, sumatoria de pliegues cutáneos) adoptadas por la *International Society for the Advancement of Kinanthropometry*, ISAK (Stewart, et al., 2011). Para hallar el porcentaje de grasa se utilizó la fórmula de Carter (Rodríguez, 2016), la cual establece que:

porcentaje de grasa (% grasa) =  $2,585 + (0,1051 * \sum \text{pliegue tricipital} + \text{pliegue subescapular} + \text{pliegue supraespinal} + \text{pliegue abdominal} + \text{pliegue muslo} + \text{pliegue medial pierna})$

Posteriormente, se evaluó la potencia del salto mediante la plataforma de contacto AXON JUMP y el programa AXON JUMP 4.0, diseñada para la evaluación de distintas capacidades mecánicas cinemáticas del deportista, entre ellas la capacidad de salto, determinando la altura de cada uno de los saltos verticales (Santiago, et al., 2015; Departamento Administrativo del Deporte, la Recreación, la Actividad Física y el Aprovechamiento del Tiempo Libre – Coldeportes, 2015). Los saltos usados se basan en el protocolo descrito por Bosco, et al. (1983), cuya batería de pruebas de saltos verticales valoran las características funcionales y neuromusculares. Las pruebas realizadas fueron: el test de salto en cuclillas, el de salto de contramovimiento, el test de salto Abalakov, y el test de salto unipodal (derecho e izquierdo).

Cada uno de los saltos se registró con electromiografía de superficie (Myer, et al., 2005) utilizando un electromiógrafo inalámbrico de superficie MYON (<http://www.biomec.com.co/Analisis-muscular-myon>), con una velocidad de muestreo de 4.000 Hz por canal, resolución de 12 bits, alcance del transmisor al receptor de hasta 30 m, y frecuencia de transmisión de 2,4 Ghz. El registro se hizo sobre los vientres musculares entre la unión miotendinosa y el punto motor de los músculos semitendinosos y bíceps femoral de manera bilateral, siguiendo las recomendaciones indicadas por la *European Recommendations for Surface Electromyography – SENIAM project* (Hermens, et al., 1999) (Figura 1). La información extraída de las señales mioeléctricas superficiales permitió analizar el comportamiento global de los músculos estudiados y los parámetros cuantitativos; la amplitud fue el parámetro utilizado como indicador de la actividad muscular y se determinó por el valor cuadrático medio (*root mean square* - RMS).

La valoración se complementó con las pruebas de flexibilidad (Ayala, et al., 2012) de la musculatura isquiosural con las pruebas de sentarse y alcanzar (*sit and reach*) (Gutiérrez-Manzanedo, et al., 2018) y de elevación de pierna recta (derecha e izquierda) (Sainz-de Baranda, et al., 2012) utilizando un goniómetro digital y su respectivo programa Unicore (mobeec® med).

Después de la evaluación inicial los participantes se dividieron aleatoriamente en tres grupos para la implementación de los programas de flexibilidad. El grupo número uno realizó estiramientos mediante la técnica de facilitación neuromuscular propioceptiva; el grupo número dos los hizo con la técnica del rodillo de espuma, en tanto que el tercer grupo, que operó como grupo de control, no recibió ningún entrenamiento de flexibilidad.

La intervención se realizó durante ocho semanas, con tres sesiones semanales como lo sugieren Ayala, et al. (2010) para el entrenamiento de la flexibilidad. Los programas se ejecutaban durante el calentamiento de los deportistas previo a la fase central; el estímulo de entrenamiento de la flexibilidad tenía una duración de 15 minutos y un tiempo de ejecución por ejercicio de 30 segundos (Bonjour, 2017); el tiempo de descanso entre los ejercicios y el volumen de entrenamiento para el grupo de estiramientos con el rodillo de espuma (figura 2) se organizó y se planificó siguiendo las recomendaciones de Cheatham, et al., (2015) y de Mohr,



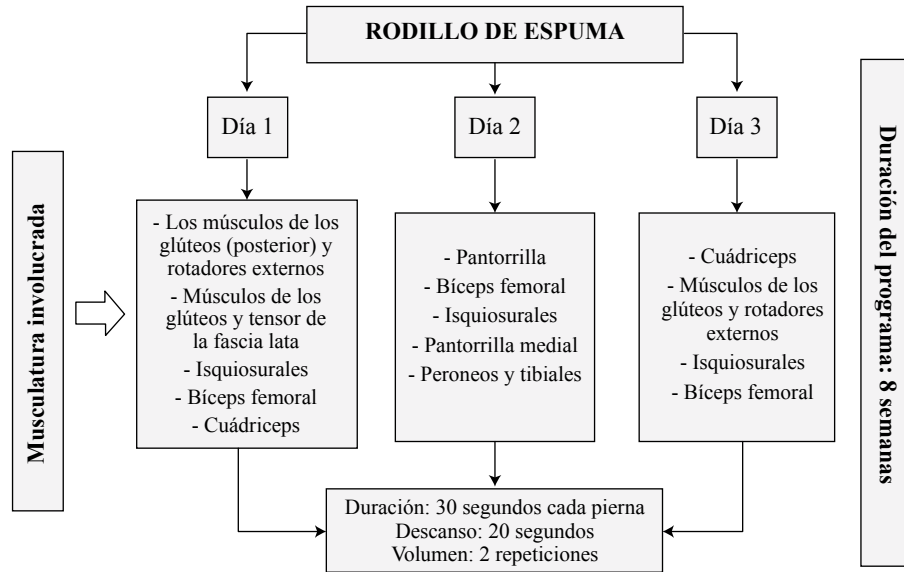
**Figura 1.** Ubicación de los electrodos para la toma del registro electromiográfico de los músculos isquiosurales durante los saltos verticales

*et al.* (2014), así mismo el programa de Facilitación Neuromuscular Propioceptiva se planteó desde la perspectiva de **McAtee, R. y Charland** (2007), quienes en su libro *Estiramientos Facilitados* 3ª edición, sugieren la intensidad, el tiempo, el volumen y la progresión de la técnica FNP (estiramiento, contracción, estiramiento), como aparece en la figura 3

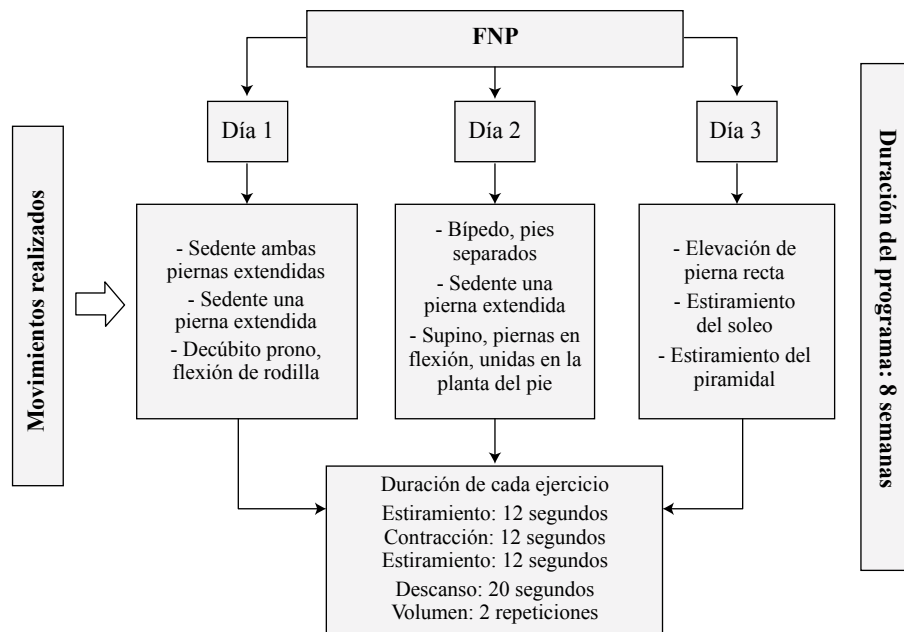
La progresión semana a semana de los dos programas se efectuó aumentando la intensidad de los ejercicios con base en la percepción subjetiva del esfuerzo medida mediante

la escala de Borg modificada por **Castañer, et al.** (2015), **Alberto, et al.** (2016) y **Foster** (1998). Para finalizar el procedimiento se hizo la evaluación posterior a la intervención.

**Análisis estadístico.** El análisis estadístico se realizó con el programa *IBM Statistical Package for the Social Sciences SPSS®*, versión 23. Se aplicaron pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas (de Shapiro Wilk y de Levene, respectivamente); a las variables que cumplieran con la normalidad se les aplicaron la t de Student y la exacta de Fisher para determinar la significación estadística dentro de los



**Figura 2.** Plan de intervención con el rodillo de espuma (Cheatham, et al., 2015; Mohr, et al., 2014). Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.** Plan de intervención con facilitación neuromuscular propioceptiva (FNP) (McAtee, R. & Charland, 2007). Fuente: elaboración propia.

grupos antes y después de desarrollar los programas de flexibilidad, y se aplicó la prueba de Scheffé para comparar las medias entre los grupos. En cuanto a las pruebas no paramétricas, se utilizó la prueba U de Mann Withney.

Para el cálculo del tamaño del efecto, se utilizó el valor de eta parcial al cuadrado y la prueba de modelo lineal generalizado (MLG) univariante para el test de flexibilidad y multivariante para la potencia de salto en términos de RMS, así como las pruebas *post hoc* de Scheffé y Tukey y de comparación de medias empleando el método de *bootstrapping*.

**Aspectos éticos y legales.** Para el desarrollo del presente estudio se tuvieron en cuenta la Declaración de Helsinki, en la cual se establecen los principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos (**World Medical Association - AMM**, 2013), y la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud de la República de Colombia sobre las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud (**Ministerio de Salud**, 1993). Además, se contó con la aprobación y el aval del Comité de ética para la investigación científica expedido por la **Vicerrectoría de Investigaciones Universidad Del Cauca** (2015).

## Resultados

Con relación a las medidas sociodemográficas y antropométricas, los participantes tenían una edad promedio de

24,35 años +/- 3,86, con un índice de masa corporal de 24,45 +/- 2,12; clasificándose como ‘normopeso’, con un porcentaje de grasa de 9,09 +/- 1,703 y una media de la sumatoria de pliegues de 83,96 +/- 22,628.

En cuanto a los antecedentes deportivos, el 39 % de los participantes llevaba más de nueve años practicando fútbol sala; entrenaban cinco días a la semana (56,5 %), con un promedio de dos horas diarias por sesión de entrenamiento; el 52,2 % de ellos jugaba en la posición de alero, y la mayoría de los futbolistas (78,3%) utilizaban el pie derecho.

Se encontró una disminución en la sumatoria de ocho pliegues entre los grupos de rodillo de espuma y facilitación neuromuscular propioceptiva, así como una disminución en los valores de la sumatoria de pliegues de miembros inferiores del grupo de rodillo de espuma y el grupo de control después de la intervención (Tabla 1).

El grupo de rodillo de espuma registró una significación estadística menor a 0,05 y una correlación muy alta pero negativa, evidenciando que cuanto menor es el porcentaje de grasa, mayor es la altura en los saltos SJ, CMJ, ABK, unipodal derecho y unipodal izquierdo (Tabla 2).

Al comparar la altura del salto pre y post-test (figura 4) se encontró que en el grupo de rodillo de espuma con el de control, se encontró un aumento estadísticamente

**Tabla 1.** Variables antropométricas distribuidas por grupos de intervención

Variables antropométricas	Grupos								
	Rodillo de espuma			Facilitación neuromuscular propioceptiva			Control		
	Antes del test	Después del test	SE	Antes del test	Después del test	SE	Antes del test	Después del test	SE
Índice de masa corporal	25,92	25,65	0,263	24,56	24,38	0,779	22,67	22,45	0,86
Sumatoria de 8 pliegues (mm)	97,00	82,25	<b>0,012*</b>	86,63	75,38	<b>0,012*</b>	66,00	65,71	0,92
Sumatoria de pliegues muslo y pantorrilla (mm)	16,38	13,00	<b>0,027*</b>	15,38	13,88	0,078	13,57	12,43	<b>0,08*</b>
Porcentaje de grasa (%)	9,95	9,81	0,310	9,31	8,90	0,122	7,87	8,08	0,31

Fuente: Visor de resultados de SPSS, versión 23, elaboración propia

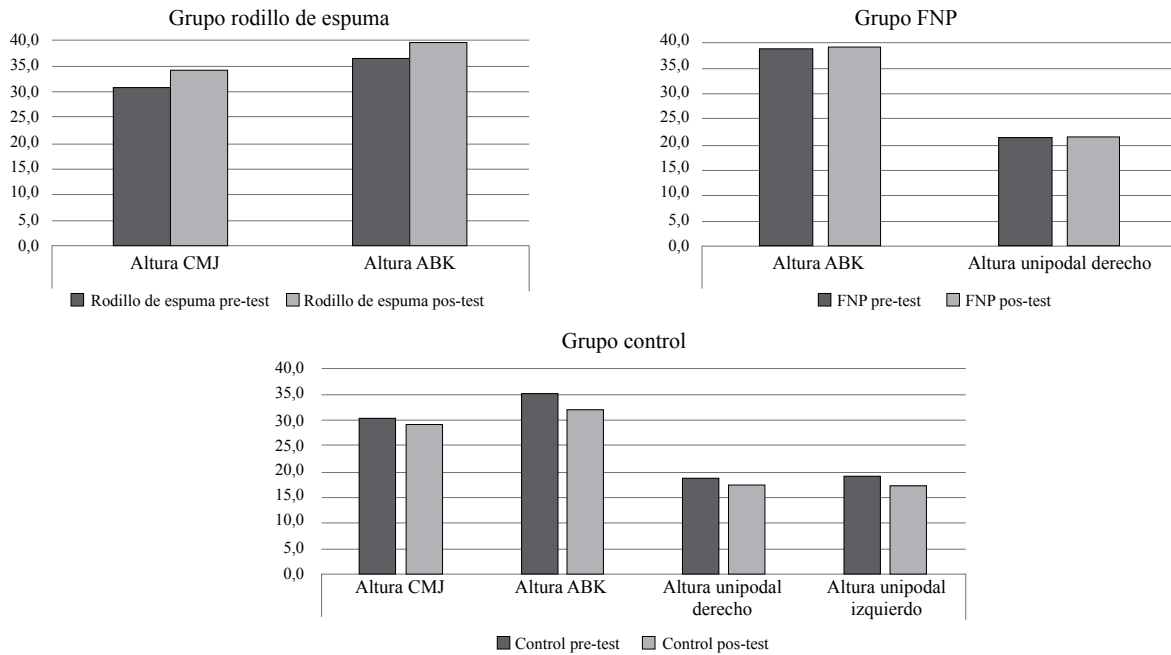
\*SE: Significación estadística: p inferior a 0,05

**Tabla 2.** Relación entre el porcentaje de grasa y la potencia del salto en los futbolistas participantes

Porcentaje de grasa	Rodillo de espuma		Facilitación neuromuscular propioceptiva		Control	
	SE	Correlación	SE	Correlación	SE	Correlación
Altura salto SJ	<b>0,007*</b>	-0,855	0,690	0,169	0,760	-0,143
Altura salto CMJ	<b>0,002*</b>	-0,905	0,548	0,252	0,939	-0,036
Altura salto ABK	<b>0,000*</b>	-0,994	0,520	-0,268	1,000	0,000
Altura salto pierna derecha	<b>0,002*</b>	-0,898	<b>0,020*</b>	-0,790	0,294	-0,464
Altura salto pierna izquierda	<b>0,020*</b>	-0,790	0,435	-0,323	0,310	-0,450

Fuente: Visor de resultados de SPSS versión 23, elaboración propia.

\*SE: Significación estadística: p inferior a 0,05



**Figura 4.** Comparación de la altura del salto (cm) entre los grupos antes y después de la intervención. Fuente: Visor de resultados de SPSS versión 23, elaboración propia. Fuente: elaboración propia.

significativo en la altura del salto de contramovimiento ( $p=0,029$ ), así como en la del salto Abalakov ( $p=0,028$ ), en tanto que con la técnica de facilitación neuromuscular propioceptiva hubo un aumento estadísticamente significativo en comparación con el grupo de control en los valores de los saltos Abalakov y unipedal derecho de  $p=0,042$  y  $p=0,048$ , respectivamente; en el grupo de control se evidenció una disminución estadísticamente significativa en los resultados de los saltos de contramovimiento, Abalakov, y unipedal derecho e izquierdo ( $p=0,001$ ,  $p=0,006$ ,  $p=0,002$  y  $p=0,028$ , respectivamente).

Al comparar los grupos de rodillo de espuma y facilitación neuromuscular propioceptiva con el grupo de control, en el salto en cuclillas se presentó una disminución estadísticamente significativa de los valores de la RMS de los músculos semitendinoso y bíceps femoral derecho, así como una disminución en la RMS del músculo semitendinoso izquierdo al comparar los resultados del grupo de rodillo de espuma con el grupo de control. En el salto de contramovimiento, al comparar el grupo de rodillo de espuma con el de control, se evidencio una disminución estadísticamente significativa en los valores de la RMS de los músculos semitendinoso y bíceps femoral derecho, así como en el músculo semitendinoso izquierdo, en tanto que al comparar el grupo F de rodillo de espuma con el de control, solo disminuyó la RMS en el músculo semitendinoso derecho. Por último, en el salto unipedal se encontró una disminución estadísticamente significativa en la RMS del músculo bíceps femoral derecho entre el grupo de facilitación neuromuscular propioceptiva y el grupo de control (Tabla 3).

**Tabla 3.** Comparación intergrupual de la RMS de los músculos isquiosurales

Salto	Activación muscular	Grupos	SE
SJ	RMS semitendinoso derecho	Rodillo de espuma	<i>Vs.</i> Control 0,042
		FNP	<i>Vs.</i> Control 0,020
	RMS bíceps femoral derecho	Rodillo de espuma	<i>Vs.</i> Control 0,032
		FNP	<i>Vs.</i> Control 0,045
	RMS semitendinoso izquierdo	Rodillo de espuma	<i>Vs.</i> Control 0,010
CMJ	RMS semitendinoso derecho	Rodillo de espuma	<i>Vs.</i> Control 0,020
		FNP	<i>Vs.</i> Control 0,014
	RMS bíceps femoral derecho	Rodillo de espuma	<i>Vs.</i> Control 0,023
	RMS semitendinoso izquierdo	Rodillo de espuma	<i>Vs.</i> Control 0,000
Unipedal	RMS bíceps femoral derecho	FNP	<i>Vs.</i> Control 0,045

Fuente: Visor de resultados de SPSS versión 23, elaboración propia.  
\*SE: Significación estadística: p inferior a 0,05

La tabla 4 muestra que en la prueba de flexibilidad de sentarse y alcanzar, al comparar los grupos no se registró una diferencia estadísticamente significativa ( $p=0,072$ ), sin

**Tabla 4.** Tamaño del efecto en la prueba de sentarse y alcanzar y valores de la RMS después de la intervención

<b>Prueba de efectos entre sujetos - Flexibilidad en la prueba de sentarse y alcanzar</b>			
		SE	Eta parcial al cuadrado
Interceptación		0,000	0,556
Grupo		0,072	0,231
<b>Comparación por parejas</b>			
(I)	(J)	SE	Diferencia de medias (I-J)
Control (2,314±6,7952)	Rodillo de espuma (7,375±8,0345)	0,214	-5,0607
	FNP (10,375±3,5431)	0,026	-8,0607
FNP (10,375±3,5431)	Rodillo de espuma (7,375±8,0345)	0,350	3,0000
<b>Prueba de efectos inter-sujetos - RMS en los saltos (CMJ, SJ, ABK)</b>			
		SE	Eta parcial al cuadrado
Interceptación		0,000	0,996
Grupo		0,206	0,840
<b>Prueba <i>post hoc</i> de comparaciones múltiples</b>			
(I)	(J)	SE	Diferencia de medias (I-J)
<b>RMS salto SJ músculo semitendinoso derecho, final</b>			
Rodillo de espuma (0,15263±0,45663)	FNP	0,922	0,01263
	Control	<b>0,033</b>	-0,09295*
FNP (0,14000±0,61894)	Rodillo de espuma	0,922	-0,01263
	Control	<b>0,015</b>	-0,10557*
Control (0,24557±0,86835)	Rodillo de espuma	<b>0,033</b>	0,09295*
	FNP	<b>0,015</b>	0,10557*
<b>RMS salto SJ músculo bíceps femoral derecho final</b>			
Rodillo de espuma (0,14663±0,47656)	FNP	0,985	-0,00450
	Control	<b>0,025</b>	-0,07952*
FNP (0,15113±0,038432)	Rodillo de espuma	0,985	0,00450
	Control	<b>0,035</b>	-0,07502*
Control (0,22614±0,072474)	Rodillo de espuma	<b>0,025</b>	0,07952*
	FNP	<b>0,035</b>	0,07502*
<b>RMS salto SJ músculo semitendinoso izquierdo final</b>			
Rodillo de espuma (0,12525±0,033281)	FNP	0,341	-0,03312
	Control	<b>0,007</b>	-0,08204*
FNP (0,15838±0,042251)	Rodillo de espuma	0,341	0,03312
	Control	0,126	-0,04891
Control (0,20729±0,060802)	Rodillo de espuma	<b>0,007</b>	0,08204*
	FNP	0,126	0,04891
<b>RMS salto CMJ músculo semitendinoso derecho final</b>			
Rodillo de espuma (0,15650±0,039123)	FNP	0,981	0,00575
	Control	<b>0,015</b>	-0,09779*
FNP (0,15075±0,065939)	Rodillo de espuma	0,981	-0,00575
	Control	<b>0,010</b>	-0,10354*



Control (0,25429±0,074819)	Rodillo de espuma	<b>0,015</b>	0,09779*
	FNP	<b>0,010</b>	0,10354*
<b>RMS salto CMJ músculo bíceps femoral derecho final</b>			
Rodillo de espuma (0,14213±0,037177)	FNP	0,689	-0,02050
	Control	<b>0,017</b>	-0,07745*
FNP (0,16263±0,043474)	Rodillo de espuma	0,689	0,02050
	Control	0,091	-0,05695
Control (0,21957±0,065653)	Rodillo de espuma	<b>0,017</b>	0,07745*
	FNP	0,091	0,05695
<b>RMS salto CMJ musculo semitendinoso izquierdo final</b>			
Rodillo de espuma (0,12675±0,033457)	FNP	<b>0,048</b>	-0,04275*
	Control	<b>0,000</b>	-0,08582*
FNP (0,16950±0,033076)	Rodillo de espuma	<b>0,048</b>	0,04275*
	Control	0,055	-0,04307
Control (0,21257±0,034253)	Rodillo de espuma	<b>0,000</b>	0,08582*
	FNP	0,055	0,04307
<b>RMS salto pierna derecha musculo bíceps femoral final</b>			
Rodillo de espuma (0,22325±0,074133)	FNP	0,885	0,01875
	Control	0,089	-0,09204
FNP (0,20450 ±0,49179)	Rodillo de espuma	0,885	-0,01875
	Control	<b>0,035</b>	-0,11079*
Control (0,31529±0,108465)	Rodillo de espuma	0,089	0,09204
	FNP	<b>0,035</b>	0,11079*

\*SE. Significación estadística

embargo, la eta parcial al cuadrado tuvo un valor de 0,231, lo que indica que el tamaño del efecto fue moderado. El valor de la interceptación evidenció que estadísticamente hubo una diferencia significativa entre los grupos, con un valor de  $p=0,000$  y un valor de eta parcial al cuadrado de 0,556, lo que da cuenta de un tamaño del efecto marcado, por lo que al comparar mediante la prueba *post hoc* de Scheffe, se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos de control y de facilitación neuromuscular propioceptiva, con una significación de  $p=0,026$  (aplicando un procedimiento de *bootstrapping*).

Asimismo, los valores de la RMS en la comparación general de los grupos no reflejaron una diferencia estadísticamente significativa ( $p=0,206$ ), sin embargo, el eta parcial al cuadrado registró un valor de 0,840, lo que indica que el tamaño del efecto fue marcado. El valor de la interceptación evidenció que estadísticamente hubo una diferencia significativa entre los grupos, con un valor de  $p=0,000$  y un valor de eta parcial al cuadrado de 0,996, es decir, se registró un marcado tamaño del efecto, por lo que, al comparar mediante la prueba *post hoc* de Tukey con un procedimiento de *bootstrapping*, se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre el grupo de control y

los grupos de facilitación neuromuscular propioceptiva y de rodillo de espuma para la mayoría de variables, excepto las de “RMS salto CMJ músculo bíceps femoral izquierdo final”; “RMS salto ABK músculo semitendinoso derecho final”; “RMS salto ABK músculo bíceps femoral derecho final”; “RMS salto ABK músculo bíceps femoral izquierdo final”; RMS salto pierna derecha músculo semitendinoso final”, y “RMS salto pierna izquierda musculo bíceps femoral final” ( $p>0,05$ ).

## Discusión

Las características sociodemográficas y físicas de una población de deportistas varían según diversos factores como el perfil genético, el período del entrenamiento, el nivel competitivo y la edad de los jugadores. Sebastia-Amat, *et al.* (2017) y Matzenbacherab, *et al.* (2014) plantean que la estatura y el peso corporal de los deportistas de fútbol sala es una variable determinante en el rendimiento deportivo: la estatura debe estar entre  $172,8 \pm 5,5$  y  $184 \pm 2$  cm y el peso, entre  $68,5 \pm 9,5$  kg y  $85,9 \pm 10,2$  kg, lo que sugiere que la población evaluada en el presente estudio presentó una talla y un peso por debajo del promedio sugerido para la práctica de este deporte, aunque el IMC promedio, de  $24,4 \pm 2,1$ , sí

se encuentra dentro de los rangos sugeridos por diferentes autores (**Cecil, et al., 2017; Avelar, et al., 2008**).

Con relación al porcentaje de grasa y la potencia del salto, se encontró que la significación estadística entre estas dos variables y la correlación negativa fueron muy altas en el grupo de rodillo de espuma; es decir, que a menor porcentaje de grasa, mayor la altura en los saltos, tal como lo describen **Rendón-Morales, et al. (2017)** y **Sebastiá-Amat, et al. (2017)**, quienes concluyen que cuanto más alta es la cantidad de masa grasa presente en el atleta, menor es el rendimiento del salto vertical, variable que se puede ver afectada por el estilo de vida y la nutrición del deportista. Asimismo, se debe tener en cuenta que la relación entre el porcentaje de grasa y las capacidades físicas fluctúa en los deportistas, ya que durante los periodos preparatorios o competitivos las capacidades funcionales de los atletas tienden a aumentar (**Fuke, et al., 2009**).

Al analizar los cambios en la altura del salto en el grupo de rodillo de espuma, se observó un aumento significativo antes y después de la intervención en los saltos de contramovimiento y Abalakov, lo cual se debe a que este método de estiramiento no solo mejora la liberación de adherencias musculares, sino también la capacidad de alargamiento y la velocidad de contracción de las fibras musculares (**Lavandero, et al., 2017**). Además, el uso del rodillo de espuma comprado con otras técnicas de estiramiento mejora de manera patente el potencial, la velocidad y la agilidad en las pruebas de rendimiento (**Peacock, et al., 2014**). Asimismo, el rodillo de espuma mejora sustancialmente la sensibilidad del músculo, mejorando la capacidad de aceleración, la potencia y la resistencia a la fuerza del músculo (**Pearcey, et al., 2015**). Sin embargo, cabe aclarar que una de las limitaciones que presenta el estudio fue que no se consideraron las cargas de entrenamiento realizadas por el entrenador para variables como la fuerza y la velocidad, capacidades que pueden influir en los resultados, lo cual debe tenerse en cuenta en próximos estudios en este tema.

En este mismo sentido, los integrantes del grupo de facilitación neuromuscular propioceptiva presentaron un aumento significativo en la altura de los saltos Abalakov y unipodal derecho, mientras que el grupo de control presentó una disminución en los resultados de la evaluación posterior a la intervención. Esto se debe, en gran medida, a que la técnica de facilitación neuromuscular propioceptiva incorpora la contracción y la relajación muscular en posiciones de amplitud articular máxima, generando un mayor estímulo propioceptivo, reduciendo los niveles de actividad eléctrica y aumentando la sensación de relajación muscular (**Da Rocha-Mafra, et al., 2013**).

Es importante anotar que en los saltos de contramovimiento, Abalakov y unipodales se produjeron los cambios más significativos; estos movimientos requieren de una gran aceleración e incrementan la eficacia mecánica y la potencia del músculo. Neurofisiológicamente esto se puede explicar gracias a la activación del reflejo miotático, ya que

el estiramiento rápido de un grupo muscular produce un aumento en la acumulación de energía elástica, facilitando el aumento de la potencia durante la posterior contracción concéntrica, lo que se denomina como ciclo de estiramiento-acortamiento (**Gutiérrez-Dávila, et al., 2015**).

La cuantificación de la señal eléctrica refleja la actividad fisiológica en la unidad motora durante la contracción muscular, conocida como RMS (**Yukio-Fukuda, et al., 2010**) vastus medialis, lateralis, biceps femoris, semitendinosus, and brachial biceps muscles. Methods: The analysis was performed on 24 females, university students with a mean age of 20 ( $\pm 6$ ). En este estudio los valores en la evaluación posterior disminuyeron para los grupos experimentales, en tanto que en el grupo de control se registró un aumento en los valores de la RMS después de la intervención comparados con las evaluaciones iniciales. Esto se debe, en gran parte, a que las técnicas de estiramiento utilizadas con el rodillo de espuma y de facilitación neuromuscular propioceptiva mejoran el ciclo de estiramiento – acortamiento, activando el reflejo miotático, lo cual ayuda a aprovechar la energía elástica, es decir, la capacidad que tiene el músculo para almacenar energía durante el estiramiento y utilizarla en una posterior contracción o acción de potencia (**Belmonte-Férez, 2015**). Por esta razón, los valores de la RMS disminuyeron después de la intervención, ya que los músculos isquiosurales necesitaron una menor activación para generar una actividad explosiva, aumentando la potencia media de los músculos involucrados en el salto vertical sin ocasionar un mayor gasto energético (**Rousanoglou, et al., 2013**).

Es claro que el uso del rodillo de espuma, en comparación con la aplicación de la técnica de facilitación neuromuscular propioceptiva, genera mayores cambios electromiográficos. **Button, et al. (2014)** utilizaron en su estudio el rodillo de espuma en actividades de 20 a 60 segundos y analizaron el rango de movimiento en la articulación de la rodilla y su efecto durante la estocada, encontrando que su uso aumentó de manera significativa la amplitud de movimiento de la articulación y la eficiencia neuromuscular durante la estocada, lo que se reflejó en una disminución del promedio del valor de la RMS a medida que aumentaba el uso del masajeador o rodillo de espuma. Esto concuerda con los resultados del presente estudio, pero, por el contrario, estos autores encontraron un incremento significativo en el arco de movilidad articular, sin cambios importantes en los valores electromiográficos después de usar el rodillo de espuma durante actividades de 5 y 10 segundos, lo cual indica que para que su uso disminuya los valores de la RMS se debe aplicar por más de 20 segundos.

## Conclusiones

Cuando el índice de masa corporal y el porcentaje de grasa aumentan sus valores, estos inciden negativamente en la potencia del salto, situación que debe ser tomada en cuenta para el control del rendimiento deportivo y la valoración médica y física de los futbolistas.

Tanto el rodillo de espuma como la facilitación neuromuscular propioceptiva parecen ser eficaces en el mejoramiento de la potencia del salto después de una intervención de ocho semanas con un estímulo semanal de tres veces por semana de entrenamiento de la musculatura isquiosural.

El comportamiento muscular durante el salto después de una intervención de entrenamiento de la flexibilidad de la musculatura isquiosural parece ser efectiva para mejorar la capacidad de reclutamiento motor, facilitando una menor activación con mayor rendimiento de la fibra muscular para contraerse y generar una contracción rápida y fuerte que se traduce en un movimiento más potente y favorece el rendimiento deportivo del futbolista.

Por último, en este estudio se registraron resultados favorables al entrenar la flexibilidad de manera planificada y estructurada a partir de dos técnicas de estiramiento, las cuales pueden ser utilizadas por los entrenadores o fisioterapeutas durante los procesos de entrenamiento para mejorar el rendimiento deportivo. Por otra parte, se sugiere continuar con la investigación sobre la relación de estas dos variables en el rendimiento del atleta con un mayor número de participantes o con otras técnicas de estiramiento que puedan brindar información para mejorar los procesos de entrenamiento en el fútbol sala.

### Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad del Cauca, al programa de Maestría en Deporte y Actividad Física y al Club Atlético Cauca, por permitirnos realizar este proyecto.

### Contribución de los autores

Enmanuel Portilla-Dorado: elaboración base de datos, análisis estadístico, redacción del artículo y autor de correspondencia. Andrés Villaquiran-Hurtado: diseño del estudio, recolección de los datos, redacción del artículo. Nancy Jannet Molano-Tobar: revisión de la literatura, trabajo de campo, análisis de resultados, redacción del artículo.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

### Referencias

- Alberto, M. G., Lavaho, M., Milena, S. (2016). Percepción del esfuerzo en entrenamiento de futbolistas categoría sub 15. *Revista Edu-Física.Com Ciencias Aplicadas al Deporte*. **8**: 43-75.
- Álvarez-Pérez, P. R., & López-Aguilar, D. (2018). Modelo explicativo sobre trayectorias vitales y desarrollo vocacional en deportistas de alto nivel. *Revista Retos*. **34**: 51-56 (2º semestre).
- Aniotz, A. F., Ramírez, S. A., Guzmán, R., Espinoza, R. M. (2015). Effect of a plyometric training program on jumping biomechanics in female youth volleyball players. *Revista Ciencias de la Actividad Física UCM*. **16** (1): 37-44.
- Arins, F. B., Carminatti, L. J., Salvador, P. C. do N., Guglielmo, L. G. A. (2015). Physiological characteristics, evaluation and prescription of aerobic training in Futsal.

*Rev. Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano Desempenho Humano*. **17** (6): 753-762. Doi: 10.5007/1980-0037.2015v17n6p753

- Avelar, A., Dos santos, K., Cyrino, E. S., Carvalho, F. O., Ritti Dias, R. M., Gobbo, L. A. (2008). Perfil antropométrico e de desempenho motor de atletas paranaenses de futsal de elite. *Revista Brasileira de Cineantropometria & Desempenho Humano*. **10** (1): 76-80.
- Ayala, F., Sainz-de Baranda, P., Cejudo, A., De Ste. Croix, M. (2010). Efecto de un programa de estiramientos activos en jugadoras de fútbol sala de alto rendimiento. *Ciencia, Cultura y Deporte*. **5** (15): 159-167. <https://doi.org/10.12800/ccd.v5i15.105>
- Ayala, F., Sainz-de Baranda, P., De Ste Croix, M., Santonja, F. (2012). Reproducibility and criterion-related validity of the sit and reach test and toe touch test for estimating hamstring flexibility in recreationally active young adults. *Physical Therapy in Sport*. **13** (4): 219-226. Doi: 10.1016/j.ptsp.2011.11.001
- Belmonte-Férez, J. D. (2015). Efectos de un programa de estiramientos FNP en el salto vertical y el rango de movimiento en futbolistas profesionales. *RediUMH Universidad Miguel Hernández*. **7** (21): 1-10.
- Bonjour, L. (2017). El foam roller como herramienta de prevención de la lesión de isquiotibiales en futbolistas amateurs. Universidad Pública de Navarra. 1-103.
- Bosco, C., Luhtanen, P., Komi, P. V. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. **50** (2): 273-282. Doi: 10.1007/BF00422166
- Button, D. C., Bradbury-squired, D., Nofall, J., Sullivan, K., Behm, D. G., Power, K. (2014). Roller-Massager Application to the Quadriceps and Knee-Joint Range of Motion and Neuromuscular Efficiency During a Lunge. *Journal of Athletic Training*. **49** (5): 133-140. Doi: 10.4085/1062-6050-49.5.03
- Carminatti, L. J., Arins, F. B., Silva, J. F., Santos, P. C., Silva, C. E. M., Guglielmo, L. G. A. (2015). Intensidade de esforço em jogos oficiais e simulados de futsal feminino. *Revista Brasileira de Ciência e Movimento*. **23** (3): 97-104.
- Castañer, M., Saüch, G., Camerino, O., Sánchez-Algarra, P., Anguera, M. T. (2015). Percepción de la intensidad al esfuerzo: Un estudio multi-method en actividad física. *Cuadernos de Psicología Del Deporte*. **15** (1): 83. Doi: 10.4321/S1578-84232015000100008
- Cecil, F., Lima, T., Mineiro, A., Guedes, D., Scorcine, C., Madureira, F., Pereira, R. (2017). Características fisiológicas e antropométricas de atletas profissionais de futebol e futsal. *Revista Brasileira de Futsal e Futebol*. **9** (32): 21-26.
- Cheatham, S. W., Kolber, M. J., Cain, M., Lee, M. (2015). The effects of self-myofascial release using a foam roll or roller massager on joint range of motion, muscle recovery, and performance: a systematic review. *International Journal of Sports Physical Therapy*. **10** (6): 827-838. Doi: 10.12968/ijtr.2014.21.12.569
- Da Rocha-Mafra, O., Soares, J., Alves de Moraes Filho, J., Chulvi-Medrano, I., Sánchez-Colado, J. C., Martín-Dantas, E. H. (2013). Análisis electromiográfico del efecto de relajación en el bíceps femoral en sujetos sometidos a estiramientos vs. facilitación neuromuscular propioceptiva. *Fisioterapia*. **35** (2): 47-51. Doi: 10.1016/j.ft.2012.05.007

- Dal Pupo, J., Detanico, D., Arins, F. B., Nascimento, P. C., Guglielmo, L. G. A., Dos Santos, S. G.** (2016). Capacidade de sprints repetidos e níveis de potência muscular em jogadores de futsal das categorias sub-15 e sub-17. *Revista Brasileira de Ciências Do Esporte*. 39, n.1, pp.73-78; Vol.?: Doi: 10.1016/j.rbce.2016.01.010
- Departamento Administrativo del Deporte, la Recreación, la Actividad Física y el Aprovechamiento del Tiempo Libre - Coldeportes.** (2015). *Lineamientos de Política Pública en Ciencias del Deporte en Medicina*. Bogotá, D.C. Tiraje de 1 a 1.400, Printed in Colombia, ISBN: 978-958-58238-3-9
- Foster, C.** (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 30 (7). 1164-1168.
- Fuke, K., Dal Pupo, J., Matheus, S. C.** (2009). Evaluación de la composición corporal y de la flexibilidad en futbolistas profesionales en diferentes etapas del ciclo de entrenamiento. *Archivos de Medicina Del Deporte*. 26 (129): 7-13.
- Gutiérrez-Dávila, M., Javier, F., Girela, G., Roperro, C. G., Javier, F., Ruiz, R.** (2015). Efecto de la intensidad del contramovimiento sobre el rendimiento del salto vertical. *Apunts. Educación Física y Deporte*. 1 (119): 87-96.
- Gutiérrez-Manzanedo, J. V., Del Rosario-Fernández Santos, J., Ponce González, J. G., Lagares-Franco, C., De Castro Maqueda, G. R.** (2018). Extensibilidad isquiosural en jugadoras de élite de fútbol. (33): 175-178. consultado 5 de febrero de 2019, Consultado en: <http://ezproxy.cefite.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=126604340&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- Hermens, H. J., Freriks, B., Merletti, R., Stegeman, D., Blok, J., Rau, G., ... Hägg, G.** (1999). European Recommendations for Surface Electromyography. *Roessingh Research and Development*. 10: 8-11. Doi: 10.1016/S1050-6411(00)00027-4
- Lavandero, G. C., Anthony, P., Morales, R., Fabián, E., Analuiza, A., Santiago, E., ... Gibert, A. R.** (2017). Efectos de la autoliberación miofascial. Revisión sistemática. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*. 36 (2): 271-283.
- López, F. Lara, A. Espejo, N., Cachón, J.** (2015). Evaluación de la fuerza explosiva de extensión de las extremidades inferiores en escolares. *Apunts. Educación Física y Deportes*. 4 (122): 44-51. Doi: [http://dx.doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.\(2015/4\).122.05](http://dx.doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.(2015/4).122.05)
- Luarde, C., González, M., Aguayo, O.** (2014). Evaluación de la fuerza de salto vertical en voleibol femenino en relación a la posición de juego. *Revista Ciencias de La Actividad Física UCM*. 15 (2): 43-52.
- Matzenbacherab, F., Pasquarelle, B. N., Rabelo, F. N. L., Stanganelli, C. R.** (2014). Medicina del Deporte Demanda fisiológica no futsal competitivo. *Revista Andaluza de Medicina Del Deporte*. 7 (3): 122-131.
- McAtee, R., Charland, J.** (2007). *Estiramientos Facilitados. Estiramientos y fortalecimiento con facilitación neuromuscular propioceptiva*. Edición: 3ª Especialidad: Fisioterapia. Pp 212.
- Ministerio de Salud.** (1993). Resolución 8430 de 1993. Ministerio de Salud y Protección Social, República de Colombia, 1993. Octubre 4: 1-19.
- Mohr, A. R., Long, B. C., Goad, C. L.** (2014). Effect of Foam Rolling and Static Stretching on Passive Hip-Flexion Range of Motion. *Journal of Sport Rehabilitation*. 23 (4): 296-299. Doi: 10.1123/JSR.2013-0025
- Myer, G. D., Ford, K. R., Hewett, T. E.** (2005). The effects of gender on quadriceps muscle activation strategies during a maneuver that mimics a high ACL injury risk position. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 15 (2): 181-189. Doi: 10.1016/j.jelekin.2004.08.006
- Nelson, A. G., Kokkonen, J., Cornwell, A.** (2013). Acute muscle stretching inhibits maximal strength performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 69 (4): 411-415. Doi: 10.1080/02701367.2001.10608978
- Ogura, Y., Miyahara, Y., Naito, H., Katamoto, S., Aoki, J.** (2007). Duration of static stretching influences muscle force production in hamstring muscles. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 21 (3): 788-792. Doi: 10.1519/R-19535.1
- Peacock, C. A., Krein, D. D., Silver, T. A., Sanders, G., Kyle-Patrick, V. C.** (2014). An Acute Bout of Self-Myofascial Release in the Form of Foam Rolling Improves Performance Testing. *International Journal of Exercise Science*. 7 (3): 202-211.
- Pearcey, G., Bradbury-squires, D., Kawamoto, J.-E., Drinkwater, E. J., Behm, D. G., Button, D. C.** (2015). Foam Rolling for Delayed-Onset Muscle Soreness and Recovery of Dynamic Performance Measures. *Journal of Athletic Training*. 50 (1): 5-13. Doi: 10.4085/1062-6050-50.1.01
- Picabea, J. & Yanci, J.** (2015). Diferencias entre jugadores de fútbol, baloncesto y tenis de mesa en la capacidad de salto vertical y horizontal. *Revista Iberoamericana de Ciencias de La Actividad Física y El Deporte*. 4 (2): 9-26.
- Rendón-Morales, P. A., Lara-Chalá, L. del R., Hernández, J. J., Alomoto-Navarrete, M. R., Landeta-Valladares, L. J., Calero-Morales, S.** (2017). Influencia de la masa grasa en el salto vertical de basquetbolistas de secundaria. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*. 36 (1): 1-13. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03002017000100015](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03002017000100015)
- Rodrigues Santa Cruz, R. A., Diniz Campos, F. A., Branco Gomes, I. C., Pellegrinotti, Í.L.** (2016). Percepção subjetiva do esforço em jogos oficiais de Futsal. / Perception subjective effort in official Futsal games. *Revista Brasileira de Ciência e Movimento: RBCM*. 24 (1): 80-85. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=s3h&AN=114631315&lang=pt-br&site=ehost-live>
- Rodríguez, I.** (2016). Valoración de la composición corporal por antropometría y bioimpedancia eléctrica. trabajo de fin de grado, Universidad Francisco de Vitoria, Madrid, Pp: 73
- Rousanoglou, E. N., Barzouka, K., Boudolos, K.** (2013). Seasonal changes of jumping performance and knee muscle strength in under-19 women volleyball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 27 (4): 1108-1117.
- Ruiz, H.** (2013). Caracterización de la potencia en miembro inferior de jugadores de la selección de voleibol de la universidad del valle (tesis de pregrado) Universidad del Valle. Colombia.
- Sainz-de Baranda-Andújar, P. & Ayala, F.** (2010). Efecto agudo del estiramiento sobre la agilidad y coordinación de movimientos rápidos en jugadores de fútbol de División de Honor. *Kronos. Revista Científica de Actividad Física y Deporte*. 17 (1): 21-28.
- Sainz-de Baranda, P., Cejudo, A., Ayala, F.** (2012). Fiabilidad absoluta del test de elevación de la pierna recta en jugadores de fútbol sala. *Revista Kronos, rendimiento en deporte*. 11 (1): 30-35.

- Santiago, A., Granados, C., Quintela, K., Irigoyen, J. Y.** (2015). Diferencias entre jugadores de fútbol de distintas edades en la capacidad de aceleración, cambio de dirección y salto. *Cultura, Ciencia y Deporte*. **10** (29): 135-143. Doi: 10.12800/ccd.v10i29.551
- Sebastiá-Amat, S., Espina-Agullo, J. J., Chinchilla-Mira, J. J.** (2017). Perfil de salto vertical, velocidad, flexibilidad y composición corporal de porteros de balonmano en categorías inferiores. *Retos. Nuevas Tendencias En Educación Física, Deporte y Recreación*. **32**: 248-251.
- Stewart, A., Marfell-Jones, M., Olds, T., de Ridder, H.** (2011). *Protocolo Internacional para la Valoración Antropométrica* (2011). ISBN 0 86803 712 5
- Vicerrectoría de Investigaciones - Universidad Del Cauca.** (2015). Marco ético legal, Código: PM-IV-6.1-OD-2 Versión: 1, Popayan - Colombia. Pp: 1-23.

- Woolstenhulme, M. T., Griffiths, C. M., Woolstenhulme, E. M., Parcell, A. C.** (2006). Ballistic stretching increases flexibility and acute vertical jump height when combined with basketball activity. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*. **20** (4): 799-803. Doi: 10.1519/R-18835.1
- World Medical Association (AMM).** (2013). Declaración de Helsinki de la AMM - Principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos. *Clinical Review & Education*. **310** (20). Doi: 10.1001/jama.2013.281053
- Yukio-Fukuda, T., Oliveira-Echeimberg, J., Pompeu, J. E., García-Lucareli, P. R., Garbelotti, S., Okano-Gimenes, R., Apolinário, A.** (2010). Root mean square value of the electromyographic signal in the isometric torque of the quadriceps, hamstrings and brachial biceps muscles in female subjects. *The Journal of Applied Research*. **10** (1): 32-39.

# Geometric model for interference and diffraction with waves and particles

✉ Román Castañeda<sup>1,\*</sup>, ✉ Giorgio Matteucci<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Physics school, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

<sup>2</sup> Department of Physics - University of Bologna, and CNISM, V/le B. Pichat, Bologna, Italy.

## Abstract

Interference and diffraction with classical waves and quantum particles is discussed in the framework of a geometric model based on its own physical principle and general law. The principle is the interaction between individual real point emitters, that characterize the waves and particles, and the virtual point emitters, that characterize the setup. The law is an energy equation that involves the energy of the wave disturbance or the particle arriving to any detector point and the potential energy determined by the setup. In this framework, the setup is configured in a preparation-measurement scheme with two accessible states named the source-turned-off and the source-turned-on states. Two-point correlation cones are prepared which induce geometric potential cones, that distribute the energy of the waves or particles to be measured, once the interaction between the point emitters takes place. Wave-particle duality, self-interference and wave collapse are irrelevant in the framework of this model. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Interference; Diffraction; Geometric potential; Point emitters.

## Modelo geométrico para interferencia y difracción con ondas y partículas

### Resumen

Se analiza la interferencia y la difracción, tanto de ondas clásicas como de partículas cuánticas, en el marco de un modelo geométrico basado en su propio principio y ley general. El principio es la interacción entre emisores puntuales reales individuales, que caracterizan a las ondas y las partículas, y emisores puntuales virtuales que caracterizan al arreglo experimental. La ley es una ecuación de energías que involucra a la perturbación ondulatoria o la partícula incidentes sobre un punto dado del detector y la energía potencial aportada por el arreglo. En esta teoría, el arreglo se configura en un esquema de preparación-medición con dos estados accesibles, denominados estado de fuente-apagada y estado de fuente-encendida. Así, se preparan conos de correlación espacial que inducen conos de potencial geométrico sobre los que se distribuye la energía a ser medida, luego que la interacción entre emisores puntuales se ha realizado. Las nociones de dualidad onda-partícula, auto-interferencia y colapso de la función de onda son irrelevantes en este modelo. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Interferencia; Difracción; Potencial geométrico; Emisores puntuales.

## Introduction

The wave superposition is the standard fundamental concept to explain interference and diffraction with classical waves and quantum particles. It plays the role of physical principle in the classical context (Born & Wolf, 1993), while in the quantum context, it is used as a mathematical procedure for the calculation of the spatial probability density associated to the particles (Feynman, *et al.*, 1965).

The mathematical formalization of both contexts bases on the Helmholtz equations corresponding to the spatial or time-independent parts of the classical wave equation in free-space and the field-free Schrödinger's equation, respectively. The term "wave" names the complex valued eigen-functions of the Laplacian operator in the respective Helmholtz equation. In addition, the same terminology and

mathematics is used for referring the results of the experiments, whose setups for waves and particles have the same configuration, differing only in scale.

However, the meanings of the term wave in such contexts are quite different. In classical optics, it describes the physical disturbance due to the electric field oscillations at each point in space. In quantum mechanics, it is called the complex amplitude of probability and its squared modulus determines the spatial probability density, i.e. it does not describe a physical disturbance. So, the wave superposition

\*Corresponding autor:

Román Castañeda; [rcastane@unal.edu.co](mailto:rcastane@unal.edu.co)

Received: December 17, 2018

Accepted: April 11, 2019

Editor: Jairo Roa Rojas

realizes the addition of disturbances of classical waves at each point of space but the determination of conditional probabilities to find the quantum particle at a given position.

These different interpretations of the wave superposition lead to the conclusion that interference of classical waves and quantum particles have not been explained from a common and unique physical principle. Moreover, the standard description of interference with single quantum particles, from electrons (Matteucci, *et al.*, 2013) to molecules (Nairz, *et al.*, 2003) (Juffmann, *et al.*, 2012), requires the assumptions of wave-particle duality, self-interference and quantum wave collapse, which turn this explanation in a mystery in the heart of quantum mechanics (Feynman & Hibbs, 1965).

Then, the question arises on the pertinence of searching for a unique physical principle of interference and diffraction with classical waves and quantum particles. A more accurate mathematical model should be discarded as pertinence criterion, because the high accuracy of the standard formulation has been corroborated by its predictions of a wide variety of interference and diffraction experiments. Consequently, any alternative formulation should maintain the mathematical fundamentals of the standard one.

Technology and innovation development in both classical and quantum physics is neither a pertinence criterion. Contemporary nano- and micro-technologies widely use the so-called wave nature of matter in current applications (Capelli, *et al.*, 2014). The theoretical development of quantum physics has not been hampered by the necessity of an alternative theory of interference and diffraction. Actually, the difficulties and limitations of the interference and diffraction description of quantum particles have been regarded as a point-feature or singularity of the quantum physics, i.e. “the only mystery in the heart of quantum mechanics”.

Thus, the main pertinence criterion seems to be epistemological, that is the challenge to solve this mystery by taking into account that only the necessary causes should be taken into account to explain physical phenomena and effects of the same kind should be attributed to the same cause. A successful response to that challenge should give more insight on the physics of interference and diffraction.

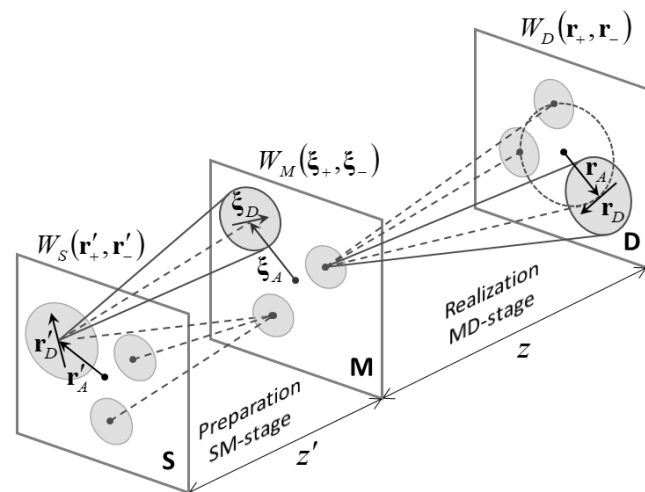
To this aim, a new description is proposed in the current paper. Its basic quantity is the two-point correlation, instead of the wave function, which is the basic quantity of the standard description. Although the two-point correlation was firstly used as basic quantity by the theory of optical coherence (Mandel & Wolf, 1995), an important difference between the new description and this theory is established. Indeed, the new description introduces a geometrical interpretation of the two-point correlation in close connection with the experimental setup configuration, section 2. In this context, the two-point correlation is contributed by the setup instead of being an attribute of the classical waves and the quantum wave functions, as assumed in the standard description (Mandel & Wolf, 1995). In addition, any experiment is

modeled according to the P&M (preparation-measurement) scheme with two accessible states named the source-turn-off and the source turn-on states. Specifically, the experiments prepare two-point correlations in the source-turn-off state and measure energy distributions in the source-turn-on state.

The physical principle of the new description of interference and diffraction is discussed in section 3. It is not the wave superposition and does not require support hypotheses like wave-particle duality, self-interference and quantum wave collapse. Regardless the different technology scales of the interference and diffraction experiments with classical waves and quantum particles, both the setup design requirements and the mathematical description of the experiments are essentially the same, section 4. Its non-paraxial formulation can predict the spatial distribution of the wave or particle energy along distances from the source comparable to the wavelength (Castañeda, *et al.*, 2016 a, b) (Castañeda, 2017 b), including polarization effects in case of electromagnetic waves (Castañeda, 2014) (Castañeda, 2016). So, the geometric model becomes an efficient tool for the development of very compact optical and quantum devices. In sections 5 and 6 some experimental evidences of its validity are discussed, and the conclusions are presented in section 7.

## The geometric interpretation

The conceptual sketch in Figure 1 realizes the P&M scheme for any interference or diffraction experiment with classical waves or quantum particles.



**Figure 1.** Conceptual sketch of the setup for field-free or free-space interference or diffraction. S: source plane, M: mask plane, and D: detector plane. The shadowed circles on each plane represent the structured supports of spatial coherence, and the  $W$ -functions are the two-point correlations at the respective planes. Reduced coordinates, indicated by the arrows on each plane, specify the pairs of point in any structured support. The solid line cone in the SM-stage represents the prepared correlation cone, while the dotted line cone in the MD-stage represents the energy cone to be measured.

Reduced coordinates are adopted in order to specify the two-point correlation at each plane i.e.  $(\mathbf{r}'_A, \mathbf{r}'_D)$  for the S-plane,  $(\xi_+, \xi_-)$  for the M-plane and  $(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_D)$  for the D-plane. They allow determining univocally pairs of points on the respective plane, equidistant from the point specified by the coordinate with suffix  $A$ , and with separation vectors given by the coordinate with suffix  $D$ , whose positions are then  $\mathbf{r}'_{\pm} = \mathbf{r}'_A \pm \mathbf{r}'_D/2$ ,  $\xi_{\pm} = \xi_A \pm \xi_D/2$  and  $\mathbf{r}_{\pm} = \mathbf{r}_A \pm \mathbf{r}_D/2$  respectively. Thus,  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$ ,  $W_M(\xi_+, \xi_-)$  and  $W_D(\mathbf{r}_+, \mathbf{r}_-)$  denote the two-point correlation at the S, M and D planes respectively, of any pair of points symmetrically placed with respect to the center denoted by the coordinate suffixed  $A$ . The area around these centers outside which the two-point correlation values are negligible is called the structured support of correlation (Castañeda & Matteucci, 2017). Thus, the separation vectors of the pairs of points enclosed by any structured support are shorter than the support size. Such pairs of points are correlated in some extent, while those with longer separation vectors are non-correlated.

It is known that the two-point correlation is the eigenfunction of the Laplacian operators of two Helmholtz equations, with the same eigen-value (Mandel & Wolf, 1995). Its mathematical form can be determined by solving the Helmholtz equations by the Green's function method. It allows expressing the two-point correlation on a plane as the output of a time-independent modal expansion defined in the volume delimited by a previous input plane and the output plane, with the following features: (i) the expansion kernel is a set of volumetric scalar geometrical modes, defined by the boundary conditions of that volume, and (ii) the values of the two-point correlation at the input plane are the input of the modal expansion.

It is worth noting that the two-point correlation is, in general, a spatial non-local function, but includes local values specified by the null separation vectors. These local values determine the spatial distribution of the energy at the output plane once the source of waves or particles is put into operation. It allows characterizing the P&M scheme of the experiments as follows: (i) preparation in the SM-stage means the determination of the output two-point correlation at the M plane, given an input two-point correlation at the S plane; (ii) measurement in the MD-stage means the determination of the output spatial distribution for the energy at the D plane, given a prepared two-point correlation at the M plane as input. So, the mathematical formulation of the P&M scheme is realized by

$$W_M(\xi_+, \xi_-) = \int_S d^2 r'_A \mathbf{W}_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_+, \xi_-), \quad (1a)$$

for the prepared two-point correlation at the M-plane, and

$$S_D(\mathbf{r}_A) = \int_M d^2 \xi_A \mathbf{W}_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A), \quad (1b)$$

for the spatial distribution for the energy to be measured at the D-plane. It is obtained by evaluating the two-point correlation at the D-plane for  $\mathbf{r}_D = 0$ , i.e.  $S_D(\mathbf{r}_A) = W_D(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_A)$ .

The integrands of Eqs. (1) are given by the non-paraxial modal expansions

$$\mathbf{W}_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_+, \xi_-) = \int_S d^2 r'_D W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) \Phi_{SM}(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-; \xi_+, \xi_-; k, z'), \quad (2a)$$

and

$$\mathbf{W}_{MD}(\xi_+, \xi_-; \mathbf{r}_A) = \int_M d^2 \xi_D W_M(\xi_+, \xi_-) \Phi_{MD}(\xi_+, \xi_-; \mathbf{r}_A; k, z), \quad (2b)$$

respectively, with  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$  the two-point correlation at the S-plane. The integration kernels in Eqs. (2) are the scalar, deterministic, non-paraxial and three-dimensional modes (Castañeda, 2017 b) (Castañeda & Matteucci, 2017)

$$\begin{aligned} \Phi_{SM}(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-; \xi_+, \xi_-; k, z') &= \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 t_S(\mathbf{r}'_+) t_S^*(\mathbf{r}'_-) \\ &\times \left( \frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_+ - \mathbf{r}'_A + (\xi_D - \mathbf{r}'_D)/2|}{|\mathbf{z}' + \xi_+ - \mathbf{r}'_A + (\xi_D - \mathbf{r}'_D)/2|^2} \right) \left( \frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_- - \mathbf{r}'_A - (\xi_D - \mathbf{r}'_D)/2|}{|\mathbf{z}' + \xi_- - \mathbf{r}'_A - (\xi_D - \mathbf{r}'_D)/2|^2} \right) \\ &\times \exp\left(ik|\mathbf{z}' + \xi_+ - \mathbf{r}'_A + (\xi_D - \mathbf{r}'_D)/2| - ik|\mathbf{z}' + \xi_- - \mathbf{r}'_A - (\xi_D - \mathbf{r}'_D)/2|\right) \end{aligned} \quad (3a)$$

defined in the volume of the SM-stage, and

$$\begin{aligned} \Phi_{MD}(\xi_+, \xi_-; \mathbf{r}_A; k, z) &= \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 t_M(\xi_+) t_M^*(\xi_-) \\ &\times \left( \frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_+ - \xi_D/2|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_+ - \xi_D/2|^2} \right) \left( \frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_- + \xi_D/2|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_- + \xi_D/2|^2} \right) \\ &\times \exp\left(ik|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_+ - \xi_D/2| - ik|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_- + \xi_D/2|\right) \end{aligned} \quad (3b)$$

defined in the volume of the MD-stage, where

$$t_S(\mathbf{r}'_{\pm}) = |t_S(\mathbf{r}'_{\pm})| \exp[i\phi_S(\mathbf{r}'_{\pm})]$$

and

$$t_M(\xi_{\pm}) = |t_M(\xi_{\pm})| \exp[i\phi_M(\xi_{\pm})]$$

are the complex transmissions of the S and the M-planes respectively. The quantities  $0 \leq |t_S(\mathbf{r}'_{\pm})|^2 \leq 1$  and  $0 \leq |t_M(\xi_{\pm})|^2 \leq 1$  are called the absorbance of the respective plane and determine the amount of the incident energy that crosses the plane (Born & Wolf, 1993). It is worth noting that the mode arguments denote the geometric features at the input and the output planes related by the modes. Indeed,  $\Phi_{SM}(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-; \xi_+, \xi_-; k, z')$  relates any structured support of correlation on the S-plane, specified by  $(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$  to each structured support on the M-plane given by  $(\xi_+, \xi_-)$ ; while  $\Phi_{MD}(\xi_+, \xi_-; \mathbf{r}_A; k, z)$  relates any structured support of correlation on the M-plane to each point  $\mathbf{r}_A$  on the detector at the D-plane. In this way, the modes in Eq.(3a) shape the space in the SM-stage in accordance to the stage boundary conditions, for the preparation of the two-point correlation at the M-plane; in turn, the modes in Eq.(3b) shape the space in the MD-stage in accordance to this stage boundary conditions, for the measurement of the power spectrum. It is worth remarking that the geometric modulation of the space provided by the modes in Eqs. (3) is independent from the physical and statistical properties of the source of waves or particles attached at the S-plane.



The  $k$  parameter of the modes plays an important role in the geometric modulation of the space. It is related to the eigen-value  $-k^2$  of the Laplacian operators in the Helmholtz equations solved by the two-point correlation, and can be expressed as  $k = 2\pi/\lambda$ , where  $\lambda$  denotes the length along which the exponential argument of the modes evolves in  $2\pi$ . This length is essentially determined by the setup boundary conditions and explains the scale differences in the setup design for material particles (nanoscale) and waves (microscale at visible frequencies). For this reason,  $\lambda$  is called the *space scale metric* (Castañeda, 2017 b) (Castañeda & Matteucci, 2017).

Now, it is crucial to clarify the relationship of the space scale metric with the optical and the de Broglie wavelengths  $\lambda'$ , defined as physical attributes of waves and particles by the formulas  $\lambda'v = c$  for a classical wave of frequency  $\nu$  and free-space speed  $c$ ,  $\lambda'E = hc$  for the photon of energy  $E$ , with  $h$  the Planck constant, and  $\lambda'p = h$  for a quantum particle momentum  $p$ . It is worth remarking that the standard formulation does not make difference between  $\lambda$  and  $\lambda'$ , thus labelling both symbols with the term wavelength and its physical meanings, and regarding its geometrical feature as a secondary property. In this sense, the expressions above involving  $\lambda'$  corroborate the wave nature of the quantum particles, thus supporting the assumption that interference and diffraction are distinctive behaviors of wave phenomena, including the quantum particles. In addition,  $k = 2\pi/\lambda'$ .

In contrast, the new interpretation (i) underlines the different meanings of  $\lambda$  and  $\lambda'$  as equally important, and (ii) interprets the expression  $\lambda' = \lambda$  as a coupling condition of the physical object (waves and particles) to the experimental setup, i.e. classical waves and quantum particles move according to the geometric modulation established by the modes of parameter  $k = 2\pi/\lambda$  only if their respective frequency, energy or momentum assure the achievement of the condition  $\lambda = \lambda'$ . Otherwise, their movement through the setup does not follow such geometric modulation. Because of these features, the new model proposes interference and diffraction as resulting from the geometric modulation of space determined by the setup configuration, instead of being the distinctive behaviors of wave phenomena. Furthermore, such features lead to the conclusion that interference and diffraction experiments should have the same configuration but different scales for classical waves and quantum particles, as widely reported in literature, for instance the double slit interference experiment in optics (Born & Wolf, 1993) and with single electrons (Matteucci, et al., 2013).

Now, let us analyze the meanings of Eqs. (2). They are modal expansions defined in the volumes of the SM- and the MD-stages respectively that describe the distributions of the respective input two-point correlations,  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$  and  $W_M(\xi_+, \xi_-)$ , over the geometric modes in the stages to give the prepared two-point correlation at the M-plane,  $W_M(\xi_+, \xi_-)$ , and the spatial distribution of the energy to be measured at the D-plane,  $S_D(\mathbf{r}_A)$ . The input two-point correlations have

energy units because they involve the energy distributions of the classical waves and the quantum particles at the corresponding planes, denoted by  $S_S(\mathbf{r}'_\pm)$  and  $S_M(\xi_\pm)$  respectively. In this way, the input two-point correlations include the physical and statistical attributes of the waves and particles moving in the setup. However, it is possible to analyze the pure geometrical (or energy independent) feature of interference and diffraction as follows.

Let us begin with the preparation of the two-point correlation in the SM-stage. The two-point correlation at the S-plane can be expressed as  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = \langle \tilde{\psi}_S(\mathbf{r}'_+) \tilde{\psi}_S^*(\mathbf{r}'_-) \rangle$ , with  $\langle \rangle$  and the asterisk denoting ensemble average and complex conjugate, respectively. The functions  $\tilde{\psi}_S(\mathbf{r}'_\pm)$  are the eigen-functions of the individual Helmholtz equations for the spatial coordinates  $\mathbf{r}'_\pm$ . They can be expressed as  $\tilde{\psi}_S(\mathbf{r}'_\pm) = \sqrt{S_S(\mathbf{r}'_\pm)} \psi_S(\mathbf{r}'_\pm)$ , where  $\psi_S(\mathbf{r}'_\pm)$  represents the geometric feature of the eigen-functions provided  $\langle |\psi_S(\mathbf{r}'_\pm)|^2 \rangle = 1$ . So,  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = \sqrt{S_S(\mathbf{r}'_+)} \sqrt{S_S(\mathbf{r}'_-)} \langle \psi_S(\mathbf{r}'_+) \psi_S^*(\mathbf{r}'_-) \rangle$  stands and therefore,  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = S_S(\mathbf{r}'_+) S_S(\mathbf{r}'_-)$  as expected. On the other hand,  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$  should fulfil the Schwarz inequality  $|W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)| \leq S_S(\mathbf{r}'_+) S_S(\mathbf{r}'_-)$  (Mandel & Wolf, 1995), which can be expressed as equation by introducing the appropriate dimensionless coefficient  $0 \leq |\mu_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)| \leq 1$  on the right. Consequently, the two-point correlation takes the mathematical form

$$W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = \mu_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) \sqrt{S_S(\mathbf{r}'_+)} \sqrt{S_S(\mathbf{r}'_-)}, \quad (4)$$

provided  $\mu_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = |\mu_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)| \exp[i\alpha_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)]$  with  $\alpha_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = \arg[W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)]$ . From Eq. (4) follows  $\mu_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = \langle \psi_S(\mathbf{r}'_+) \psi_S^*(\mathbf{r}'_-) \rangle$ , which is called the complex degree of correlation (Castañeda, 2017 b) (Castañeda & Matteucci, 2017) at S-plane. Its meaning can be established consistently from Eq. (4) that represents the spatial correlation of the emission of waves or particles by the source. The energy attributes of the emitted waves and particles are completely denoted by the factor  $\sqrt{S_S(\mathbf{r}'_+)} \sqrt{S_S(\mathbf{r}'_-)}$ , while the complex degree of correlation involves only the geometric component of the eigen-functions. So,  $\mu_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$  denotes the spatial correlation between pairs of emitting points at the S plane as the geometrical (or energy independent) feature of  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$ . It is worth remarking the theoretical consistency of this interpretation, because it gives new insight to the meaning established in partially coherent optics as the measurement of the spatial correlation of the emitted waves (Mandel & Wolf, 1995).

The complex degree of correlation exhibits the following mathematical properties: (i)  $\mu_S(\mathbf{r}'_A, \mathbf{r}'_A) = 1$  and  $\alpha_S(\mathbf{r}'_A, \mathbf{r}'_A) = 0$ , (ii)  $\mu_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = \mu_S^*(\mathbf{r}'_-, \mathbf{r}'_+)$  and (iii) its support around a given point  $\mathbf{r}'_A$  is just the structured support of correlation centered at such position.

Now, let us analyze the pure geometrical (or energy independent) feature of the preparation SM-stage. It becomes apparent by setting  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = 1$  with  $\mu_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = 1$  in Eq. (4), for any pair of points in the emission area of the source at the S plane. Thus, the energy units become irrelevant, and Eqs. (1a) and (2a) take the forms

$$W_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_+, \xi_-) = \int_S d^2r'_D \Phi_{SM}(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-; \xi_+, \xi_-; k, z'), \quad (5a)$$

and

$$W_M(\xi_+, \xi_-) = \iint_{S_S} d^2 r'_A d^2 r'_D \Phi_{SM}(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-; \xi_+, \xi_-; k, z'). \quad (5b)$$

Equations (5) realize the *source-turned-off* state of the setup. The *source-turned-on* state is established by setting Eq. (4) with the energy distribution and the spatial correlation properties of the physical source attached at the S plane. Equations (5) lead to a very important and novel interpretation of the source-turned-off state:

(i) The complete set of geometric modes are established with the same relative weight in the SM-stage volume by the stage configuration.

(ii) The arguments of  $\mathbf{W}_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_+, \xi_-)$  relate each point  $\mathbf{r}'_A$  on the emission area of the S plane with any structured support on the M plane, specified by  $(\xi_+, \xi_-)$ . So,  $\mathbf{W}_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_+, \xi_-)$  can be geometrically interpreted as cones in the SM-stage, with vertices at each emission point on the S plane and with the structured supports at the M plane as bases. Their specific geometry is determined by the modal expansion (5a) and spatially modulates the SM-stage.

(iii) Equation (5a) points out that the cone value at its vertex  $\mathbf{r}'_A$  is determined by the contributions of all the pairs of points contained in the structured support centered at the cone vertex, symmetrically distributed around this vertex with separation vectors  $\mathbf{r}'_D$ . Each pair contributes with a specific mode, given by Eq. (3a), to the modal expansion of the cone.

(iv) The modal expansion (5b) overlaps the cones  $\mathbf{W}_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_+, \xi_-)$  with vertices on all the emission points at the S plane and bases on the same structured support at the M plane, thus determining the prepared two-point correlation over this structured support. It means that each cone  $\mathbf{W}_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_+, \xi_-)$  describes the spatial or geometrical contribution of the structured support centered at a given point of the S plane to the preparation of the two-point correlation over any structured support on the M plane. For this reason,  $\mathbf{W}_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_+, \xi_-)$  is called the correlation cone, Figure 1 (Castañeda, 2017 b) (Castañeda & Matteucci, 2017).

So, Eq. (4) and the analysis above specify the role of the physical source of waves and particles in the source-turned-on state. The energy distribution and the two-point correlation properties of the source cannot create more or different modes in the SM-stage. These source attributes can only select a subset of modes and change their relative weights, so that  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-)$  plays the role of a modal filter.

High correlated and uniform sources select the complete set of modes with the same relative weight. In this case, the correlation cones provide the more elaborated geometric modulation of the SM-stage volume. The subset of modes selected by low correlated and/or non-uniform sources and their different relative weights simplify the geometric modulation of the stage. The simplest one is used by a single point source placed at any position  $\mathbf{r}'_A = \mathbf{r}'_0$ , so that  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = S_S(\mathbf{r}'_0) \delta(\mathbf{r}'_+ - \mathbf{r}'_0) \delta(\mathbf{r}'_-)$  and the correlation cones are given by

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_+, \xi_-) &= \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 S_S(\mathbf{r}'_0) |t_S(\mathbf{r}'_A)|^2 \delta(\mathbf{r}'_A - \mathbf{r}'_0) \\ &\times \left( \frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A + \xi_D/2|}{|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A + \xi_D/2|^2} \right) \left( \frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A - \xi_D/2|}{|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A - \xi_D/2|^2} \right) \quad (6a) \\ &\times \exp(ik|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A + \xi_D/2| - ik|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A - \xi_D/2|) \end{aligned}$$

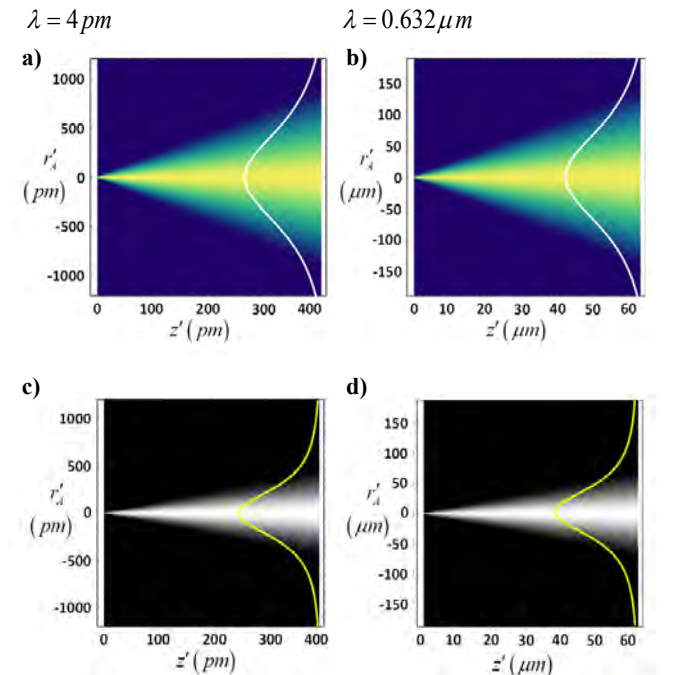
Therefore, the prepared two-point correlation over any structured support at the M-plane becomes

$$\begin{aligned} W_M(\xi_+, \xi_-) &= \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 S_S(\mathbf{r}'_0) |t_S(\mathbf{r}'_0)|^2 \\ &\times \left( \frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_0 + \xi_D/2|}{|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_0 + \xi_D/2|^2} \right) \left( \frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_0 - \xi_D/2|}{|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_0 - \xi_D/2|^2} \right) \quad (6b) \\ &\times \exp(ik|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_0 + \xi_D/2| - ik|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_0 - \xi_D/2|) \end{aligned}$$

Figure 2 illustrates the magnitudes of the correlation cone with vertex on  $\mathbf{r}'_0 = 0$  and basis centered at  $\xi_A = 0$  for (a) quantum particles and (b) classical waves.

Non-correlated extended sources are of special interest because they represent most the thermal emission sources of light or matter particles. They are described by  $W_S(\mathbf{r}'_+, \mathbf{r}'_-) = S_S(\mathbf{r}'_A) \delta(\mathbf{r}'_B)$  for the points in the emission area of the source, so that

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_+, \xi_-) &= \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 S_S(\mathbf{r}'_A) |t_S(\mathbf{r}'_A)|^2 \\ &\times \left( \frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A + \xi_D/2|}{|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A + \xi_D/2|^2} \right) \left( \frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A - \xi_D/2|}{|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A - \xi_D/2|^2} \right) \quad (7a) \\ &\times \exp(ik|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A + \xi_D/2| - ik|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A - \xi_D/2|) \end{aligned}$$



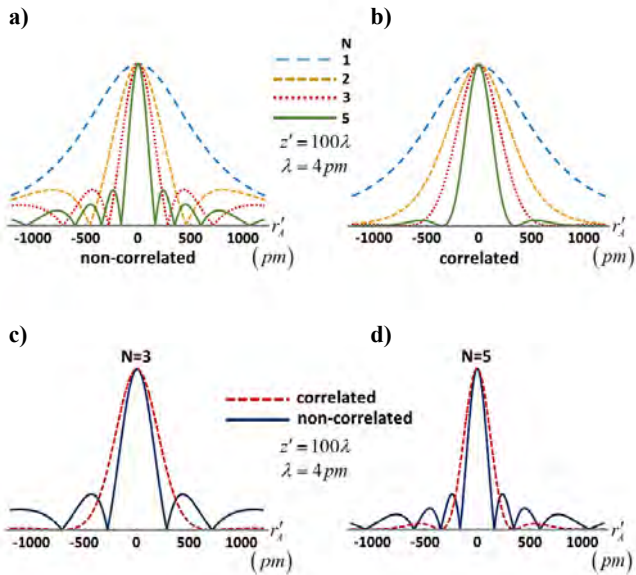
**Figure 2.** (a)-(b) Magnitudes of the correlation cones and (c)-(d) energy cones associated to a single point source at the S-plane in the SM-stage for (a), (c) individual quantum particles and (b), (d) classical waves. Vertical profiles in (a)-(b) describe the Lorentzian cross-section of the structured support centered on the optical axis at  $z = 100\lambda$ , while in (c)-(d) describe the Lorentzian cross-section of the illuminated area at  $z = 100\lambda$ .

describes the correlation cones with vertices at each emission point of the source, and

$$W_M(\xi_+, \xi_-) = \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 \int_S d^2r_A S_S(\mathbf{r}'_A) |t_S(\mathbf{r}'_A)|^2 \times \left(\frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A + \xi_D/2|}{|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A + \xi_D/2|^2}\right) \left(\frac{z' + |\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A - \xi_D/2|}{|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A - \xi_D/2|^2}\right) \times \exp\left(ik|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A + \xi_D/2| - ik|\mathbf{z}' + \xi_A - \mathbf{r}'_A - \xi_D/2|\right) \quad (7b)$$

describes the prepared two-point correlation over any structured support at the M plane. The paraxial approach of Eq. (7b) in partially coherent optics is called the Van Cittert – Zernike theorem (Born&Wolf, 1993). Accordingly, the source-turned-on state reveals that (i) a set of correlation cones are selected and weighted at the input plane, (ii) their overlapping modulates geometrically the space in the SM-stage, thus producing the increase of the two-point correlation at the output plane.

An important feature of the prepared two-point correlation is that the effective size of the structured supports of correlation at the M plane is finite, and the biggest is the Lorentzian shaped support provided by the correlation cone associated to a single point source at the S-plane. The increase of the source size reduces the sizes of the structured supports, as shown in Figure 3 (a)-(b). This reduction is greater by non-correlated sources than by correlated sources in some extent, as illustrated in (c)-(d).



**Figure 3.** Comparison of the shapes and sizes of the structured supports of correlation centered at  $\xi_A = 0$  on the M plane.  $N$  is the number of emitting points of the corresponding linear source. The spacing of the set of points is  $a = \lambda/2$ , so that the arrays are under diffraction condition (Castañeda, 2017 a). The central maxima determine the effective area of the structured supports. (a) and (b) show that the size of the structured support diminishes as the number of points (i.e. the source size) increases. In (c) and (d), the decreasing of the structured support related to a given set of points is due to a reduction of the two-point correlation at the S-plane.

Now, let us analyze the pure geometrical (or energy independent) feature in the MD-stage for the energy measurement at the D-plane. Let us begin by regarding the source-turned-off state, in which the prepared two-point correlation in Eq. (5b) is the input to the modal expansion (2b). It means that the geometric modulation of space in the SM-stage induces the geometric modulation of the space in the MD-stage.

This causal connection between the geometric modulations of space in the two stages realizes the P&M scheme for interference and diffraction, with the following features:

(i) The modal expansion (2b) shows that the prepared two-point correlation described by Eq.(5b) is a modal filter that selects and weights a subset of the modes in the MD-stage, given by Eq. (3b).

(ii) The arguments of  $\mathbf{W}_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  relates each point  $\xi_A$  at the M plane to all points  $\mathbf{r}_A$  at the D plane. So,  $\mathbf{W}_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  can be geometrically interpreted as cones in the MD-stage, with vertices at each point on the M plane and with the detection area at the D plane as bases. The specific geometry of the cones is determined by the modal expansion (2b) and specify the spatial modulation of the MD-stage.

(iii) Equation (2b) points out that the cone value at its vertex  $\xi_A$  is determined by the contributions of all the pair of points contained in the structured support centered at the cone vertex, symmetrically distributed around this vertex with separation vectors  $\xi_D$ . Each pair contributes with a specific mode, given by Eq. (3b) to the modal expansion of the cone.

(iv) Equation (1b) overlaps all the cones  $\mathbf{W}_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  in the MD-stage, thus determining the spatial distribution of the energy to be measured, once the setup state changes to source-turned-on. It means that each cone  $\mathbf{W}_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  describes the contribution of the structured support centered at a given point of the M plane to the energy distribution to be measured at the D plane. For this reason,  $\mathbf{W}_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  is called the energy cone, Figure 1 (Castañeda, 2017 b) (Castañeda&Matteucci, 2017).

By using the Schwarz inequality as before, by the source-turned-on state, the prepared two-point correlation can be expressed as

$$W_M(\xi_+, \xi_-) = \mu_M(\xi_+, \xi_-) \sqrt{S_M(\xi_+)} \sqrt{S_M(\xi_-)}, \quad (8)$$

where  $S_M(\xi_{\pm})$  represents the energy distribution of the waves or particles arriving to the M plane, and  $\mu_M(\xi_+, \xi_-) = |\mu_M(\xi_+, \xi_-)| \exp[i\alpha_M(\xi_+, \xi_-)]$  denotes the complex degree of correlation at this plane, with  $0 \leq |\mu_M(\xi_+, \xi_-)| \leq 1$ ,  $\alpha_M(\xi_+, \xi_-) = \arg[W_M(\xi_+, \xi_-)]$  and similar mathematical properties to those of the complex degree of correlation at the S plane. Therefore, the prepared two-point correlation filters the modes of the expansion (2b) with basis on the energy distribution and/or the degree of correlation at the M plane. Figure 2 illustrates the Lorentzian shaped energy cones provided in the SM-stage by a point source placed on the optical axis at the S plane for (c) quantum particles and (d) classical

waves. The vertical profiles describe the spatial distribution of the energy of the particles and waves arriving to the plane placed at  $z' = 100\lambda$  from the S plane.

The source-turned-off state is realized in the MD-stage by setting  $S_M(\xi_{\pm})=1$ , in such a way that  $W_M(\xi_+, \xi_-) = \mu_M(\xi_+, \xi_-)$  holds and is determined by Eq. (5b). By replacing it in Eq. (2b), the geometry of the energy cones in the MD-setup is revealed, i.e.

$$\mathbf{W}_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A) = \int_M d^2\xi_D \mu_M(\xi_+, \xi_-) \Phi_{MD}(\xi_+, \xi_-; \mathbf{r}_A; k, z), \quad (9)$$

For interpretation purposes, it is very useful to separate the component of the cone provided by the pairs of points ( $\xi_D \neq 0$ ) enclosed in the structured support that determine the integration domain of Eq. (9), and the component provided by the center of the structured support ( $\xi_D = 0$ ), i.e. the contribution associated to the single point in the support. It is performed by introducing the dimensionless function  $1 \equiv \delta(\xi_D) + [1 - \delta(\xi_D)]$ , with  $\delta(\xi_D)$  the Dirac's delta, in the integral of Eq. (9) so that

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A) &= \mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) + \mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) \\ &= \Phi_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A; k, z) + \int_M d^2\xi_D \mu_M(\xi_+, \xi_-) \Phi_{MD}(\xi_+, \xi_-; \mathbf{r}_A; k, z) \quad (10) \end{aligned}$$

It follows

$$\mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) = \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 |t_M(\xi_A)|^2 \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|^2}\right)^2 \quad (11a)$$

as the cone component provided by the single point at the support center. It is a real valued and positive definite function that describes a Lorentzian shaped cone. In addition,

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) &= 2 \int_M d^2\xi_D |\mu_M(\xi_+, \xi_-)| \\ &\times \text{Re} \left\{ \Phi_{MD}(\xi_+, \xi_-; \mathbf{r}_A; k, z) \exp[i\alpha_M(\xi_+, \xi_-)] \right\} \end{aligned}$$

with Re denoting the real part, by regarding  $\Phi_{MD}(\xi_+, \xi_-; \mathbf{r}_A; k, z) = \Phi_{MD}^*(\xi_-, \xi_+; \mathbf{r}_A; k, z)$ . It leads to

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) &= 2 \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 \int_M d^2\xi_D |\mu_M(\xi_+, \xi_-)| |t_M(\xi_+)| |t_M(\xi_-)| \\ &\times \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A - \xi_D/2|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A - \xi_D/2|^2}\right) \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A + \xi_D/2|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A + \xi_D/2|^2}\right) \\ &\times \cos(k|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A - \xi_D/2| - k|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A + \xi_D/2| + \alpha_M(\xi_+, \xi_-) + \Delta\phi_M(\xi_+, \xi_-)) \quad (11b) \end{aligned}$$

with  $\Delta\phi_M(\xi_+, \xi_-) = \phi_M(\xi_+) - \phi_M(\xi_-)$  the phase difference of the transmission function of the M plane at the pair of points  $\xi_{\pm}$ . It is a real valued function that takes on positive and negative values and describes a cone whose geometry has a spatially oscillating modulation with a Lorentzian envelope.

An important difference between the cones  $\mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  and  $\mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  is appreciable in Eqs. (11). The first one is defined by a single mode which is independent from the prepared degree of correlation at the M plane. It only depends on the MD-stage configuration and its geometry is the same for all the single points of the M plane with non-null absorbance. In contrast, the second one is determined by a modal expansion weighted by the prepared degree of

correlation, and therefore it depends on the two setup stages. As a consequence,  $\mathbf{W}_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A) = \mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  if the prepared degree of correlation nullifies.

Accordingly, only the cone  $\mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  is actually induced by the preparation SM-stage and its role in the cone overlapping established in Eq. (10) is to modulate the cones  $\mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$ , thus determining the complete geometry of the cone  $\mathbf{W}_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  that characterizes the space modulation of the MD-stage. For this reason, the cone  $\mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  is called the modulating cone (Castañeda, 2017 b) (Castañeda & Matteucci, 2017).

The change of state to source-turned-on is realized by setting the prepared energy distribution at the M plane,  $S_M(\xi_A) = \int d^2r'_A \mathbf{W}_{SM}(\mathbf{r}'_A; \xi_A)$ , in Eq. (8). According to Eqs. (11), this energy distributes on the cones in the volume of the MD-stage as follows:

$$\mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) = \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 S_M(\xi_A) |t_M(\xi_A)|^2 \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A|^2}\right)^2 \quad (12a)$$

and

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) &= 2 \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 \int_M d^2\xi_D |\mu_M(\xi_+, \xi_-)| \sqrt{S_M(\xi_+)} |t_M(\xi_+)| \\ &\times \sqrt{S_M(\xi_-)} |t_M(\xi_-)| \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A - \xi_D/2|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A - \xi_D/2|^2}\right) \left(\frac{z + |\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A + \xi_D/2|}{|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A + \xi_D/2|^2}\right) \\ &\times \cos(k|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A - \xi_D/2| - k|\mathbf{z} + \mathbf{r}_A - \xi_A + \xi_D/2| + \alpha_M(\xi_+, \xi_-) + \Delta\phi_M(\xi_+, \xi_-)) \quad (12b) \end{aligned}$$

respectively. Thus, the spatial distribution of the energy measured at the D plane can be expressed as  $S_D(\mathbf{r}_A) = S_D^{(R)}(\mathbf{r}_A) + S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A)$ , with

$$S_D^{(R)}(\mathbf{r}_A) = \int_M d^2\xi_A \mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) = \int_M d^2\xi_A S_M(\xi_A) \Phi_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A; k, z) \quad (13a)$$

and

$$\begin{aligned} S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A) &= \int_A d^2\xi_A \mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) \\ &= \int_M d^2\xi_D \mu_M(\xi_+, \xi_-) \sqrt{S_M(\xi_+)} \sqrt{S_M(\xi_-)} \Phi_{MD}(\xi_+, \xi_-; \mathbf{r}_A; k, z) \quad (13b) \end{aligned}$$

the individual contributions of the cone components in Eqs. (12), obtained from Eqs. (1b) and (10). Both energy terms are real valued but  $S_D^{(R)}(\mathbf{r}_A) \geq 0$  and it is independent from the prepared two-point correlation at the M plane, while  $S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A)$  takes on positive and negative values and depends closely on the prepared two-point correlation. In fact,  $S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A) = 0$  and therefore  $S_D(\mathbf{r}_A) = S_D^{(R)}(\mathbf{r}_A)$  if the prepared degree of correlation nullifies. In addition, the energy distribution in the MD-stage should be conservative. Specifically,

$$\int_D d^2r_A S_D(\mathbf{r}_A) = \int_M d^2\xi_A S_M(\xi_A),$$

with

$$\begin{aligned} \int_D d^2r_A S_D(\mathbf{r}_A) &= \int \int d^2r_A d^2\xi_A \mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) + \int \int d^2r_A d^2\xi_A \mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) \\ &= \int_M d^2\xi_A S_M(\xi_A) \int_D d^2r_A \Phi_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A; k, z) + \int \int d^2r_A d^2\xi_A \mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) \end{aligned}$$

Then, it follows

$$\int_D d^2r_A \Phi_{MD}(\xi_A; \mathbf{r}_A; k, z) = 1,$$

and

$$\int_D \int_M d^2r_A d^2\xi_A \mathbf{W}_{GH}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A) = \int_D d^2r_A S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A) = 0,$$

which implies,

$$\int_D d^2r_A \Phi_{MD}(\xi_+, \xi_-; \mathbf{r}_A; k, z) = 0.$$

The above analysis lead to the following conclusions:

(i) The coefficient  $S_M(\xi_A) |t_M(\xi_A)|^2$  in Eq. (12a) represents the energy of the wave disturbance or the particle that crosses the M plane at the vertex of the cone  $\mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$ . This energy is a physical observable and distributes over such cone, thus being recorded by the detector still if there are no modulating cones. For this reason,  $\mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  is called the real cone. It is therefore theoretically reasonable to postulate the presence of a point emitter at the real cone vertex that emits the energy  $S_M(\xi_A) |t_M(\xi_A)|^2$  when the wave disturbance or the particle crosses such point. Such emitter is called the real point emitter (Castañeda, 2017 b) (Castañeda&Matteucci, 2017), and its contribution  $S_D^{(R)}(\mathbf{r}_A) \geq 0$  at the D plane is the emitted energy component of the measured energy.

The energy  $S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A)$  is not a physical observable but has the important role to modulate spatially the emitted energy  $S_D^{(R)}(\mathbf{r}_A)$  thus producing the measured energy distribution  $S_D(\mathbf{r}_A) \geq 0$ . It means that  $S_D^{(R)}(\mathbf{r}_A) \geq |S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A)|$  if  $S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A) < 0$ .

It is worth noting that the modulating energy  $S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A)$  is essentially provided by the experimental setup. Indeed, it depends on the prepared degree of correlation at the M plane and its modes are determined by the MD-stage configuration. In addition, the coefficient  $\sqrt{S_M(\xi_+)} \sqrt{S_M(\xi_-)}$  in Eq. (13b) is introduced by the mathematical condition named Schwarz inequality and only assures the achievement of the requirement  $S_D(\mathbf{r}_A) \geq 0$ . Indeed, if the experiment preparation provides high correlation and a uniform energy distribution at the M plane, then  $\mu_M(\xi_+, \xi_-) \sqrt{S_M(\xi_+)} \sqrt{S_M(\xi_-)} = S_0$ . Only under this condition  $S_D^{(min)}(\mathbf{r}_A) = 0$  holds at some points  $\mathbf{r}_A$  on the D plane, in accordance with the experimental observation of destructive interference. Therefore, the coefficient  $\sqrt{S_M(\xi_+)} \sqrt{S_M(\xi_-)}$  assures the achievement of  $S_D^{(R)}(\mathbf{r}_A) = -S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A)$  at those points under such condition.

The conclusions above lead to the following novel interpretation for the expression

$$S_D(\mathbf{r}_A) = S_D^{(R)}(\mathbf{r}_A) + S_D^{(V)}(\mathbf{r}_A). \tag{14}$$

It means that the measured energy distribution results from the spatial modulation of the emitted energy by the energy contributed by the experimental setup. Therefore, the modulating energy plays the role of the potential energy in the dynamical energy equation that specifies the total energy  $S_D(\mathbf{r}_A)$  of the classical wave disturbance or quantum particle that arrives to each point of the detector, in the source-turned-on sate of the setup.

In other words, Eq. (14) represents the global interaction of the emitted waves or particles with the setup, and points out that the spatial distribution of the measured energy, named interference or diffraction pattern, is a direct result of such interaction.

Consequently, in the source-turned-on state the modulating cone  $\mathbf{W}_{MD}^{(V)}(\xi_A; \mathbf{r}_A)$  plays the role of a potential, whose name of *geometric potential* is clearly justified by the analysis above. It is theoretically reasonable to postulate the presence of a point emitter at the modulating cone vertex that emits the correlation energies  $|\mathcal{W}_M(\xi_+, \xi_-)| |t_M(\xi_+)| |t_M(\xi_-)|$  which distributes over the modes of the expansion (12b), thus configuring the geometric potential in the volume of the MD-stage. This emitter is called the virtual point emitter, because of the mathematical properties of the geometric potential discussed above.

Now, a unique physical description of interference and diffraction can be formulated for classical waves and quantum particles, by regarding two accessible states for the two-stage experimental setup in the P&M scheme. Basically, it regards that the setup configuration establishes a geometric modulation in the space with the physical ability to affect the movement of waves and particles in the setup, thus producing the interference and diffraction patterns.

More specifically, once the setup is configured in the source-turned-off state, the correlation cones spatially modulate the preparation stage thus determining the prepared complex degree of correlation on the mask plane. In addition, real cones are established in the measurement stage from the mask points at which wave disturbances or particles can cross the mask after the state change of the setup. The prepared degree of correlation induces modulating cones in the measurement stage that overlap the real cones modulating them geometrically. When the setup state changes to source-turned-on, local events of emission, mask-crossing and detection of wave disturbances or particles take place in the device. It is irrelevant that several of such events occur simultaneously as in case of classical waves, or sequentially as in case of individual quantum particles, because the description of the pattern formation at the detector plane is independent of this feature.

After an emission event, the emitted wave or particle arrives to a point in the prepared structured support of correlation of the cone with vertex on the emission point. Wave and particle arrivals are characterized by local energy amounts at the arrival point on the M plane. After crossing the mask at this point, the wave or the particle should move through the geometric potential induced in the measurement stage by the prepared two-point correlation. Consequently, its energy spatially changes, thus indicating that the wave disturbance or the particle is driven along preferential directions by the geometric potential up to its detection.

This physical and geometrical description is quite different to the standard one, because it does not base on the wave superposition and not requires the wave-particle duality, the self-interference or the wave collapse hypotheses.

### The new principle

The above description of interference and diffraction can be synthetized in a physical principle with the corresponding

law. To this aim, let us consider the simplest basic interference experiment, i.e. the double pinhole experiment with classical waves or quantum particles, named the Young's experiment, Figure 4. It is sufficient to analyze the measurement MD-stage in order to synthesize the new principle and law by assuming a given two-point correlation  $W_M(\xi_+, \xi_-)$ , prepared at the M plane. The transmission function of the double pinhole mask fulfils the formula

$$t_M(\xi_+)t_M^*(\xi_-) = [\delta(\xi_A + b/2) + \delta(\xi_A - b/2)]\delta(\xi_D) + [\delta(\xi_D + b) + \delta(\xi_D - b)]\delta(\xi_A) \quad (15)$$

with  $b$  the pinhole separation. The first line of Eq. (15) refers to the individual pinholes, characterized by the factor  $\delta(\xi_D)$ , while the second line refers to the correlated pair and include the two degrees of freedom in orientation of the separation vector. The cone  $W_{MD}(\xi_A; x_A)$  that describes the geometric modulation of the space can be expressed as

$$W_{MD}(\xi_A; x_A) = W_{MD}^{(R)}(\xi_A + b/2; x_A) + W_{MD}^{(R)}(\xi_A - b/2; x_A) + W_{MD}^{(V)}(0; x_A) \quad (16a)$$

It results from the overlapping of two real cones with vertices at the pinholes and one modulating cone with vertex at the midpoint between the pinholes, in the opaque segment of the mask.

In the source-turned-off state of the setup, the real cones take the Lorentzian shaped form

$$W_{MD}^{(R)}(\xi_A \pm b/2; x_A) = \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 \frac{z + \sqrt{z^2 + (x_A - \xi_A)^2}}{z^2 + (x_A - \xi_A)^2} \delta(\xi_A \pm b/2) \quad (16b)$$

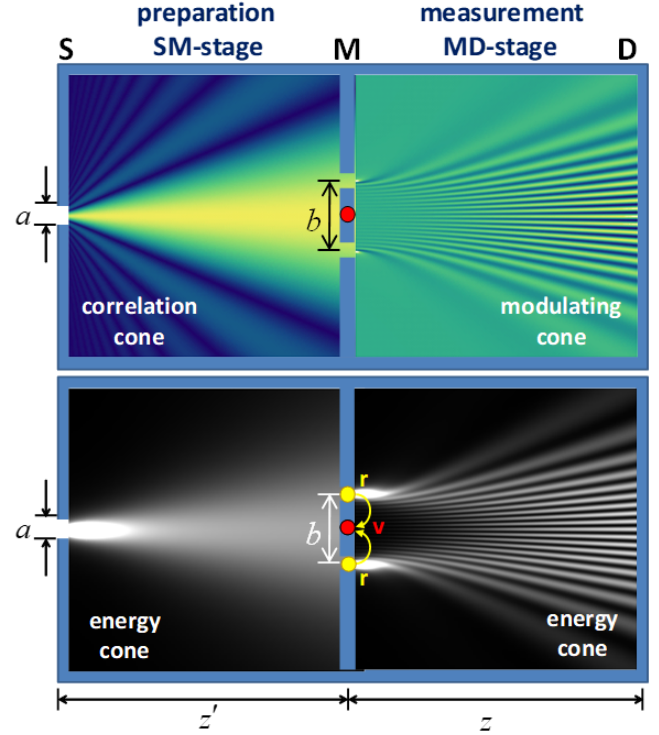
and the modulating cone has the cosine cross-section with Lorentzian envelope (Figure 4) given by

$$W_{MD}^{(V)}(0; x_A) = 2\left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 \delta(\xi_A) |\mu_M(b)| \times \left(\frac{z + \sqrt{z^2 + (x_A - \xi_A - b/2)^2}}{z^2 + (x_A - \xi_A - b/2)^2}\right) \left(\frac{z + \sqrt{z^2 + (x_A - \xi_A + b/2)^2}}{z^2 + (x_A - \xi_A + b/2)^2}\right) \times \cos\left(k \sqrt{z^2 + (x_A - \xi_A - b/2)^2} - i k \sqrt{z^2 + (x_A - \xi_A + b/2)^2}\right) \quad (16c)$$

It is apparent in Eq. (16c) that the non-null spatial correlation of the two pinholes ( $|\mu_M(b)| > 0$ ) is the requirement for the existence of the modulating cone, i.e. both pinholes must be included in the prepared structured support of correlation centered at the midpoint between them. This condition implies that the pinhole separation must be shorter than the size of the prepared structured support. Otherwise, the modulating cone disappears and the MD-stage contains only the real cones.

Once the setup state changes to source-turned-on, the factors  $S_M(\pm b/2)$  and  $\sqrt{S_M(b/2)}\sqrt{S_M(-b/2)}$  appear respectively in the real cone, Eq. (16b) and Figure 5 (a)-(b), and in the modulating cone, Eq. (16c), thus giving the geometric potential defined as

$$(1/2)\sqrt{S_M(b/2)}\sqrt{S_M(-b/2)}W_{MD}^{(V)}(0; x_A)$$

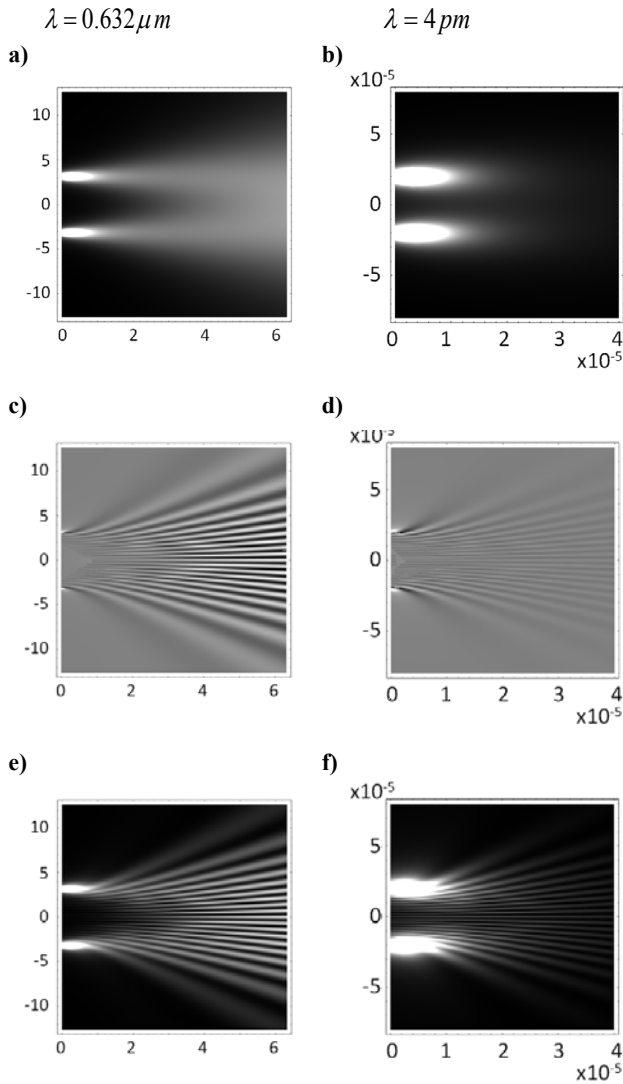


**Figure 4.** Conceptual sketch of the Young interference experiment, according to the P&M scheme.  $r$  and  $v$  label the real and the virtual point emitters. Upper graph: the source-turned-off state (the real cones in the MD-stage are not shown). Bottom graph: the source-turned-on state.

and illustrated in Figure 5 (c)-(d). Consequently,  $W_{MD}(\xi_A; x_A)$  in Eq. (16a) becomes the energy cone illustrated in Figure 5 (e)-(f).

The coefficient  $\sqrt{S_M(b/2)}\sqrt{S_M(-b/2)}$  establishes that both pinholes must remain open during the movement of the wave and the particles from the source to the detector ( $S_M(\pm b/2) > 0$ ). It is a necessary but not sufficient requirement for the existence of the geometric potential, still in experiments with individual particles that cross only one of the pinholes at a time. If any of the pinholes is blocked, then the coefficient  $\sqrt{S_M(b/2)}\sqrt{S_M(-b/2)}$  nullifies and the geometric potential disappears. Summarizing, the necessary and sufficient condition to establish the geometric potential in the MD-stage is that the two pinholes must be open and spatially correlated. It is realized by the definition of the two-point correlation in Eq. (8).

The necessary and sufficient condition for the geometric potential has an important physical implication. When both pinholes are open but non-correlated, so that  $\mu_M(\xi_+, \xi_-) = 0$  for  $\xi_D = b$ , then the energy cone in the stage results from the overlapping of the two real cones associated to the pinholes, without the modulation of the geometric potential, Figure 5 (a)-(b). It confirms that the geometric potential cannot be obtained by overlapping real cones. It can only be established by the setup configuration. Therefore, the



**Figure 5.** Measurement MD-stage of the Young interference experiments with classical waves on the left column and with individual quantum particles on the right column. (a)-(b) Real cones, (c)-(d) geometric potential, and (e) and (f) modulated energy cones. the vertical and the horizontal axes are  $-20\lambda \leq x_A \leq 20\lambda$  and  $0 \leq z \leq 10\lambda$  respectively. The pinhole separation is  $10\lambda$ .

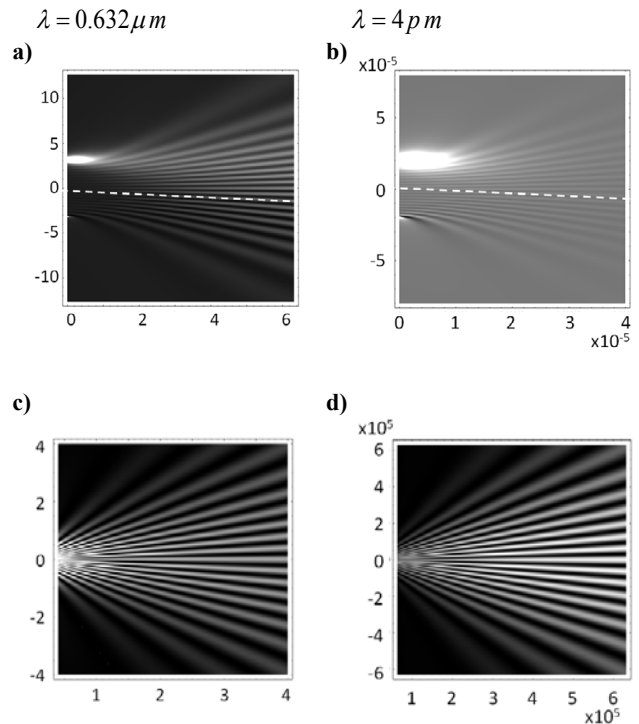
interference modulation of the energy distribution in the MD-stage should be obtained by overlapping each real cone individually with the geometric potential, as shown in Figure 6.

The analysis above indicates that the meaning of spatial coherence should be extended. In the standard formulation, it is described as an exclusive attribute of the physical objects (waves or particles). The new model relates two features to it: (i) the ability of the setup configuration to determine the set of geometric modes for the correlation cones, and (ii) the filtering ability of the source of waves and particles to select and to weight the subset of geometric modes that effectively conforms the correlation cones. It has been shown before that the preparation of the two-point

correlation at the M-plane is the choice of a geometrical modulation, performed by the source correlation, among all the possible ones that can be provided by the setup. It means that the direct role of the source spatial coherence is restricted to the preparation stage.

The physical description in the last paragraph of the section before is confirmed by Figure 6 (a)-(b), i.e. the wave disturbance and the crossing particles by the pinhole at  $\xi_A = 5\lambda$  find, in the volume of the MD-stage, the geometric potential provided by the virtual point emitter at  $\xi_A = 0$ . Consequently, they must move through the spatial modulation established by such geometric potential. The upper region of the graphs with respect to the dotted lines illustrates the energy cones after a great enough number of crossing events. This is the region occupied by the corresponding non-modulated real cone in Figure 5 (a)-(b). The modulation of the bottom region is due to the geometric potential only.

At a far enough distance from the mask, the individual real cones fill the whole volume of the stage. Therefore, the corresponding modulated energy cone fills the whole volume too, as shown in Figure 6 (c)-(d). Because the geometric



**Figure 6.** Energy cones in the measurement MD-stage associated to the individual interaction between the real point emitter in the pinhole at  $\xi_A = 5\lambda$  and the virtual point emitter at  $\xi_A = 0$ , in the Young interference depicted in Figure 5, with classical waves on the left column and with individual quantum particles on the right column. The vertical axes are  $-20\lambda \leq x_A \leq 20\lambda$  in (a)-(b) and  $-10^6\lambda \leq x_A \leq 10^6\lambda$  in (c)-(d), and the horizontal axes are  $0 \leq z \leq 10\lambda$  in (a)-(b) and  $10^5\lambda \leq z \leq 10^6\lambda$  in (c)-(d). Dotted lines in (a)-(b) delimit the region occupied by the non-modulated real cone associated to the real point emitter in Fig. 5 (a)-(b).

potential performs the same geometric modulation to the real cones associated to the both pinholes, the graphs (c)-(d) are the same for the energy coming for any of the pinholes. As a consequence, if the detection is realized in the far-field region, it is not possible to distinguish the energy distribution contributed by each of the pinholes. However, this indistinguishability is removed, still maintaining some spatial modulation, in the very near region to the M-plane as shown in the graphs (a)-(b). It also means that the interference modulation does not require the overlapping of the real cones.

Figures 5 and 6 evidence the meaning of the space scale metric and its relationship with the wave and particle wavelengths in the measurement MD-stage, i.e. similar shaped patterns essentially differing in scale, are obtained with classical waves that simultaneously illuminate the two pinholes and with individual quantum particles that crosses only one pinhole at a time.

This analysis clearly departs from the description based on the wave superposition, in which the (classical or quantum) wave contributions from the both pinholes constitute the necessary and sufficient cause of interference. The standard description precludes the occurrence of interference when only one of the two open pinholes contributes with wave disturbance or particle crossings. In case of interference with individual quantum particles, this requirement leads to the notion of self-interference of the particles in order to provide the required probability amplitudes at the both pinholes. Self-interference is also behind the interference with classical waves, because the disturbances at the two pinholes belongs to the same wave-front. In contrast the geometric interpretation does not require the self-interference notion, because in this framework interference is formed because of the spatial modulation of the real cones by the geometric potential, which forces the energy of the waves and the particles to be distributed on certain preferential regions of space.

The overlap of the individual modulated real cones gives the well-known interference patterns, recorded after a great enough number of detection events. Thus, the energy cone in the MD-stage can be expressed as

$$\mathbf{W}_{MD}(\xi_A; x_A) = \mathbf{W}_{MD}^{(+)}(\xi_A; x_A) + \mathbf{W}_{MD}^{(-)}(\xi_A; x_A), \quad (17a)$$

with

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{MD}^{(\pm)}(\xi_A; x_A) &= S_M(\pm b/2) \mathbf{W}_{MD}^{(R)}(\xi_A \pm b/2; x_A) \\ &+ (1/2) \sqrt{S_M(b/2)} \sqrt{S_M(-b/2)} \mathbf{W}_{MD}^{(V)}(0; x_A) \end{aligned} \quad (17b)$$

the individual modulated real cones by the geometric potential. From Eqs, (1b) and (17) it follows

$$S_D(x_A) = S_D^{(+)}(x_A) + S_D^{(-)}(x_A), \quad (18a)$$

as the energy distribution recorded by the detector at the M-plane, with

$$S_D^{(\pm)}(x_A) = S_D^{(\pm R)}(x_A) + (1/2) S_D^{(V)}(x_A) \quad (18b)$$

the energy distribution over the basis of each modulated energy cone. In addition,

$$S_D^{(\pm R)}(x_A) = \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 S_M(\pm b/2) \left(\frac{z + \sqrt{z^2 + (x_A \mp b/2)^2}}{z^2 + (x_A \mp b/2)^2}\right)^2 \quad (18c)$$

is the energy distribution across the basis of each individual real cone, provided by the wave disturbance or the crossing particles at the corresponding pinhole, while

$$\begin{aligned} (1/2) S_D^{(V)}(x_A) &= \left(\frac{k}{4\pi}\right)^2 |\mu_M(b)| \sqrt{S_M(b/2)} \sqrt{S_M(-b/2)} \\ &\times \left(\frac{z + \sqrt{z^2 + (x_A - b/2)^2}}{z^2 + (x_A - b/2)^2}\right) \left(\frac{z + \sqrt{z^2 + (x_A + b/2)^2}}{z^2 + (x_A + b/2)^2}\right) \\ &\times \cos\left(k\sqrt{z^2 + (x_A - b/2)^2} - ik\sqrt{z^2 + (x_A + b/2)^2}\right) \end{aligned} \quad (18d)$$

is the potential energy across the basis of the geometric potential cone provided by the stage configuration. This potential energy spatially modulates the energy provided by the individual real cones. It should be noted that:

(i)  $S_D^{(\pm)}(x_A) \geq 0$  and  $S_D^{(\pm R)}(x_A) \geq 0$  but  $(1/2) S_D^{(V)}(x_A)$  takes on positive and negative values. Therefore,  $S_D^{(\pm R)}(x_A) \geq (1/2) |S_D^{(V)}(x_A)|$  holds for  $(1/2) S_D^{(V)}(x_A) < 0$ .

(ii) The energy distribution provided by the real cones is independent from the prepared two-point correlation, while the potential energy does. In other words, the preparation of the two-point correlation in the SM-stage determines the potential energy distribution at the D-plane.

(iii) Because  $\int_D dx_A \Phi_{MD}(\pm b/2; x_A; k, z) = 1$ , and  $\int_D dx_A \Phi_{MD}(b; x_A; k, z) = 0$ , then  $\int_D dx_A S_D^{(\pm)}(x_A) = S_M(\pm b/2)$  it means that the distribution of the energy in each individual modulated real cone is conservative.

The analysis above leads to the following conclusions:

(i) Only three point emitters, two real and one virtual, are required to describe the energy measurement in the MD-stage of the double pinhole Young interference. These point emitters are placed at different positions on the M-plane, i.e. the real point emitters are in the pinholes and the virtual point emitter is at the opaque segment of the mask between de pinholes.

(ii) Equation (18b) can be interpreted as the energy at the D-plane due to the interaction, at the M-plane, between each real point emitter that characterizes the classical waves or the quantum particles, and the virtual point emitter that characterizes the experimental setup. These interactions are separate and their effects are additive as expressed in Eq. (18a).

(iii) Because the overlap of the real cones cannot produce interference modulation, the interaction between the real point emitters is forbidden. This feature is an additional departure of the geometric interpretation from the standard models based on the wave superposition.

The general statement that interference is the result of the separate interaction between individual real point emitters and the virtual point emitters constitute the principle of interference in the framework of the geometrical interpretation. It can be equivalently stated as follows:



interference results from the interaction between the emitted waves or particles with the geometric potential determined by the setup configuration.

Although the geometric modulation of space in both the SM- and the MD-stages, arranged in a P&M scheme, occurs in the source-turned-off state, interference is a physical phenomenon occurred in the source-turned-on state. Therefore, Eq. (18b) constitutes the general law of interference in this framework.

### From interference to diffraction

In the framework of the geometric interpretation, the interaction principle synthesized from the double pinhole interference is the general principle for interference and diffraction. In the following, grating interference and diffraction are discussed from this point of view.

It has been proved in classical optics that a P&M schemed setup with space scale metric  $\lambda$  and a regular array, with spacing  $b$  and length  $L$ , of real point emitters of waves attached at the M-plane produces interference if  $b > \lambda$  and diffraction if  $b < \lambda$  and  $L > \lambda$  (Castañeda, 2014, 2017 a). Now, the validity of this result is extended for interference and diffraction with quantum particles.

To this aim, let us assume, for simplicity and without loss of generality, a similarly configured setup with a pinhole grating at the M plane with a linear array of  $2M + 1$  pinholes ( $M$  a positive integer). In the source-turned-on state, the pinhole grating determines a corresponding array of real point emitters, and the setup configuration induces a set of  $0 \leq N \leq 4M - 1$  virtual point emitters distributed along the segment of pinholes, whose specific number and strength depend on the shape and size of the prepared degree of correlation. They are placed at the positions  $\xi_A = (m + n)b/2$  which are the midpoints between pairs of pinholes with separations  $\xi_D = (m - n)b$ , inscribed in the prepared structured supports centered at the  $\xi_A$  positions.

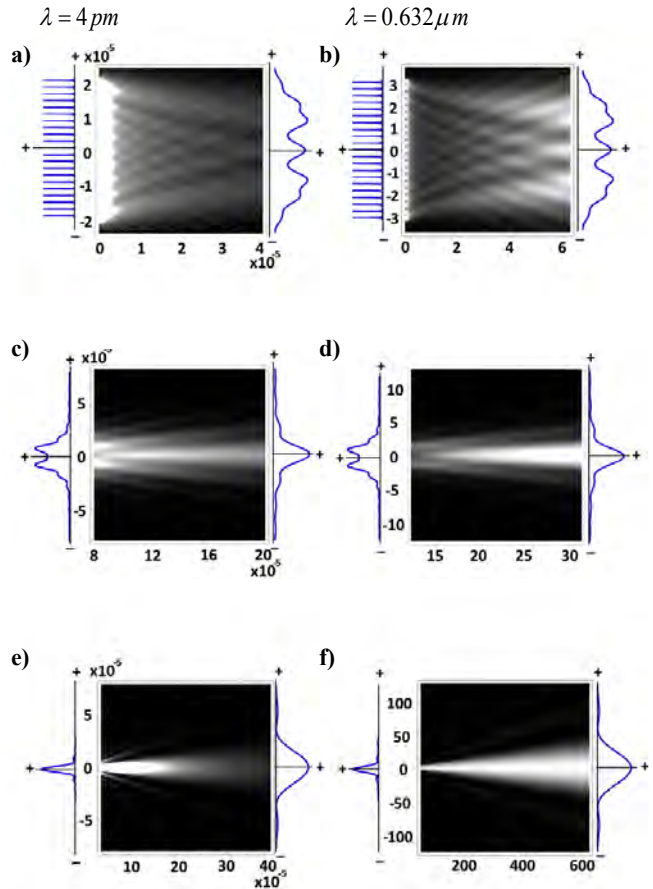
The set of real point emitters contributes the energy distribution

$$S_D^{(R)}(x_A) = \sum_{m=-M}^M S_M(mb) \Phi_{MD}(mb; x_A; k, z) \quad (19a)$$

at the D plane, while the potential energy distribution there due to the set of virtual point emitters is given by

$$S_D^{(V)}(x_A) = 2 \sum_{m=-M+1}^M \sum_{n=-M}^{m-1} |\mu_M(mb, nb)| \sqrt{S_M(mb)} \sqrt{S_M(nb)} \times \text{Re}[\Phi_{MD}(mb, nb; x_A, k, z) \exp[i\alpha_M(mb, nb)]] \quad (19b)$$

so that the energy distribution resulting from the interaction between the sets of real and virtual point emitters is given by  $S_D(x_A) = S_D^{(R)}(x_A) + S_D^{(V)}(x_A)$ . It is illustrated in Figure 7 for a great enough number of emission events of an array of 21 identical real point emitters ( $M = 10$ ), of length  $L = 10\lambda$  and spacing  $b = \lambda/2$ , under the prepared correlation degree  $\mu_M(mb, nb) = 1$  that produces the maximal number of virtual point emitters, i.e. 39. Accordingly, diffraction should occur in the measurement MD-stage when the setup is in the source-turned-on state.



**Figure 7.** Diffraction in the measurement MD-stage resulting from the interaction between 39 virtual point emitters associated to 21 high correlated pinholes and the corresponding individual real point emitters, for single quantum particles on the left column and for classical waves on the right column. Vertical axes are corresponding to  $x_A$  ( $\mu m$ ) and the horizontal axes to  $z$  ( $\mu m$ ) Energy profiles are shown at the corresponding vertical axes. Symbols + and - denote the positive and negative semi-axis. Images were enhanced on the left part (left column) and on the right part (right column) to appreciate details. Delta-like peaks were truncated for presentation purposes.

It is remarkable that, in spite of the discreteness of the set of real point emitters, non-paraxial slit diffraction patterns are formed from relative short distances to the far-field by both classical waves (Castañeda, 2014 a, b) (Castañeda, 2017 a) and individual quantum particles (Castañeda, et al., 2016 a, b) (Castañeda&Matteucci, 2017), in good accordance with reported experimental results in light optics (Born&Wolf, 1993) and electron optics (Matteucci, 1990) (Matteucci, et al., 2013). As expected, the graphs are similarly shaped but different in scale. So, the diffraction condition proved for classical waves is also fulfilled by individual quantum particles. It leads to the conclusion that, in the framework of the proposed geometric model, diffraction occurs in the source-turned-on state of the setups, provided that the discrete set of radiant point emitters fulfils the condition  $b < \lambda$

and  $L > \lambda$ , with  $\lambda$  the setup space scale metric,  $b$  the array spacing and  $L$  the array length, independently if waves or particles move in it.

It should be remarked that discreteness in this context is not a consequence of a sampling procedure for numerical calculations, but a physical condition for the experimental realization of diffraction. Indeed, it has been proved that any linear array of real point emitters with  $L < \lambda/10$  behaves like a single real point emitter independently from the number of point emitters, the prepared two-point correlation and the sampling procedure to perform the numerical predictions (Castañeda, 2017 a). It is due to the fact that the setup cannot provide a geometric potential capable to modulate the real cones of such array. This conclusion contrasts with the standard notion that only continuous (classical or quantum) wave-fronts can produce or predict the build-up of diffraction patterns. Continuous arrays of real point emitters seem to be redundant sets for diffraction.

In many cases, the attached mask at the M plane can gather points in separate sets, with separations longer than the space scale metric, but each one with  $b < \lambda$  and  $L > \lambda$ . These sets can be inscribed, partially or completely, in the prepared two-point correlation. So, in the source-turned-on state the setup provides a geometric potential with:

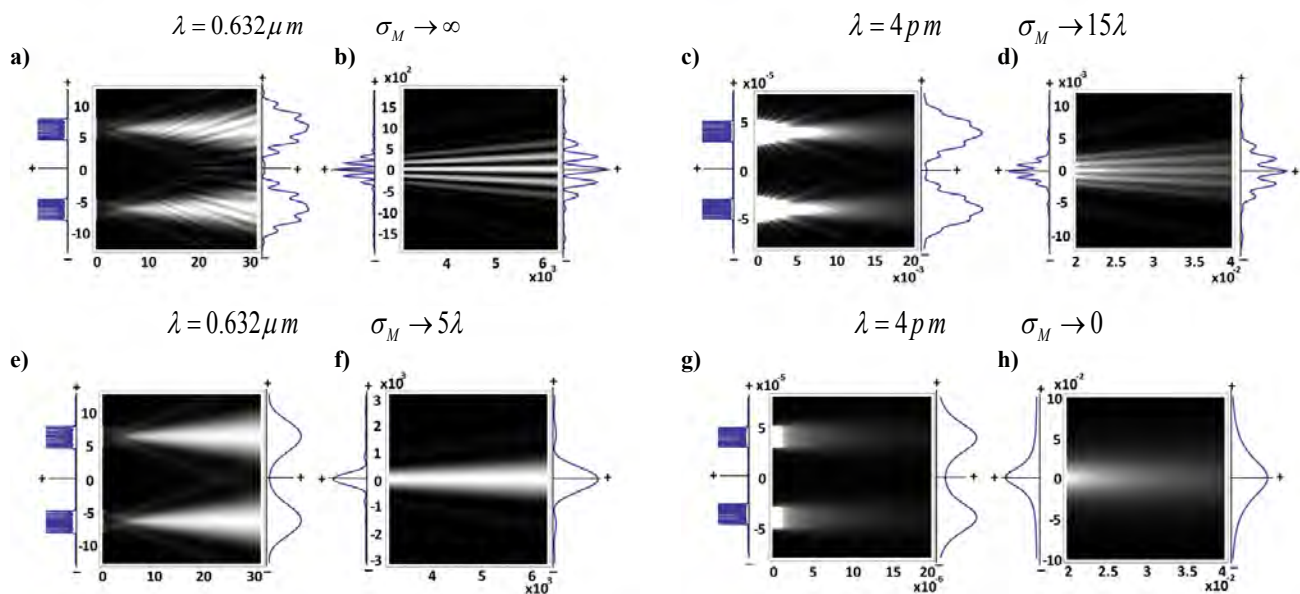
(i) An interference modulation component for the interactions between the real point emitters of any set with the virtual point emitters that associate this set with the other sets.

(ii) A diffraction modulation component for the interactions between the real point emitters of a set with the virtual point emitters associated to pairs with the same set.

(iii) The diffraction component of the geometric potential modulates the interference component.

Let us illustrate these features with the simplest experimental situation, i.e. the double slit experiment, whose energy cones in the MD-stage are shown in Figure 8. The slits of the mask at the M plane determine two co-linear arrays of 11 real point emitters each one, with  $b = \lambda/2$  and  $L = 5\lambda$ . The arrays separation is  $a = 10\lambda$ . A Gaussian two-point correlation is prepared, whose standard deviation  $\sigma_M$  determines the correlation length (i.e. the size of the structured supports) at the M plane. So, the setup induces  $0 \leq N_L \leq 19$  virtual point emitters within each slit, and  $0 \leq N_a \leq 21$  virtual point emitters at the opaque region between the slits, depending on the value of  $\sigma_M$ . The distributions of the discrete sets of real point emitters in the slits are represented by the energy profiles at  $z = 0$  in all graphs of Figure 8. The maximal number of virtual point emitters,  $N_L + N_a = 40$ , are induced in graphs (a)-(b) for classical waves. The real point emitters of both slits interact with this set of virtual point emitters, so that the wave energy distributes over the geometric potential in the MD-stage as shown in (a) near the M plane and (b) in the far-field, after a great enough number of crossing events through the slits. The geometric potential modulates the individual real cones before they are completely overlapped, in the region near the M plane, and produces a high contrasted interference pattern modulated by diffraction in the far-field.

The set of virtual point emitters diminishes in (c)-(d) to  $19 < N_L + N_a < 40$  for single quantum particles, by reducing the correlation length in such a way that the structured supports centered at each slit covers them completely but



**Figure 8.** Energy cones in the MD-stage of a double slit experiment with Gaussian two-point correlation prepared at the M-plane, with correlation length  $\sigma_M$ . The setup is configured for classical waves ( $\lambda = 0.632 \mu m$ ) and for single quantum particles ( $\lambda = 4 pm$ ).  $x_A$  ( $\mu m$ ) and  $z$  ( $\mu m$ ) are the vertical and the horizontal axes, respectively. Energy profiles are shown at the corresponding vertical axes. Symbols + and - denote the positive and negative semi-axis. Graphs on the left column describe the energy cones near the slit mask, while those on the right column denotes the energy cones in the far-field. Images are enhanced for presentation purposes.

the structured support centered at the midpoint between the two slits cover them partially. Consequently, the diffraction component of the geometric potential is maintained but the contrast of the interference component is reduced. It means that the real point emitters realize the interaction with the maximal set of virtual point emitters within each slit, but with a smaller set of virtual point emitters between the slits.

The correlation length is reduced to the slit width in (e)-(f) for classical waves, so that  $N = N_L = 19$ . It means that the interference component of the geometric potential is filtered out and only the diffraction component remains. Therefore, the sets of real point emitter of each slit interact only with the virtual point emitters within the slit. The energy cones near the M plane as well as in the far field do not exhibit interference modulation, so that the energy distribution of the wave at the D plane in the far-field reproduces the diffraction pattern associated to each individual slit.

Finally, the correlation length becomes  $\sigma_M \ll b$  in (g)-(h) for single quantum particles, so that  $N = 0$ . Both components of the geometric potential are filtered out and there are no interactions. So, the overlapping of the Lorentzian shaped real cones gives Lorentzian shaped energy cones too.

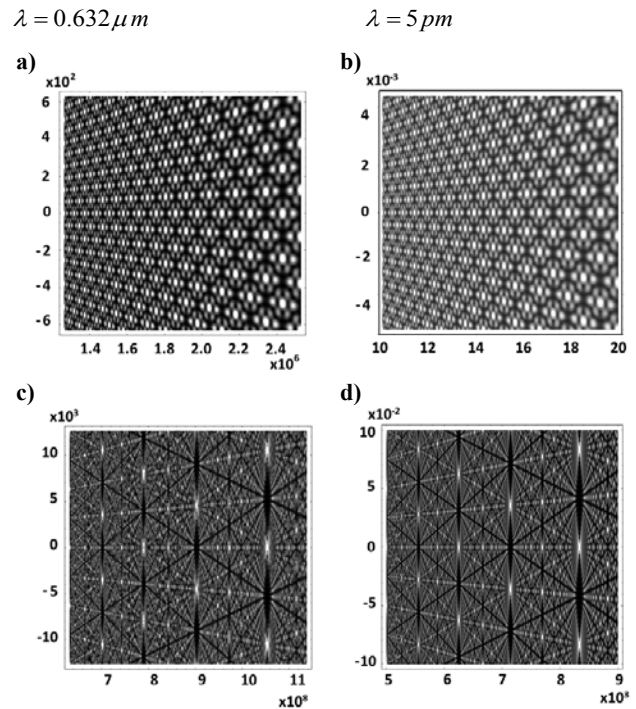
The results above point out a worthy feature of the structured supports of correlation: each virtual point emitter interacts only with the pairs of radiant point emitters inscribed in its structured support. Accordingly, there is no interaction between the real and the virtual point emitters placed at the same point.

The complete map of interactions can be determined by using the spectrum of classes of point emitters, a novel and very effective tool reported in (Castañeda, 2016) for classical waves and (Castañeda&Matteucci, 2017) for quantum particles.

### Non-paraxial Talbot carpets

They are interference patterns that repeat at given axial positions in the region near the M plane in the MD-stage (Wen, *et al.*, 2013). They are produced when  $b \gg \lambda$ , so that the geometric potential contains mainly high spatial frequency modes. Consequently, the interference patterns will be highly contrasted and sharply localized along the z-axis, and their main maxima will be extremely narrow.

Figure 9 illustrates similar shaped non-paraxial Talbot carpets with light waves and single quantum particles. It is remarkable that the vertical patterns with the highest main maxima are not equidistant along the propagation axis nor have the same spacing. It is due to the non-linear argument of the geometric potential modes. This non-paraxial feature, predicted by the geometric model, is crucial in technological applications, in which the stringent tolerances for the substrate positioning is definitive to build molecular nano-wires. Specifically, by using molecules, a real time adjustment of the thin film patterning is not feasible so that a precise design of the experimental setup is strictly needed. In this sense, the far-field paraxial approach is not



**Figure 9.** Talbot carpets with classical waves (left column) and individual quantum particles (right column). The prepared correlation degree is equal to one. Five real point emitters with spacing of  $10^4 \lambda$  are considered in (a)-(b), and 21 emitters with spacing  $10^5 \lambda$  are considered in (c)-(d).  $x_A$  ( $\mu m$ ) and  $z$  ( $\mu m$ ) are the vertical and the horizontal axes, respectively, with  $-10^3 \lambda \leq x_A \leq 10^3 \lambda$  and  $2 \times 10^6 \lambda \leq z \leq 4 \times 10^6 \lambda$  in (a)-(b) and with  $-2 \times 10^4 \lambda \leq x_A \leq 2 \times 10^4 \lambda$  and  $10^9 \lambda \leq z \leq 1.8 \times 10^9 \lambda$  in (c)-(d).

a suitable methodology for the calculation of Talbot carpets with single particle interference, required by technological developments.

### Reported experimental evidences

Remarkable experimental evidences of the validity of the geometric model were recently reported (Castañeda, *et al.*, 2016 a, b). Indeed, it provided accurate predictions of experimental interference patterns performed by other authors, with single electrons (Matteucci, *et al.*, 2013), single molecules of Phthalocyanine ( $PcH_2$ ) and its derivative ( $F_{24}PcH_2$ ) (Juffmann, *et al.*, 2012), and Fullerene  $C_{60}$  (Nairz, *et al.*, 2003). These beautiful experiments open new basic and practical perspectives, not only to test the wave nature of massive particles, but also to develop technological applications regarding the scaling down of molecule based devices as transistors and diodes used in organic electronics (Cappelli, *et al.*, 2014).

The validity of the geometric model has been evidenced in case of interference and diffraction of electromagnetic waves too (Castañeda, 2014 a). Furthermore, two-dimensional arrays of real and virtual point emitters have been used for modelling diffraction and interference with light wave-fronts (Castañeda, 2014 b). Such arrays can be

decomposed in a finite number of additive one-dimensional distributions, so that the geometric model can be applied with mathematical simplicity and without lack of generality.

## Conclusion and summary

The physical description of interference and diffraction with classical waves and quantum particles has been discussed in the framework of a geometric model based on a unique principle and the same general law. The principle is the interaction between real point emitters that characterize the waves and particles moving in the setup, and the virtual point emitters that characterize the setup. It is quite different from the wave superposition, the fundamental notion of the standard description, not only in form but also in meaning. It has been proved, for instance, that the overlapping of real cones, which is the geometrical simile of the wave superposition, cannot produce the spatial distribution of energy called interference.

The fundamental features of the principle were discussed in detail, and the corresponding general law of interference was established by regarding that any interference or diffraction setup is configured in a P&M (preparation-measurement) scheme and has two accessible states named the source-turned-off and the source-turned-on states, determined by the operation of the source of waves or particles. In this context, the emission, mask crossing and detection events of the wave or particle energy are assumed as local events.

In addition, in the source-turned-off state the setup configuration provides a geometric modulation of the space by determining a set of geometric modes in the setup volume. Once the state changes to source-turned-on, a subset of specific modes is selected and weighted to configure correlation cones in the preparation SM-stage as well as cones of geometric potential in the measurement MD-stage. Consequently, pairs of points included in the structured supports of correlation (i.e. the bases of the correlation cones) at the mask plane become correlated in some extent and, because of this, such points become connected to specific modes of the geometric potential in the MD-stage.

The wave disturbance or the individual particle that arrives to a crossing point of the mask in a given structured support is characterized by the real point emitter placed at such point, which individually interacts with the virtual point emitter at the center of the structured support. Consequently, the wave disturbance or the single particle must move along the preferential directions determined by the corresponding geometric potential in the MD-stage, so that its energy at the detector becomes affected by the potential energy provided by the geometric potential.

It is expressed by the new general law for this interaction, which is an energy equation that involves the energy of the wave or the single particle and the potential energy provided by the setup. This law describes the energy distribution of interference and diffraction patterns depending on the distribution of the real point emitters at the mask plane.

The P&M scheme is therefore realized as the preparation of two-point correlation and the corresponding geometric potential, and the measurement of energy distributions.

As a very important consequence, the standard explanations of quantum interference and diffraction based on the wave-particle duality, self-interference and wave collapse are irrelevant in the framework of the geometric model, thus solving the mystery in the heart of quantum mechanics.

It is remarkable that the geometric model is completely causal and deterministic. Therefore, a subject to be analyzed in next papers concern the effects of the statistical features of the emission, the crossing and the detection events on this model.

Finally, the geometric model has been validated by its accurate prediction of interference and diffraction patterns with light (i.e. scalar optical fields) and electromagnetic waves (i.e. by including polarization states), single electrons and different types of single molecules.

## Acknowledgements

Román Castañeda thanks the Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (Facultad de Ciencias) for the financial support in the framework of the Project “Estudio de un nuevo principio para unificar la interferencia y la difracción de la luz y de las partículas” code 43345.

## Author contributions

The authors contributed equally to the content of this paper and declare that they do not have any conflict of interest.

## Conflict of interests

The authors do not have conflict of interests.

## References

- Born, M., and Wolf, E. (1993). Principles of Optics (6<sup>th</sup> ed. Oxford: Pergamon Press).
- Case, W., Tomandl, M., Deachapunya, S., and Arndt, M. (2009). Realization of optical carpets in the Talbot and Talbot-Lau configurations. *Opt. Exp.* **17**: 20966-20974.
- Capelli, R., Dinelli, F., Gazzano, M., D’Alpaos, R., Stefani, A., Generali, G. (2014). Interface functionalities in multilayer stack organic light emitting transistors (OLETs). *Adv. Funct. Mat.* **24**: 5603-5613.
- Castañeda, R. (2014). Electromagnetic wave fields in the micro-diffraction domain. *Phys. Rev. A.* **89**: 013843 (14pp).
- Castañeda, R. (2014). Three dimensional micro-diffraction modeling. *Appl. Opt.* **53**: 1782-1793.
- Castañeda, R. (2016). Spectrum of classes of point emitters of electromagnetic wave fields. *J. Opt. Soc. Am. A* **33**: 1769-1776.
- Castañeda, R. (2017). Discreteness of the real point emitters as a physical condition for diffraction. *J. Opt. Soc. Am. A.* **34**: 184-192.
- Castañeda, R. (2017). Interaction description of light propagation. *J. Opt. Soc. Am. A.* **34**: 1035-1044.
- Castañeda, R., and 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., 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., and Capelli, R.** (2016). Quantum Interference without Wave-Particle Duality. *J. Mod. Phys.* **7**: 375-389.
- Feynman, R., Leighton, R., and Sands, M.** (1965). *The Feynman Lectures on Physics* vol. 3 (Menlo Park: Addison-Wesley).
- Feynman, R., and Hibbs, A.** (1965). *Quantum Mechanics and Path Integrals* (New York: McGraw-Hill).
- Juffmann, T., Milic, A., Muellneritsch, M., Asenbaum, P., Tsukernik, A., Tuexen, J., and Arndt, M.** (2012). Real-time single-molecule imaging of quantum interference. *Nature Nanotech.* **7**: 297-300.
- Mandel, L., and Wolf, E.** (1995). *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge: Cambridge University Press).
- Matteucci, G.** (1990). Electron wavelike behaviour: a historical and experimental introduction. *Am. J. Phys.* **58**: 1143-1147.
- Matteucci, G., Pezzi, M., Pozzi, G., Alberghi, G., Giorgi F., Gabrielli, A., and Gazzadi, G.** (2013). Build-up of interference patterns with single electrons. *Eur. J. Phys.* **34**: 511-517.
- Nairz, O., Arndt, M., and Zeilinger, A.** (2003) Quantum interference experiments with large molecules. *Am. J. Phys.* **71**: 319-325
- Wen, J., Zhang, Y., and Xiao, M.** (2013). The Talbot effect: recent advances in classical optics, nonlinear optics, and quantum optics. *Adv. Opt. Phot.* **5**: 83-130.

# Aplicación de metamateriales para estimar índices de refracción

✉ Javier Ricardo Castro-Ladino<sup>1</sup>, ✉ Alba G. Ávila-Bernal<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia,

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia

## Resumen

Se presenta el desarrollo de un metamaterial para estimar el índice de refracción en líquidos. El metamaterial se desarrolló insertando celdas cilíndricas en el plano de tierra de una línea microcinta, estas que forman una estructura de brecha de banda electromagnética (*electromagnetic bandgap*, EBG). Dentro de las celdas se depositaron líquidos con índices de refracción estimados en el laboratorio. Se evaluaron los parámetros de dispersión  $S_{21}$  y  $S_{11}$  mediante simulaciones electromagnéticas con modelos desarrollados, y de forma experimental, con prototipos fabricados. Se analizó la variación de la frecuencia central, el ancho de banda y el nivel de pérdidas por inserción de la brecha de frecuencias generada como respuesta a la variación del índice de refracción del material depositado dentro de las celdas. Los resultados obtenidos muestran que es posible estimar el índice de refracción de materiales monitoreando la frecuencia de resonancia o el nivel de pérdidas por inserción de la brecha generada. El metamaterial desarrollado es fácil de construir y su desempeño es adecuado en el rango de las microondas. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Metamateriales; EBG; Índice de refracción.

## Application of metamaterials to estimate refractive indexes

### Abstract

We developed a metamaterial to estimate the refractive index in liquids by inserting cylindrical cells in the ground plane of a microstrip line, lines that form an electromagnetic bandgap (EBG) structure. We deposited inside the cells liquids with refractive indices estimated in the laboratory. The dispersion parameters  $S_{21}$  and  $S_{11}$  were evaluated by means of electromagnetic simulations with developed models and experimentally with manufactured prototypes. We analyzed the variation of center frequency, the bandwidth, and the level of losses by the variation of the refractive index of the material deposited inside the cells. Our results showed that it is possible to estimate the refractive index of materials by monitoring the resonance frequency or the level of insertion losses of the generated gap. The metamaterial developed is easy to build and its performance is adequate in the range of microwaves. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Metamaterials; EBG; Refractive index sensor.

## Introducción

La determinación de las características de un material, tales como la permitividad, la permeabilidad y la constante dieléctrica, es importante en aplicaciones utilizadas, por ejemplo, en los procesos médicos e industriales para sólidos y líquidos (Sadat, 2017), y en la industria de alimentos y de ingeniería civil, entre otras (Domínguez, 2015). El índice de refracción es una característica inherente de una sustancia, estrechamente relacionada con sus propiedades físicas y químicas (Yüksel, 2016). Varias técnicas se han desarrollado para medir estas características como indicadores de los cambios químicos y físicos de los materiales.

Debido a sus características, entre las que se destacan la precisión, el bajo consumo de energía y el bajo costo, los sensores de microondas se han utilizado para medir las propiedades de los materiales (Majidifar, 2016). Se han

analizado líquidos, gases y materiales sólidos mediante sensores de microondas, con lo que se ha demostrado su amplia aceptabilidad (Domínguez, 2015). Los metamateriales (MTM) son apropiados para el desarrollo de sensores de microondas. Son materiales artificiales obtenidos mediante la combinación de diferentes tipos de estructuras o materiales, capaces de controlar simultáneamente la permitividad y la permeabilidad, que han demostrado tener propiedades deseables para una amplia gama de aplicaciones en ingeniería que no ofrecen los materiales en su estado natural (Cimelli, 2011). Estas estructuras son atractivas para el desarrollo de nuevos componentes y subsistemas en diferentes áreas,

### \*Correspondencia:

Alba G. Ávila-Bernal; [a-avila@uniandes.edu.co](mailto:a-avila@uniandes.edu.co)

Recibido: 6 de marzo de 2019

Aceptado: 15 de mayo de 2019

Editor: Diógenes Campo

entre las que se destacan las comunicaciones y los sensores (Lapine, 2009; Bakir, 2017; Tümkaya, 2018), las aplicaciones biomédicas, el monitoreo de procesos de materiales compuestos y los biosensores (Shengyon, 2018).

El principio básico de funcionamiento de la detección con metamateriales se basa en el cambio de los coeficientes de transmisión-reflexión ( $S$  - parámetros de dispersión) en términos de frecuencia o factor de calidad producto de un cambio en los parámetros detectados, por ejemplo, el cambio dieléctrico del medio por el cual se transmite una señal, la variación en  $\mu/\epsilon$  o el índice de refracción del material (Chen, 2012; RoyChoudhury, et al., 2016).

Se han desarrollado varios sensores utilizando las propiedades de los metamateriales, especialmente biosensores y sensores de microondas en diversas aplicaciones para determinar la presión, la temperatura, la humedad y la permitividad (Bakir, 2017; Sadat, 2017; Domínguez, 2015; Chen, 2012), así como el índice de refracción (Fei, et al., 2015) y la concentración de nanopartículas (Liu, et al., 2017), entre otras. Los metamateriales desarrollados en forma de una línea de microcinta insertando estructuras EBG formadas por celdas cilíndricas (3D) en el plano de tierra, son fáciles de construir, requieren pocos recursos técnicos y económicos, y tienen un rendimiento adecuado en el rango de las microondas.

Como consecuencia de la inserción de las estructuras EBG, el metamaterial desarrollado atenúa las señales de microondas transmitidas en un cierto rango de frecuencia (brecha) debido a la variación del índice de refracción sobre la misma capa de sustrato dieléctrico. Cuando una onda incide sobre un material, el cambio en su respuesta electromagnética se rige por dos parámetros fundamentales: la permitividad ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad ( $\mu$ ) (RoyChoudhury, et al., 2016). Los valores de  $\epsilon$  y  $\mu$  están relacionados con el índice de refracción mediante la siguiente ecuación:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1)$$

La frecuencia central ( $f_c$ ) de la brecha generada se puede estimar a partir de la condición de difracción de Bragg hasta el primer orden, que establece que para que exista reflexión se debe cumplir con la condición de que la distancia interplanar o la separación entre los defectos sea igual a la mitad de la longitud de onda ( $d = \lambda / 2$ ). Cuando esta relación se cumple, las frecuencias se atenúan impidiendo la propagación de la señal en este rango. La  $f_c$  de la brecha generada y la constante de red ( $d$ ) de la estructura EBG, se pueden calcular a partir de la constante de propagación de la onda en el sustrato dieléctrico, que se define como:

$$\beta = \frac{2\pi f_c \sqrt{\epsilon_r}}{c}, \quad \beta = 2\pi / \lambda, \quad f_c = \frac{c}{2d\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

En consecuencia, es posible estimar el índice de refracción de materiales depositados dentro de las celdas de la estructura EBG monitoreando la variación de la  $f_c$  de la brecha generada.

En este trabajo se presenta el desarrollo experimental de un metamaterial para estimar el índice de refracción en

líquidos depositados dentro de las celdas de una estructura EBG ubicada en el plano de tierra de una línea microcinta construida sobre un sustrato dieléctrico. El índice de refracción se estimó monitoreando los cambios en la  $f_c$  o el nivel de pérdidas por inserción (IL) de la brecha generada.

### Materiales y métodos

Se desarrolló un metamaterial al introducir una estructura EBG conformada por celdas cilíndricas 3D con 8 mm de radio ( $r = 8mm$ ) y 1 mm de profundidad ( $h_c = 1mm$ ), ubicada en el plano de tierra de una línea microcinta sobre sustratos dieléctricos FR4 y RT/duroid® 6010 (Rogers Corporation), respectivamente (Figura 1), utilizando técnicas de fabricación de circuitos impresos y de fresado con equipo de control numérico (CNC).

El modelo se simuló en el programa HFSS (Ansoft), ubicando dentro de las celdas cilindros de 200  $\mu m$  de altura ( $h_c = 200\mu m$ ) para simular el depósito de cinco líquidos con diferentes índices de refracción ( $n$ ). El índice de refracción ( $IR$ ) de cada líquido se estimó con un refractómetro Modelo 10450 de American Optical, con rango de medida de 1,32 a 1,7 (Tabla 1). Se tomó como referencia el aceite de inmersión

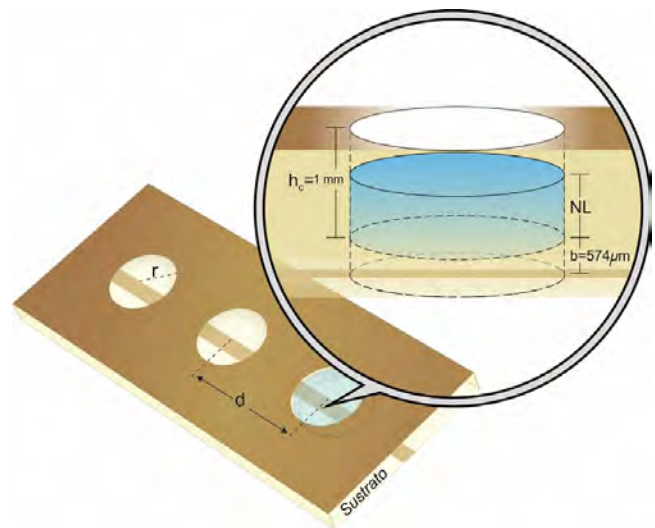


Figura 1. Diagrama esquemático de la línea microcinta con estructura EBG en celdas cilíndricas ubicadas en el plano de tierra

Tabla 1. Índices de refracción estimados

Líquido	Temperatura (°C)	Índice de refracción estimado
Agua estilada	25,5	1,333
Acetona	24,8	1,357
Butanol	25,0	1,398
Glicerina	25,2	1,471
Aceite de inmersión de tipo F	24,8	1,515

tipo F para microscopía óptica (Olympus – Immersion Oil Type F), con un índice de refracción  $n_e = 1.518$ , a  $23^\circ\text{C}$ , certificado por el fabricante. El índice de refracción de este aceite medido bajo las condiciones de laboratorio descritas fue de  $n = 5.515$  a  $24,8^\circ\text{C}$ .

Para las simulaciones electromagnéticas se utilizaron los índices de refracción estimados en el laboratorio; el modelo del metamaterial se simuló en un rango de  $1\text{GHz}$  a  $5\text{GHz}$ , colocando estructuras EBG conformadas por tres y cinco celdas cilíndricas, con las dimensiones mencionadas y una constante de red de  $29\text{mm}$  ( $d = 29\text{mm}$ ) sobre los dos sustratos seleccionados. El resultado de las simulaciones evidenció que el material depositado dentro de las celdas generó una variación en la  $f_c$ , el ancho de banda ( $BW$ ) y el  $IL$  ( $S_{21}$  – *parámetro de dispersión*) de la brecha generada (Figura 2).

En la Figura 2 se observa una variación en la  $f_c$  ( $\Delta f_c$ ) y en el  $IL$  ( $\Delta S_{21}$ ) de la brecha generada para cada uno de los cinco líquidos simulados utilizando el sustrato FR4. La respuesta fue similar para los modelos desarrollados y simulados sobre el sustrato RT/duroid® 6010, pero con una frecuencia central cercana a  $2,6\text{GHz}$ . Se presentó un corrimiento hacia la izquierda (disminución) de la  $f_c$  y una disminución en el  $IL$  ( $S_{21}$ ) como respuesta al incremento del índice de refracción.

La respuesta presentó características similares para los cinco líquidos en los 20 modelos simulados. Al incrementar el número de celdas, la magnitud de la frecuencia central disminuyó en  $0,1\text{GHz}$  aproximadamente; es decir, el modelo del metamaterial con cinco celdas presentó una  $f_c$  de la brecha generada menor que la del modelo con tres celdas, pero aumentó el  $BW$  en un  $12\%$ , y el  $IL$  en  $20\text{dB}$  aproximadamente. Se fabricó el prototipo utilizando estructuras EBG de tres celdas porque en las respuestas obtenidas en la simulación del modelo con cinco celdas los parámetros de dispersión  $S_{11}$  y  $S_{21}$  no se interceptaron en las frecuencias superiores a  $4\text{GHz}$ .

Los prototipos se fabricaron mediante un proceso de fresado para generar la estructura EBG conformada por tres cilindros de  $8\text{mm}$  de radio y  $1\text{mm}$  de profundidad sobre una tarjeta de circuito impreso (PCB) del tipo FR4, con una constante de permitividad de  $\epsilon_r = 4.4$ . El grosor del sustrato fue de  $1,57\text{mm}$  y el espesor de las capas de cobre, de  $17\mu\text{m}$  (Figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/850/3839>). Utilizando técnicas de litografía, se generó en la cara superior del sustrato una línea microcinta con ancho de  $3\text{mm}$  e impedancia de  $50\Omega$ . Se eligió el sustrato FR4 por ser más grueso que el RT/duroid® 6010, lo que facilita el proceso de fresado.

Inicialmente se hicieron mediciones con los cinco líquidos seleccionados llenando completamente cada una de las celdas, es decir, a un nivel de  $1\text{mm}$ , lo que corresponde a un volumen de  $200\mu\text{L}$  (Castro, 2012). La respuesta de los parámetros de dispersión observada en la pantalla del analizador vectorial de redes (VNA), no correspondía con las curvas esperadas, además, presentaban ondulaciones y

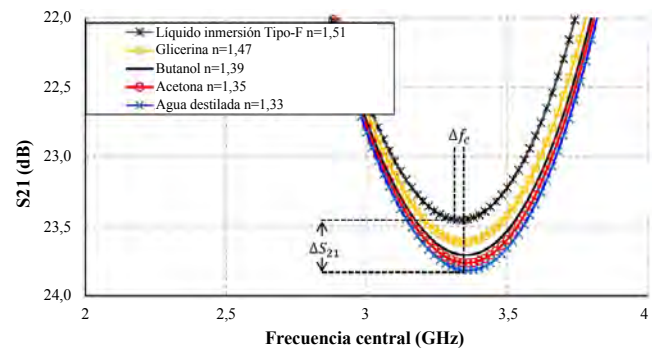


Figura 2. Parámetro de dispersión  $S_{21}$  Vs. frecuencia para cada líquido simulado

no se observó una adecuada correspondencia entre la magnitud de los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$ . En consecuencia, se realizaron varias mediciones variando el nivel de líquido dentro de las celdas y se encontró que el más adecuado era de  $40\mu\text{L}$ . Utilizando este nivel de llenado de las celdas, se procedió a hacer simulaciones electromagnéticas para todos los modelos fabricados y, posteriormente, las mediciones en el laboratorio.

La  $f_c$  y el  $IL$  de la brecha generada se tomaron en el punto correspondiente a la máxima atenuación del parámetro  $S_{21}$ . Desde ese punto se desplazó el cursor a la misma frecuencia sobre la curva que representaba el parámetro  $S_{11}$  y desde este punto se tomaron otros dos, uno a la izquierda y otro a la derecha, que correspondían a una atenuación de  $-3\text{dB}$ ; la diferencia entre estos dos puntos representa el  $BW$ .

Para cada prueba se midieron los parámetros de dispersión  $S_{11}$  y  $S_{21}$  antes de adicionar el correspondiente líquido (celdas llenas de aire). Luego se depositaban  $40\mu\text{L}$  del líquido dentro de cada una de las celdas, se medían los dos parámetros de dispersión, y se dejaba el montaje durante quince (15) minutos para evaluar la estabilidad de la respuesta. Por último, se retiraba el líquido de las celdas y estas se limpiaban utilizando isopropanol y luego se dejaban secar durante 15 minutos antes de proceder a hacer las mediciones con otro líquido. Para cada prueba se hicieron cinco mediciones en días y horas diferentes monitoreando la temperatura en un punto cercano al prototipo bajo prueba. La temperatura osciló entre  $20,5$  y  $23^\circ\text{C}$ , con una media de  $21,32^\circ\text{C}$ . En cada medición se tomaron 201 puntos dentro del rango de  $1\text{GHz}$  a  $5\text{GHz}$ . Se calculó la media aritmética de los resultados de las cinco mediciones de cada montaje.

El analizador VNA utilizado posee un rango de medida de hasta  $6\text{GHz}$ . Cada tarjeta prototipo se ubicó en una mesa de pruebas (Figura 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/850/3840>) con la estructura PBG en la parte superior para depositar líquidos dentro de cada una de las celdas. Para la manipulación de los líquidos se utilizó una micropipeta digital de volumen variable (Science MED 0200500) de  $10\mu\text{L}$  a  $100\mu\text{L}$ , con incrementos de  $1\mu\text{L}$  y una precisión de  $0,3\%$ .



**Tabla 2.** Magnitud de los parámetros de la brecha generada, y simulación y medición del metamaterial al depositar líquidos dentro de las tres celdas de la estructura EBG

Líquido	Índice de refracción	Frecuencia central (GHz)		Pérdidas por Inserción - IL (dB)		Ancho de banda	
		Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido
Agua destilada	1,333	3,36	3,28	23,82	22,95	2,58	2,50
Acetona	1,357	3,34	3,26	23,76	22,89	2,58	2,48
Butanol	1,398	3,32	3,22	23,70	22,76	2,58	2,46
Glicerina	1,471	3,32	3,20	23,61	22,55	2,56	2,44
Aceite de inmersión de tipo F	1,515	3,30	3,20	23,45	22,37	2,54	2,42

**Resultados**

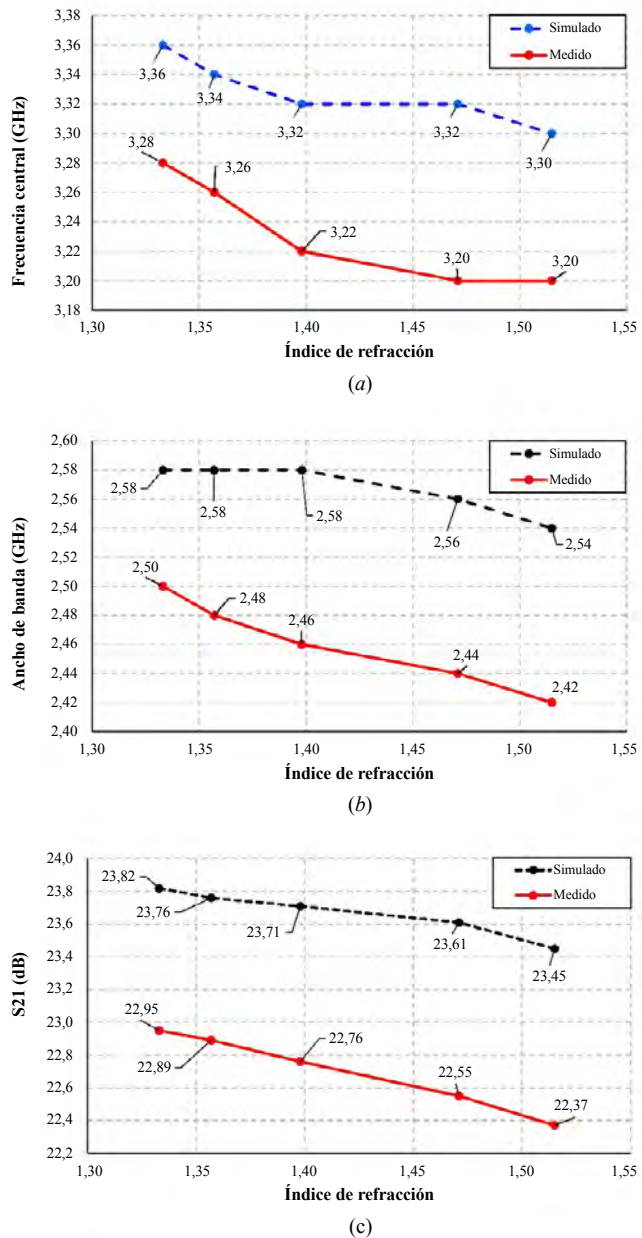
En la Tabla 2 y la Figura 3 se presentan los resultados de la variación de la magnitud de la  $f_c$ , el  $BW$  y el  $IL$  ( $S_{21}$ ) de la brecha generada al introducir los líquidos seleccionados en las tres celdas de la estructura EBG.

Con los datos obtenidos en las mediciones se elaboraron gráficas de los parámetros de dispersión  $S_{11}$  y  $S_{21}$  para cada líquido y se compararon los resultados obtenidos en las simulaciones con los obtenidos experimentalmente en el laboratorio. Se ajustó el parámetro  $S_{21}$  utilizando herramientas de MatLab (MathWorks®) debido a las ondulaciones que presentaban las curvas correspondientes a los datos experimentales, causadas, probablemente, por ruido e impurezas presentes en el procedimiento experimental. Se asumió como criterio el seleccionar el polinomio cuya curva presentara la mínima desviación y se calculó el punto máximo de la función. En la Figura 4 se presenta, a manera de ejemplo, el ajuste realizado a las curvas correspondientes al agua destilada y al aceite de inmersión de tipo F. Un polinomio de grado 10 es el que generó el mínimo error cuadrático. El análisis estadístico de los datos obtenidos, tanto en las simulaciones como en las mediciones experimentales, arrojó una desviación estándar de 8,6 y un error de 0,6 %.

La sensibilidad del metamaterial para detectar el índice de refracción de un material depositado dentro de las celdas de la estructura EBG, se calcula como el cociente entre la variación de los parámetros de la brecha medidos (Tabla 2), y la variación del índice de refracción. En la Tabla 3 se presenta la sensibilidad para cada uno de los tres parámetros de la brecha. El parámetro que presentó mayor sensibilidad fue el nivel de pérdidas por inserción.

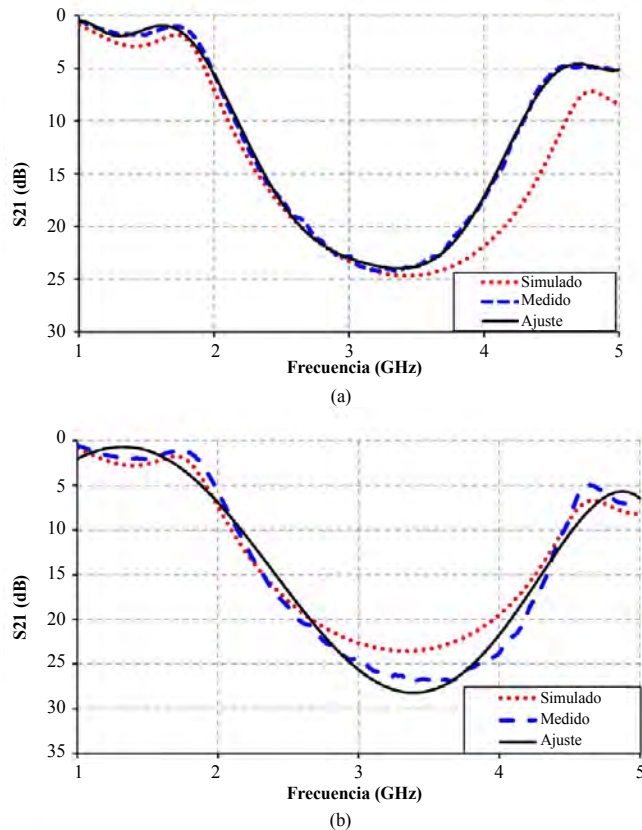
Para validar la respuesta del prototipo, se seleccionaron dos materiales con índices de refracción teóricos conocidos: el etanol,  $n = 1.360$ , tres lentes con radio de curvatura de  $25,44 \text{ mm}^2$  y  $n = 1,5$ , y uno con un índice de refracción desconocido, correspondiente a trozos de sustrato RT/duroid®-6010.

En la Figura 5a se muestra la determinación gráfica del índice de refracción de tres materiales midiendo la variación en  $f_c$  de la brecha generada. Mediante la herramienta de línea



**Figura 3.** Variación de la  $f_c$ , el  $BW$  y el  $IL$  ( $S_{21}$ ) de la brecha generada al depositar líquidos con diferentes índices de refracción dentro de la estructura EBG.

de tendencia de Microsoft Excel, se determinó la ecuación correspondiente a la curva de variación de la frecuencia, lo que dio como resultado un polinomio de grado 3, y luego se calcularon los datos correspondientes a la variación del índice de refracción en un rango de 1.3 a 1.9. Se ubicaron los datos de la frecuencia central para los tres materiales seleccionados, mostrando las coordenadas de cada punto, donde  $x$  es el índice de refracción y  $y$  es la  $f_c$  de la brecha. La medición experimental de la  $f_c$  se hizo comparando estos datos con los obtenidos mediante simulación.



**Figura 4.** Parámetro de dispersión  $S_{21}$  vs. frecuencia (dato ajustado). (a) Agua destilada y (b) aceite de inmersión de tipo F, dentro de la estructura EBG.

**Tabla 3.** Sensibilidad de los parámetros de la brecha generada

Parámetro de la brecha ( <i>bandgap</i> )	Variación del parámetro	Variación del índice de refracción	Sensibilidad
Frecuencia central	0,02 GHz	0,182	0,11
Nivel de pérdidas por inserción	0,58 dB	0,182	3,19
Ancho de banda	0,08 GHz	0,182	0,44

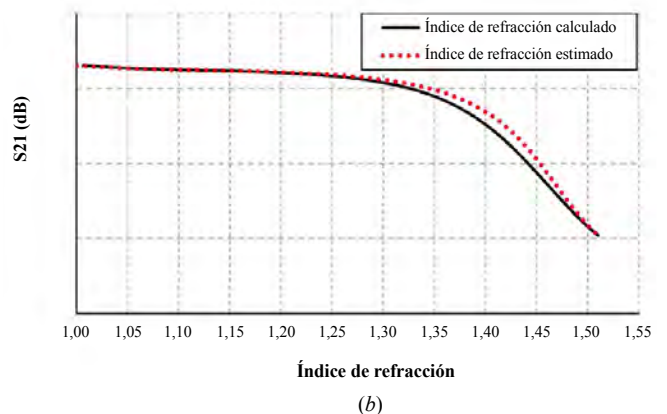
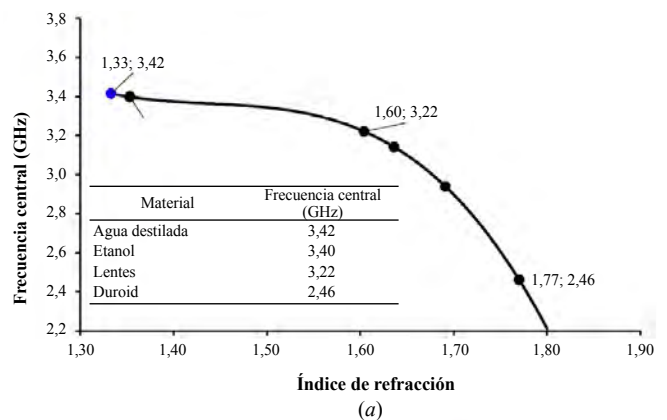
Con un procedimiento similar se utilizaron los datos del nivel de pérdidas por inserción para calcular el índice de refracción de materiales. El resultado se presenta en la Tabla 4 y en la Figura 5b.

### Discusión

Los resultados obtenidos en las simulaciones electromagnéticas y en el procedimiento experimental evidenciaron que la frecuencia central y el nivel de pérdidas por inserción de la brecha generada son los parámetros con la respuesta más lineal ante la variación del índice de refracción del medio por el cual se transmite la señal de microondas, esto como consecuencia de depositar un material, líquidos en este caso, dentro de las celdas de la estructura EBG. El nivel de pérdidas por inserción es el parámetro que presentó el mayor factor de sensibilidad.

En consecuencia, mediante el monitoreo de la  $f_c$  y el nivel de pérdidas por inserción, fue posible estimar el índice de refracción de materiales utilizando un metamaterial al depositarlos dentro de las celdas de una estructura EBG periódica.

Sin embargo, las curvas correspondientes al parámetro de dispersión  $S_{21}$  logradas, no presentaron un pico definido en el valor de la  $f_c$  de la brecha, lo que dificultó su estimación



**Figura 5.** Estimación del índice de refracción de tres materiales utilizando el metamaterial desarrollado, (a) por variación de la  $f_c$  y (b) por variación de  $S_{21}$ .

**Table 4.** Estimación del índice de refracción de tres materiales midiendo el parámetro S21

Material	Índice de refracción	Índice de refracción estimado	Frecuencia (GHz)		Pérdidas por Inserción - IL(dB)	
			Simulado	Medido	Simulado	Medido
Aire	1,000	1,007	3,38	3,54	24,13	23,61
Etanol	1,360	1,340	3,12	3,24	22,86	22,88
Lentes	1,510	1,503	3,34	3,20	23,45	22,35

mediante la simple observación. Probablemente, el uso de estructuras típicas de metamateriales, como los anillos resonantes (*split-ring resonator*, SRR), dentro de las celdas permitan obtener curvas con picos (*shift*) más definidos y de mayor precisión y facilidad para estimar el valor del parámetro  $S_{21}$ . El metamaterial desarrollado es de fácil fabricación, no demanda mayores recursos y presenta un buen desempeño en el rango de las microondas.

### Material suplementario

**Figure 1S.** Prototipo del metamaterial fabricado sobre el sustrato FR4. Vea la figura 1S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/850/3839>

**Figure 2S.** Montaje experimental para medir los parámetros de dispersión del metamaterial usando el analizador VNA. Vea la figura 2S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/850/3840>

### Contribución de los autores

Los autores participaron conjuntamente en el desarrollo, simulación y medición de los modelos y prototipos; en la validación y análisis de los resultados, y en la elaboración del manuscrito

### Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no existe ningún tipo de conflicto de intereses en el desarrollo de la investigación, ni en la publicación de los resultados presentados en el presente artículo.

### Referencias

**Bakir, M., Karaaslan, M., Unal E., Akgol, O., Sabah, C.** (2017). Microwave metamaterial absorber for sensing applications, *Opto-Electronics Review*. **25**: 318-325.

**Castro, J.R. & Ávila, A.G.** (2012). Efecto de las características geométricas de estructuras PBG y sus posibles aplicaciones. Tesis de maestría, Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Bogotá D.C.

**Chen, T., Li, S., Sun, H.** (2012). Metamaterials application in sensing. *Sensors*, **12**: 2742-2765. Doi: 10.3390/s120302742

**Ciminelli, C. & Andreone, A.** (2011). Introduction to photonic crystals and metamaterials. En Andreone, A., Cusano, A., Cutolo, A., Galdo, V. Selected Topics in Photonic and Metamaterial, p. 1-46. Singapore: Mainland Press Pte Ltd.

**Domínguez, M., Cataño, D., Reyes, E.** (2015). Design a sensor of relative permittivity of a medium using an antenna microstrip with metamaterials structures. *Actas de Ingeniería*. **1**: 110-114.

**Fei, F., Sai, C., Xiang-Hui, W. Peng-Fei, W., Shen-Jiang, C.** (2015). Terahertz refractive index sensor based on photonic column array. *IEEE Photonics Technology Letters*. **27** (5): 478-481.

**Lapine, M., Powell, D., Gorkunov, M., Shadrivov, I., Marqués, R., Kivshar, Y.** (2009). Structural tunability in metamaterials. *Applied Physics Letters*. **95** (8): 1-3.

**Liu, W, Fan, F, Chang, S, Hou, J., Chen, M., Wang, Bai, J.** (2017). Nanoparticles doped film sensing based on terahertz metamaterials. *Optics Communications*. **405**: 17-21.

**Majidifar, S. & Karimi, G.** (2016). New approach for dielectric constant detection using a microstrip sensor. *Measurement*. **93**: 310-314.

**RoyChoudhury, S., Rawat, V., Jalal, A.H., Kale, S.N.** (2016). Recent advances in metamaterial split-ring-resonator circuits as biosensors and therapeutic agents. *Biosensor and Bioelectronics*. **86**: 595-608.

**Sadat, F. & Ahmadi-S, J.** (2017). Industrial liquid characterization enhancement using microwave sensor equipped with electronic band gap structure. *International Journal of Electronics and Communications* 9 (AEÜ). **82**: 152-159.

**Shengyong, L., Xiaochuan, A., Ronghua, W., Jiajun, C.** (2018). Experimental demonstration of metal-dielectric metamaterial refractive index sensor. *Optics and Laser Technology*. **100**: 304-308.

**Tümkiye, M.A., Karaaslan, M., Sabah, C.** (2018) Metamaterial-based fluid sensor for identifying different types of fuel oil samples. *Chinese Journal of Physics*. **56**: 1872-1878. Doi: 10.1016/j.cjph.2018.08.018

# Delfines de río: especies indicadoras del estado de salud de los ecosistemas acuáticos de la Amazonia y la Orinoquia

✉ Fernando Trujillo-González\*, ✉ Federico Mosquera-Guerra, ✉ Nicole Franco

Fundación Omacha

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 22 de abril del 2019

## Resumen

En el presente estudio se emplearon los tamaños poblacionales de dos géneros de delfines de río (*Inia* y *Sotalia*) como indicadores del estado de salud de 23 ecosistemas acuáticos asociados con las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco. La información se recopiló durante 30 expediciones científicas realizadas entre el 2006 y el 2017 en Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Brasil y Venezuela. Los resultados evidenciaron procesos de degradación ecosistémica en los ríos Caquetá, Putumayo, Iténez y Grande en la cuenca del Amazonas, y en el Tocantins-Araguaia, el Guaviare y la cuenca alta del Orinoco. Esta condición puede verse incrementada en las próximas décadas debido a la pérdida de conectividad entre los Andes y el Amazonas por la presencia de 142 hidroeléctricas ya existentes y 160 que están en fase de planeación y han sido propuestas para los ríos que drenan desde las cabeceras andinas al Amazonas. Los impactos ecosistémicos en las redes tróficas acuáticas de estos sistemas generados por este tipo de infraestructura se han estudiado poco. Los resultados del estudio aportan importantes elementos para entender los procesos de degradación ocasionados por la fragmentación y la pérdida de la conectividad fluvial en la Amazonia y la Orinoquia a partir de los tamaños poblacionales de los delfines de río. Estos cetáceos tienen variados requerimientos ecológicos y se han adaptado evolutivamente a los cambios estacionales predecibles. Estas características ecológicas convierten a los delfines de río en excelentes indicadores para entender las afectaciones en los pulsos de inundación y sus efectos sobre la funcionalidad ecosistémica de los complejos sistemas hidrográficos de las cuencas del Amazonas y el Orinoco. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Bioindicación; Conservación; Cuenca; Suramérica; Tamaños poblacionales.

## River dolphins: Species that indicate the state of health of the aquatic ecosystems of the Amazon and Orinoco regions

### Abstract

In the present study, we used the population sizes of river dolphins (*Inia* and *Sotalia*) as indicators of the state of health of 20 aquatic ecosystems associated with the basins of the Amazon and Orinoco Rivers. The information was collected during 30 scientific expeditions carried out during 2006 and 2017 in Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Brazil, and Venezuela. The results show intense processes of ecosystem degradation in the Caquetá, Putumayo, Iténez, and Grande Rivers in the Amazon basin and the Tocantins-Araguaia and Guaviare Rivers, as well as in the upper basin of the Orinoco River. This condition may be increased in the coming decades due to the loss of connectivity between the Andes and the Amazon due to the presence of 142 already existing hydroelectric dams and other 160 which are in the planning stage on the rivers running from the Andean headwaters to the Amazon. The ecosystemic impacts of this type of infrastructure on the aquatic trophic networks of these systems have been poorly studied. Our results provide important elements for understanding the degradation processes caused by the fragmentation and the loss of fluvial connectivity in the Amazon and Orinoco regions using the population sizes of river dolphins as indicators. These cetaceans have extensive ecological requirements and are evolutionarily adapted to predictable seasonal changes. These ecological characteristics make river dolphins excellent indicators to understand the effects on flood pulses and their effects on the ecosystem functionality of the complex hydrographic systems of the Amazon and Orinoco basins. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Bioindication; Conservation; Basin; South America; Population sizes.

### \*Correspondencia:

Fernando Trujillo-González, [fernando@omacha.org](mailto:fernando@omacha.org); **Recibido:** 28 de septiembre de 2018; **Aceptado:** 28 de febrero de 2019; **Editor:** Jaime Cantera

## Introducción

Los delfines de río se encuentran entre los mamíferos acuáticos más amenazados del planeta y están clasificados en la categoría “En peligro” (EN) (da Silva, *et al.*, 2018). Su distribución geográfica abarca países de Asia y Suramérica donde las actividades antrópicas han deteriorado de manera preocupante los ecosistemas acuáticos donde habitan (Reeves & Leatherwood, 1994; Smith & Braulik, 2008; Trujillo, *et al.*, 2010; Mosquera-Guerra, *et al.*, 2015). En Asia se reportan delfines de agua dulce en el río Yangtze (China) y en el complejo hidrográfico del río Ganges (India, Nepal), en el Indo (Pakistán) y en el Megna (Bangladesh) (Smith & Braulik, 2008). En el caso de China, en el 2005 se reportó la extinción de la especie *Lipotes vexillifer* (Turvey, *et al.*, 2007), siendo una de las más recientes desapariciones de un gran mamífero en tiempos modernos. En Suramérica existen al menos cuatro especies de delfines de río: 1) el bufeo o tonina (*Inia geoffrensis* Blainville, 1817) con las subespecies: *I. g. geoffrensis* (Blainville, 1817) en la cuenca del Amazonas e *I. g. humboldtiana* (Pilleri and Gihl, 1977) en la cuenca del Orinoco; 2) el bufeo boliviano (*Inia boliviensis* D’Orbigny, 1834) presente en los ríos Mamoré, Itenez, Grande y en la cuenca alta de río Madeira en Bolivia y Brasil; 3) el boto de Araguaia (*Inia araguaiaensis*, Hrbek, *et al.*, 2014) en la cuenca de los ríos Tocantins y Araguaia, y 4) el tucuxi (*Sotalia fluviatilis* Gervais & Deville, 1853) en la Amazonia (Caballero, 2007; Shostell & Ruíz-García, 2010; Hrbek, *et al.*, 2014; Gravena, *et al.*, 2015; Mosquera-Guerra, *et al.*, 2015a). Es importante mencionar que la resolución taxonómica para los géneros *Inia* y *Sotalia* aún se encuentra en revisión, y es posible que en un futuro se logre la descripción de nuevas especies.

Las principales amenazas contra la conservación de los delfines de río en Asia y Suramérica se concentran en la pérdida, el deterioro y la fragmentación de sus hábitats ocasionados por los intensos procesos de deforestación, la construcción de hidroeléctricas y la contaminación de ríos con metales pesados como el mercurio, con pesticidas e hidrocarburos (Trujillo, *et al.*, 2010; Pavanato, *et al.*, 2016; Mosquera-Guerra, *et al.*, 2015d; 2018; 2018a). A ello se añade el colapso de los recursos pesqueros que trae como consecuencia la reducción en la disponibilidad de presas para estos cetáceos, así como las interacciones biológicas y operacionales con las pesquerías comerciales y artesanales que ocasionan percepciones negativas y conflictos con los delfines de río (Trujillo, *et al.*, 2010a; Mosquera-Guerra, *et al.*, 2015b).

En consecuencia, durante las últimas décadas se recomendó el diseño de metodologías apropiadas para la estimación poblacional de los delfines de río, con el fin de establecer si realmente sus poblaciones se encontraban estables o disminuían (Perrin, *et al.*, 1989; Reeves, *et al.*, 1994a, International Whaling Commission - IWC, 2000). Entre 1980 y 1990 solo existían este tipo de programas de investigación con carácter permanente en países como Colombia

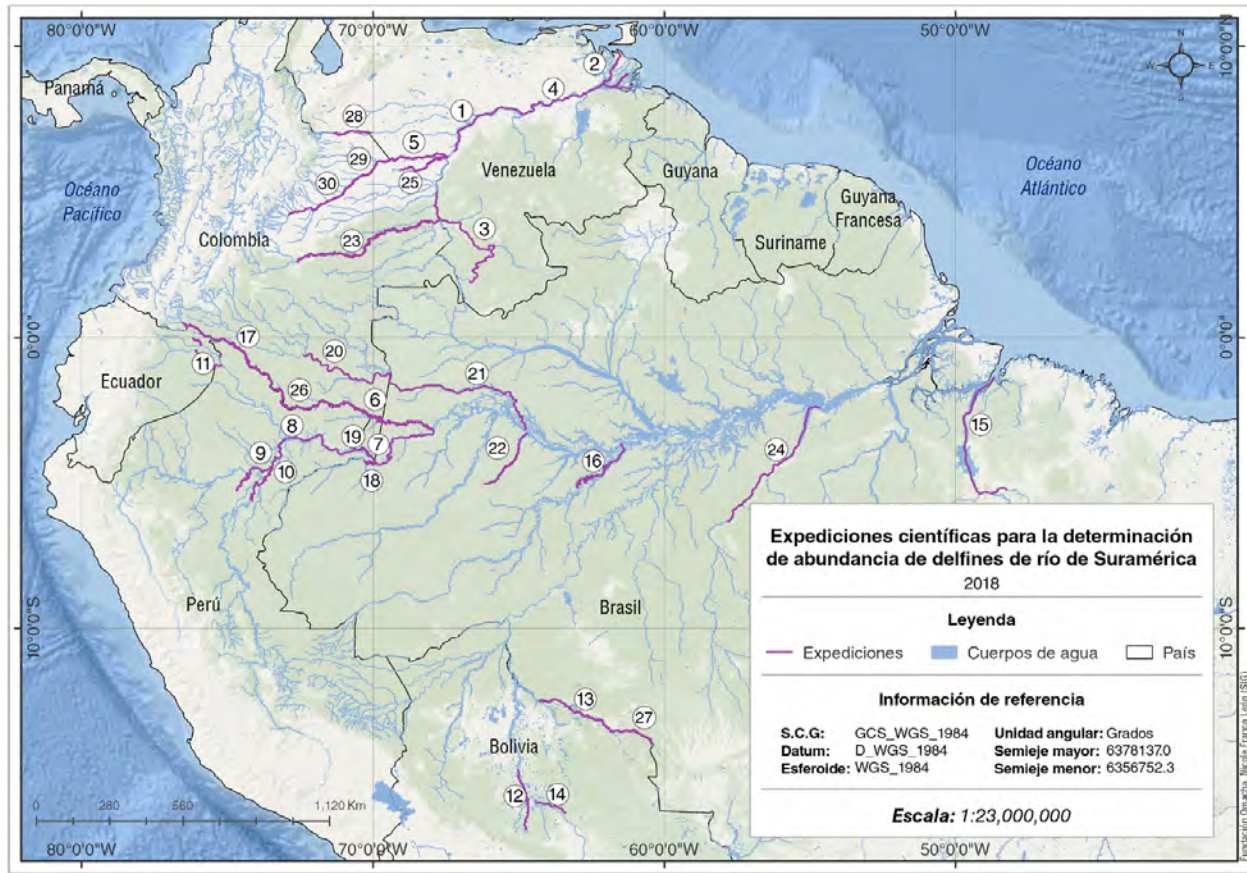
y Brasil, y los esfuerzos de trabajo aportaban información importante, pero en una escala geográfica limitada. Por esa razón, a partir del 2001 se promovió desde Colombia la consolidación de un programa de estimación de la abundancia de delfines de río. El objetivo de esta iniciativa fue el de estandarizar el proceso metodológico para la estimación de la población de estos cetáceos de manera que fuera replicable, y que la información recolectada en diferentes localidades fuera comparable. A lo largo de estos años se han realizado 30 expediciones científicas en seis países, con lo cual se ha logrado incrementar de manera significativa el conocimiento acerca de los tamaños poblacionales de los delfines de río en Suramérica (Gómez, *et al.*, 2011; Williams, *et al.*, 2016). Esta información fue fundamental para la construcción de los rangos poblacionales como criterio para la determinación del estado de las condiciones ecológicas de los ecosistemas acuáticos evaluados en las cuencas del Amazonas, el Orinoco y el Tocantins.

## Materiales y métodos

**Área de estudio.** Se hicieron 30 estimaciones poblacionales de delfines de río en ecosistemas acuáticos asociados con las cuencas del Amazonas, el Orinoco y el Tocantins en Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Brasil y Venezuela, entre los años 2006 y 2018. Los sistemas acuáticos evaluados en la cuenca del Amazonas fueron los ríos Amazonas, Putumayo, Napo, Maraón, Ucayali, Cuyabeno, Yasuní, Lagartococha, Mamoré, Iténez-Guaporé, Grande, Madeira, Javari, Loretoyacu, Caquetá-Japurá, Purús, y Tapajos; en la cuenca del Orinoco se evaluaron los ríos Orinoco (Casiquiare, Medio y Delta), Meta, Guaviare, Bitá, Arauca, Guayabero y Losada, y el río Tocantins (Figura 1).

**Fase de campo.** Las excursiones para la estimación poblacional se hicieron en embarcaciones de 14 a 43 metros de eslora con plataformas de observación que oscilaban entre los 2 y los 6 metros de altura. La variación se basó en el tamaño del río muestreado y su navegabilidad. Para estandarizar los muestreos, estos se realizaron durante los periodos climáticos de aguas en ascenso o descenso, lo que permitía cubrir diferentes tipos de hábitats. Se descartó el monitoreo en aguas bajas debido a que las playas y bajos no permitían la navegación de la embarcación ni el acceso a tributarios y lagunas. Asimismo, se descartó el periodo de mayor inundación, ya que cientos de kilómetros de selva se inundan, y los delfines ingresan allí haciendo muy difícil su detección en el canal principal.

Los hábitats se estratificaron para generar un reporte de densidad diferencial y con un sustento ecológico. Los hábitats considerados fueron: río principal, tributarios, lagunas, islas, canales y confluencias, según la definición y tipificación de Trujillo, *et al.* (2011). El muestreo se diseñó combinando transectos en banda (paralelos a las orillas) y lineales (atravesando diagonalmente el río) según la metodología desarrollada por Gómez, *et al.* (2011; 2012) y Williams, *et al.* (2015). La velocidad de desplazamiento estuvo en el rango de 8 a 12 km/hora y el muestreo se hizo entre las 5:30 y las 17:30 horas.



**Figura 1.** Expediciones científicas para la determinación de la abundancia de delfines de río en Suramérica. Los ríos se señalaron con la siguiente numeración: 1. Orinoco (Medio), 2. Orinoco (Delta), 3. Orinoco (Casiquiare), 4. Orinoco (Venezuela), 5. Meta (Colombia), 6. Putumayo (Colombia), 7. Amazonas (Colombia), 8. Napo (Perú), 9. Maraón (Perú), 10. Ucayali (Perú), 11. Napo, Cuyabeno, Yasuní y Lagartococha (Ecuador), 12. Mamoré (Bolivia), 13. Iténez-Guaporé (Bolivia, Brasil), 14. Grande (Bolivia), 15. Tocantins (Brasil), 16. Madeira (Brasil), 17. Putumayo (Colombia), 18. Javari (Brasil), 19. Loretoyacu (Colombia), 20. Caquetá-Japurá (Colombia, Brasil), 21. Caquetá-Japurá (Colombia, Brasil), 22. Purús (Brasil), 23. Guaviare (Colombia), 24. Tapajos (Brasil), 25. Bitá (Colombia), 26. Putumayo (Colombia), 27. Iténez-Guaporé (Bolivia, Brasil), 28. Arauca (Colombia), 29. Meta (Colombia), y 30. Guayabero y Losada (Colombia).

La longitud de las transectos en banda se estandarizó en 2,5 km en tanto que los lineales oscilaron entre 1 y 2,5 km según el ancho del río. Los transectos tuvieron un ancho de banda (*w*) de 200 metros. En las embarcaciones se instalaron dos plataformas de observación, una en proa y otra en popa, con seis investigadores a cargo de la detección de los delfines y de su registro. Todos los observadores recibieron capacitación previamente y asistencia durante las expediciones. Las posiciones de los investigadores se rotaban cada dos horas en el sentido de las manecillas del reloj. Cada una de las plataformas se consideró independiente, y solo el anotador de esfuerzo conocía las diferentes observaciones de cada plataforma y las registraba con códigos de asignación.

En cada observación se tomó el ángulo de la observación usando un compás, y se estimó la distancia al delfín. Igualmente, para cada observación se anotó la especie (*Inia* o *Sotalia*), la distancia a la orilla (en rangos de 0-50 m, 50-100 m, 100-150 m y 150-200 m), y el tipo de orilla (tierra

firme, selva inundada, arbustos, playa, barranco, rocas, asentamientos humanos, pasto flotante). Además, se registraron las coordenadas geográficas de cada observación usando un GPS Garmin® de referencia 64sc, así como las condiciones ambientales como el brillo solar, el estado del río, el tipo de río (aguas negras, blancas o mixtas, según criterios limnológicos).

**Estimaciones de densidad y tamaño poblacional.** Se calculó la densidad de cada especie, inicialmente en los transectos lineales, usando el programa Distance, versiones 5.0 y 6.0 (Buckland, *et al.*, 2001, Thomas, *et al.*, 2010) y la siguiente fórmula:

$$D = \frac{nE(i)f(0)}{2Lg(0)}$$

donde *n* es el número de grupos de delfines observados, *E(i)* es la media grupal observada en el hábitat tipo (*i*), *f(0)* es la probabilidad de detección de densidad a una distancia perpendicular 0, *L* es la longitud del transecto, y *g(0)*, la probabilidad de detección de un grupo en la línea de transecto.

Para  $g(0)$  se siguieron las asunciones propuestas por **Gómez, et al.**, (2011), al igual que el cálculo de la varianza. Para la función de detección, se analizaron tres modelos diferentes con el programa Distance: el uniforme, el medio normal (*half-normal*) y el de índice de riesgo, seleccionados siguiendo el criterio de información de Akaike (*Akaike's information criterion*, AIC).

Teniendo en cuenta que se encontró un patrón de gradiente de densidad con respecto a la orilla, con más delfines cerca de esta y menos hacia el centro del río, se calculó la probabilidad de detección  $g(0)$  de manera escalada usando los rangos de distancia (0-50 m, 50-100 m, 100-150 m y 150-200 m).

El tamaño de la población de delfines de río ( $N_i$ ) para cada hábitat se calculó con la ecuación  $N_i = A_i D_i$ .

Para construir mapas que mostraran la heterogeneidad de la abundancia de los delfines en las subcuencas hidrográficas, se construyeron rangos de amplitud (alto, medio y bajo) para los tamaños poblacionales calculados con las siguientes ecuaciones:

$$K=1+3.2222 (\log 10(n)),$$

donde K es el número de intervalos de clase (k), y

$$W= (\text{Valor máximo}-\text{Valor mínimo})/K,$$

donde W es el rango de amplitud.

Cada rango se calculó para todas las dos especies y por subcuenca.

**Especialización cartográfica de la información.** Las salidas gráficas se construyeron empleando el programa ArcGIS 10.2.2 (**Environmental Systems Research Institute, ESRI, 2014**), se usaron conjuntos de datos georreferenciados (vector y ráster) a varias escalas, incluidas las redes fluviales, los límites de la cuenca, las direcciones de drenaje y las acumulaciones de flujo proporcionados por la plataforma HydroSHEDS (**U.S. Geological Service, USGS, 2018**). La base de datos de hidroeléctricas en Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela se construyó siguiendo la propuesta de **Latrubesse, et al.**, (2017) y **Anderson, et al.**, (2018).

## Resultados

**Estimaciones de densidad y tamaño poblacional.** En total se han llevado a cabo 30 expediciones científicas en seis países cubriendo las cuencas del Amazonas, el Orinoco y el Tocantins. En la cuenca Amazónica se muestrearon 19 ríos, en la del Orinoco, seis y en el Tocantins, uno. En total se cubrieron 28.760 km.

En general, las densidades más bajas se reportaron para los ríos ecuatorianos de la cuenca del Amazonas (*Inia*: 0,2 ind/km y *Sotalia*: 0,07 ind/km). En segundo lugar, sobresalió el río Bitá (*Inia*: 0,06 ind/km). Una situación similar ocurre en el río Tocantins, donde se reporta solo la presencia de *I. araguaensis*, con valores bajos (0,93 ind/km). Por otro lado, los ríos con mayores densidades corresponden al

Purús en Brasil (6,7 ind/km), Samiria en Perú (5,94 ind/km) e Iténez entre Bolivia y Brasil (8,1 ind/km). Uno de los países mejor muestreado hasta la fecha es Colombia, donde se han evaluado los ríos Arauca, Meta, Guayabero, Losada, Bitá, Guaviare, Caquetá, Putumayo y Amazonas (Tablas 1 y 2).

Los tamaños poblacionales más bajos para el género *Inia* se han reportado en los ríos ecuatorianos Napo, Cocayá y Tiputini de la cuenca del Amazonas. En segundo lugar se encuentra el río Bitá, en la cuenca del Orinoco colombiano. Una situación similar ocurre en el río Tocantins, donde se reporta solo la presencia de la especie recientemente descrita *I. araguaensis*. Por otro lado, los ríos con mayores tamaños poblacionales para *I. g. geoffrensis* fueron Purús y Tapajos (Brasil), Amazonas, Loretoyacú, y Javará (Colombia), y Samiria y Maraón (Perú), y para *I. boliviensis* los ríos Iténez (Bolivia/Brasil) y Mamoré (Bolivia). En el caso del género *Sotalia*, los ríos con mayores tamaños poblacionales de la especie fluvial (*S. fluviatilis*) fueron el Purús y el Tapajos (Brasil), el Amazonas, el Loretoyacú y el Javará (Colombia), y el Samiria y el Maraón (Perú), y para el morfotipo costero (*Sotalia* sp.) fue el delta del río Orinoco (Tabla 3).

**Especialización cartográfica de la información.** Los tamaños poblacionales calculados para las especies y subespecies del género *Inia* se categorizaron por rangos para cada una de las cuencas evaluadas y espacializadas en salidas gráficas. Se obtuvieron valores bajos para los ríos Guaviare y Orinoco (Casiquiare) en la cuenca del río Orinoco; Putumayo, Caquetá, Napo, Grande e Iténez en la cuenca del Amazonas, y el río Tocantins. Se registraron valores medios en el delta del río Orinoco, en los ríos Meta y Arauca en la cuenca del Orinoco, y en los ríos Maraón, Ucayali y Mamoré en la cuenca del Amazonas. Por último, se reportaron valores altos en la cuenca media del Orinoco, y en los ríos Purús, Tapajos e Iténez en la cuenca del Amazonas (Figura 2).

Se obtuvieron valores bajos para *Sotalia fluviatilis* en los ríos Putumayo/Iça y Napo en la cuenca del Amazonas y en la cuenca baja del río Tocantins. Se registraron valores medios para *Sotalia* sp. en la cuenca media y en el delta del río Orinoco y para *S. fluviatilis* en los ríos Caquetá/Japurá y Curaray en la cuenca del Amazonas. Por último, se reportaron valores altos en los ríos Maraón, Ucayali y Purús en la cuenca del Amazonas (Figura 3).

## Discusión

**Estimaciones de densidad y tamaño poblacional.** La iniciativa suramericana para la estimación poblacional de delfines de río es, hasta el momento, la más completa y la de mayor cubrimiento geográfico para delfines de río a nivel global. Los resultados coinciden con lo expuesto por **Gómez, et al.**, (2011; 2012; 2012a); **Mosquera-Guerra, et al.**, (2015) y **Pavanato, et al.**, (2016), en cuanto a: i) el hallazgo de valores heterogéneos en la densidad de individuos por tipo de hábitat; ii) los tamaños poblacionales por cuenca, y iii) los rangos de distribución longitudinales, latitudinales

**Tabla 1.** Densidades estimadas (*D*) para las especies del género *Inia* en los ecosistemas acuáticos evaluados para cada tipo de hábitat utilizando transectos de ancho de banda de 200 m. No se obtuvo información en campo (espacios en blanco) para algunas categorías.

Cuenca	Ríos	Año	Tipos de hábitats					
			Río principal	Tributario	Canal	Islas	Lagunas	Confluencias
			<i>D</i> (ind/km)	<i>D</i> (ind/km)	<i>D</i> (ind/km)	<i>D</i> (ind/km)	<i>D</i> (ind/km)	<i>D</i> (ind/km)
<b><i>Inia boliviensis</i></b>								
Amazonas	Bolivia (Iténez)	2007		3,21	2,94		8,1	
	Bolivia (Mamoré)	2007	3,52					
	Bolivia (Grande)	2011		2,4	5,6		8,1	6,5
	Bolivia (Iténez)	2017	0,7					0,6
	<b><i>Inia g. geoffrensis</i></b>							
	Colombia (Amazonas, Loretoyacú y Javarí)	2007	1,82	3,77	2,58	1,91	18,4	12,8
	Colombia (Putumayo)	2017	0,3	1	0,7	0,6		0,8
	Ecuador (Napo, Cuyabeno, Yasuní y Lagartococha)	2006		2,78			0,56	2,87
	Ecuador (Napo)	2017	1,85					
	Ecuador (Cocayá)	2017		1,41				
	Ecuador (Tiputini)	2017		1,06				
	Ecuador (Yasuní)	2017		1,51				
	Perú (Samiria y Marañón)	2006	2,72	5,94	4,92			4,22
	Perú (Confluencia Napo-Santa Rosa)	2015	1,18	1,96	1,21	2,25	3,47	10,83
	Brasil (Purús)	2012	3,7	6,7	4,8	1,6	3,02	3,5
	Brasil-Colombia (Japurá-Caquetá, Solimoes)	2014	1,26	1,96	1,47	1	3,31	2,2
	Brasil (Tapajos)	2014	0,87	2,59	1,85	5,7		
	<b><i>Inia araguaiaensis</i></b>							
Brasil (Tocantins)	2014	0,93		1,86	0,7			
<b><i>Inia g humboldtiana</i></b>								
Orinoco	Colombia (Meta)	2008	0,57		1,96	0,6		9,29
	Colombia (Guaviare)	2016	0,7	0,45				6,3
	Colombia (Guayabero/Losada)	2016	0,89		0,38			0,58
	Colombia (Arauca)	2017	2,6					8,3
	Colombia (Bita)	2016		0,56				7
	Venezuela (Orinoco/ Medio)	2013	1,14		0,28	1,3		9,96
	Venezuela (Orinoco/Delta)	2006	0,6	1,2	0,8			0,6
	Venezuela (Orinoco/Casiquiare)	2013	0,03					



(planos de inundación) y altitudinales para estos cetáceos en los ecosistemas acuáticos evaluados en la Amazonia y la Orinoquia, y para cada una de las especies existentes.

Se comprobó la importancia de los niveles de productividad de los sistemas para los valores de densidad y tamaño poblacional que aquí se reportan. Un ejemplo de esta condición son los valores de densidades y tamaños poblacionales más bajos para *Inia* y *Sotalia* reportados en los ríos Cuyabeno, Aguarico, Yasuní, Cocaya y Tiputini en Ecuador, los cuales corresponden limnológicamente a ríos de aguas negras, y donde no existen pesquerías de carácter comercial debido a la baja biomasa de peces. En contraste, en los ríos de aguas blancas como el Iténez (Bolivia/Brasil) y Purús (Brasil), los valores de densidad fueron altos, lo que indica la calidad del hábitat y la disponibilidad de presas necesarios para albergar el alto número de delfines registrado.

En las tres cuencas se resalta la presencia de áreas protegidas y la baja actividad humana, especialmente la pesca (Saunders, et al., 2002; Gómez, et al., 2011), aspecto que explicaría parcialmente los mayores valores de densidad de individuos reportados en algunas cuencas como la del Purús, Samiria e Iténez. Las densidades más altas registradas fueron las de *I. g. geoffrensis* (hasta 18 delfines / km<sup>2</sup>

en canales de los planos de inundación) en la Reserva de Desarrollo Sustentable Mamiragua en Brasil (Martin & da Silva, 2004), que es una de las áreas protegidas de mayor extensión en la Amazonia (Pires, 2006). Ello sugiere que las mayores densidades y tamaños poblacionales de delfines de río parecen encontrarse en las áreas protegidas con ecosistemas acuáticos bien administrados (Gómez, et al., 2011).

A escala regional, se sugiere que los hábitats esenciales para los delfines de río se encuentran dentro de los 200 m de las riberas, como ocurre con las confluencias y hábitats lacustres (complejo de humedales), donde se concentran los peces (Vidal, et al., 1997, Trujillo, 2000; Trujillo, et al., 2016; Martin & da Silva, 2004; Gómez, et al., 2011; 2012; Mosquera-Guerra, et al., 2015), lugares estos compartidos con los pescadores donde, generalmente, los delfines de río se ven atrapados en redes. Situaciones similares han sido reportadas por Smith, et al., (2006) en el río Ganges, donde los delfines de río (*Platanista gangetica*) ocupan preferentemente estas áreas de ribera.

Corroboramos los resultados de investigaciones previas de nuestro grupo y de otros investigadores en las cuales se señala que los valores de densidad de los depredadores tope disminuyen con el aumento de los factores de estrés

**Tabla 2.** Densidades estimadas (*D*) para las especies del género *Sotalia* en los ecosistemas acuáticos evaluados para cada tipo de hábitat (río principal, tributario, canal, islas, lagunas, confluencias), utilizando transectos de ancho de banda de 200 m. No se obtuvo información en campo (espacios en blanco) para algunas categorías.

Cuenca	Ríos	Año	Tipos de hábitats					
			Río principal	Tributario	Canal	Islas	Lagunas	Confluencias
			D (ind/km)	D (ind/km)	D (ind/km)	D (ind/km)	D (ind/km)	D (ind/km)
<b><i>Sotalia fluviatilis</i></b>								
Amazonas	Colombia (Amazonas, Loretoyacú y Javari)	2007	3,35	4,21	5,1	1,74	12,32	28,14
	Colombia (Putumayo)	2017	0,1	0,9	0,6	0,5		0,6
	Ecuador (Napo, Cuyabeno, Yasuní y Lagartococha)	2006		0,28				1,97
	Perú (Samiria y Maraón )	2006	4,87	6,08	3,09	2,1		8,69
	Perú (Confluencia Napo-Santa Rosa)	2015	2,1	1,2	1,28			3,8
	Brasil (Purús)	2012						
	Brasil-Colombia (Japurá-Caquetá, Solimoes)	2014						
	Brasil (Tapajos)	2014	0,85		1,57	1,63		
<b><i>Sotalia sp.</i></b>								
Orinoco	Venezuela (Orinoco/Medio)	2006	1,06					1,41

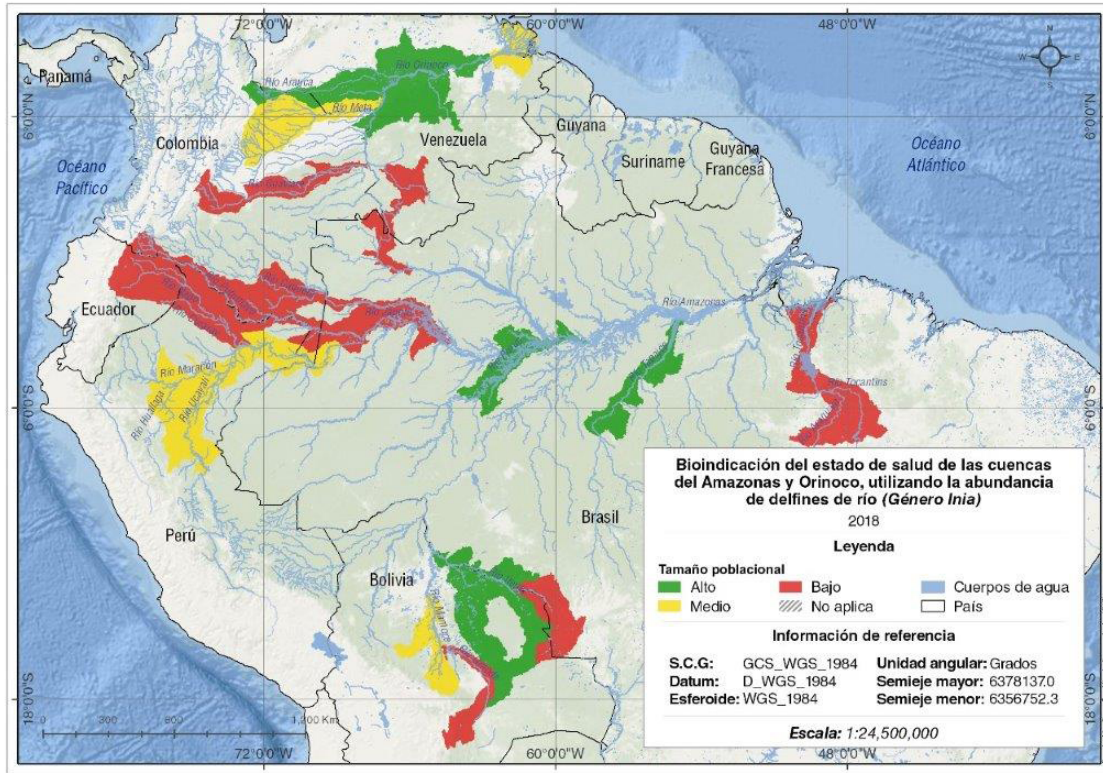
de origen humano, aunque con ciertas evidencias de resiliencia y plasticidad en el caso de los delfines (Sandin, *et al.*, 2008; Baum & Worm, 2009; Gómez, *et al.*, 2012; Mosquera-Guerra, *et al.*, 2015a). Para el caso de los delfines de río suramericanos, Trujillo, *et al.*, (2010a) han reportado tensores de origen antrópico que influyen los parámetros poblacionales, tales como la degradación de los hábitats por pérdida de la conectividad, la contaminación,

las interacciones negativas con pesquerías, el incremento en el tráfico de embarcaciones, el cambio climático y la construcción de infraestructura hidroeléctrica.

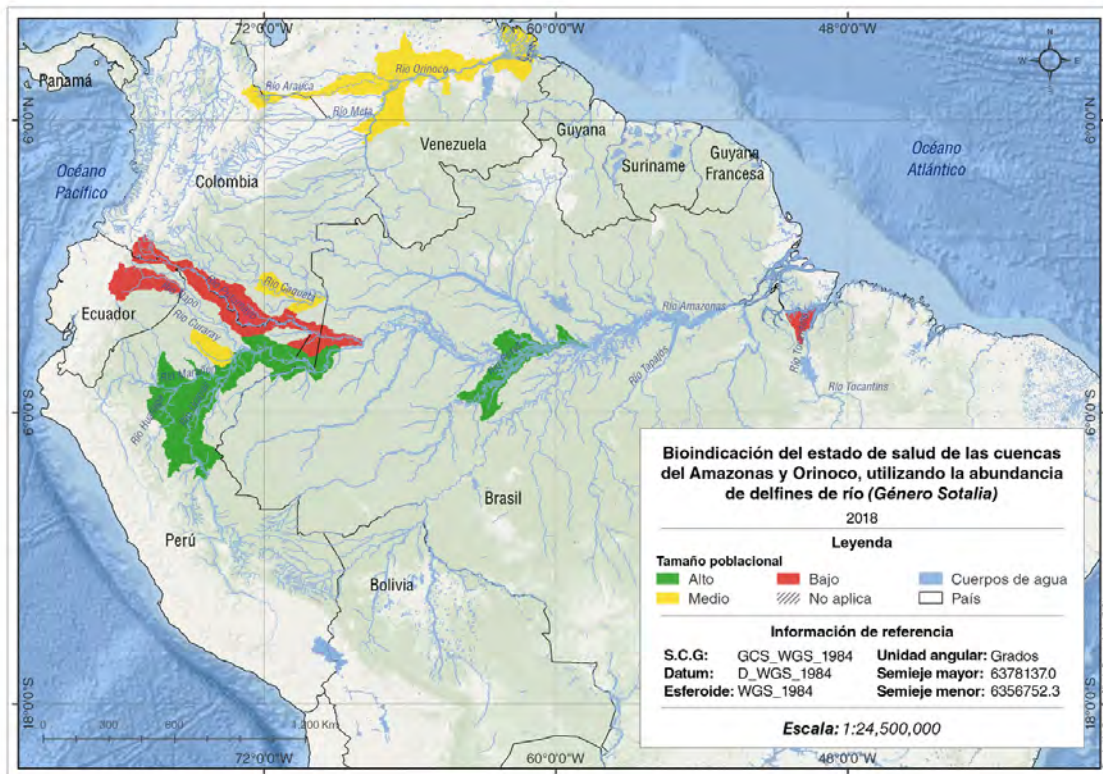
Trujillo, *et al.*, (2011); Gómez, *et al.*, 2012a y Mosquera-Guerra, *et al.*, (2015a) reportaron, además, que las variaciones en los valores de la densidad, el tamaño de grupo y la población de los delfines de río, se relacionaban con factores ecológicos en las cuencas como los pulsos de

**Tabla 3.** Tamaños poblacionales para las especies de los géneros *Inia* y *Sotalia* en los ecosistemas acuáticos estudiados asociados con las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco. Abreviaturas: (a) Gómez, *et al.*, 2012; (b) Pavanato, *et al.*, *en prensa*; (c) Mosquera-Guerra, *et al.*, 2015d; (d) Mosquera-Guerra, *et al.*, 2015a y (e) Pavanato, *et al.*, 2016.

Cuenca	País	Año	Tamaño de la población					
			<i>I. g. geoffrensis</i>	<i>I. g. humboldtiana</i>	<i>I. boliviensis</i>	<i>I. araguaiaensis</i>	<i>S. fluviatilis</i>	<i>Sotalia sp.</i>
Amazonas	Bolivia (Iténez)	2007			3201 (0,40) a			
	Bolivia (Mamoré)	2007			1369 (1,14) a			
	Bolivia (Grande)	2011			523 (0,05)			
	Bolivia (Iténez)	2017			291(0,5)			
	Colombia (Amazonas, Loretoyacú y Javari)	2007	1,115 (0,78)a				1,545 (0,61)a	
	Colombia (Putumayo)	2017	546 (0,22)				241(0,1)	
	Ecuador (Napo, Cuyabeno, Yasuni y Lagartococha)	2006	147 (1,38)a				19 (1,37) a	
	Ecuador (Napo)	2017	14 (1,1)					
	Ecuador (Cocayá)	2017	8 (1,3)				12 (1,6)	
	Ecuador (Tiputini)	2017	6(1,2)					
	Ecuador (Yasuni)	2017	9 (1,4)					
	Perú (Samiria y Marañón)	2006	917 (0,34)a				1.319 (0,43)a	
	Perú (Confluencia Napo-Santa Rosa)	2015	429(0,93)				726(1,79)	
	Brasil (Purús)	2012	2.241 (2,7)				1.672 (2,23)	
	Brasil-Colombia (Japurá-Caquetá, Solimoes)	2014	503 b y c				666 b	
Brasil (Tapajos)	2015	1.815 (0,4) e						
Tocantins	Brasil (Tocantins)	2014				363 (1,45)	240 (3,58)	
Orinoco	Colombia (Meta)	2008		1.016 (0,85) a				
	Colombia (Guaviare)	2016		370 (1,6) d				
	Colombia (Guayabero/Losada)	2016		15 (1,9) d				
	Colombia (Arauca)	2017		400 (0,1)				
	Colombia (Bita)			27 (0,3)				
	Venezuela (Orinoco/Casiquiare)	2013		188				
	Venezuela (Orinoco/ Medio)	2013		1.779 (0,87) a				
	Venezuela (Orinoco/Delta)	2006		894 (1,89)				881(1,56)
<b>Total</b>			7.750	4.689	5.384	363	6.440	881



**Figura 2.** Bioindicación del estado de salud de las cuencas del Amazonas y el Orinoco utilizando los tamaños poblacionales de delfines de río del género *Inia*



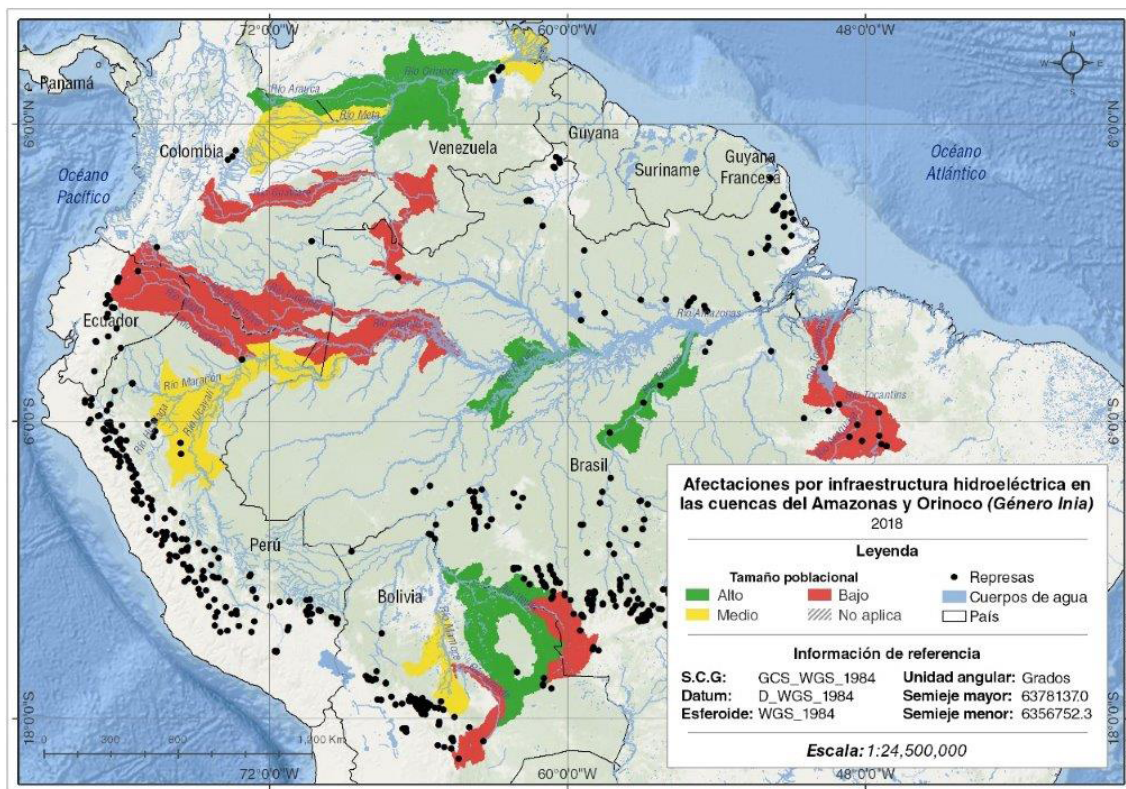
**Figura 3.** Bioindicación del estado de salud de las cuencas del Amazonas y Orinoco utilizando los tamaños poblacionales de delfines de río del género *Sotalia*

inundación, lo que obliga a los delfines en aguas bajas a concentrarse en los canales principales y a dispersarse en aguas altas en aquellos ambientes acuáticos asociados al bosque inundando a donde se desplazan detrás de los peces.

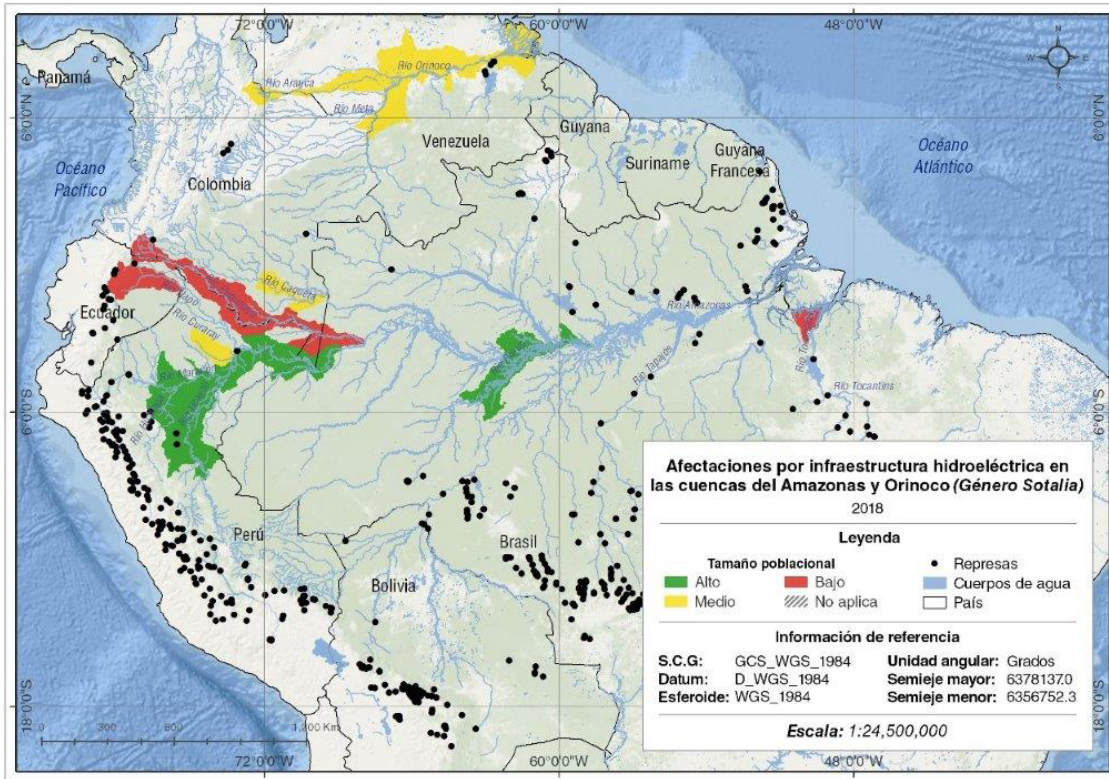
**Espacialización cartográfica de la información.** Gómez, *et al.*, (2012a) discuten sobre las múltiples ventajas que presenta el uso de las especies de delfines de río como indicadores del grado de degradación de los ecosistemas acuáticos donde habitan, e incluyeron los siguientes elementos de importancia en su condición bioindicadora: (1) los delfines de río se distribuyen en todos los tipos de hábitats de las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco, con excepción de los rápidos y las áreas con ecosistemas muy degradados (por ejemplo, el río Napo); (2) los delfines de río son relativamente fáciles de observar en un ecosistema donde la mayoría de las especies se encuentran bajo aguas de gran turbidez; (3) las evaluaciones de los delfines de río son relativamente fáciles de realizar y se requiere un menor procesamiento de las muestras que en el caso de otros indicadores potenciales como los macroinvertebrados acuáticos y las algas; (4) los delfines de río tienen una larga vida y, por lo tanto, permiten evaluar los riesgos a largo plazo de la degradación de los ecosistemas acuáticos; (5) los delfines de río pueden actuar como especies centinela al proporcionar advertencias tempranas sobre los aumentos actuales o futuros en la degradación del ecosistema debidos a la bioacumulación de metales

pesados como el mercurio (Hg), según lo reportado en las investigaciones de Rosas & Kesä, (1996); Mosquera-Guerra, *et al.*, (2015b) y Mosquera-Guerra, *et al.*, (2018a), y, por último, (6) los delfines de río son mamíferos carismáticos, por lo tanto, pueden emplearse como especies emblemáticas para aumentar la conciencia pública sobre temas de conservación y manejo de los ecosistemas acuáticos (Sergio, *et al.*, 2008). Todas estas ventajas, hacen que un análisis espacial a escala regional de las cuencas permita evidenciar áreas en buenas condiciones de conservación y otras con amenazas concretas que merecen ser evaluadas y abordadas, así como asociar bases de datos a sistemas de información geográfica que puedan ser actualizadas de manera permanente.

La bioindicación de las cuencas hidrográficas empleando los tamaños poblacionales para especies de los géneros *Inia* y *Sotalia* (Figuras 4 y 5), evidencia los fuertes procesos de degradación en el río Guaviare y en el brazo Casiquiare en la cuenca del Orinoco, en los ríos Caquetá/Japurá, Putumayo/Iça, Napo, Grande, en la cuenca alta del Iténez y en la cuenca del río Tocantins. Estos resultados coinciden con lo expuesto por Trujillo, *et al.*, (2010) y Mosquera-Guerra, *et al.*, (2018) en cuanto a la presencia de intensos procesos de deforestación, de minería aurífera y de pesca excesiva, y en la cuenca alta de los ríos Iténez y Tocantins, además, el establecimiento de hidroeléctricas (Latrubesse, *et al.*,



**Figura 4.** Infraestructura hidroeléctrica y bioindicación de los ecosistemas acuáticos empleando los tamaños poblacionales de las especies del género *Inia* en las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco



**Figura 5.** Infraestructura hidroeléctrica y bioindicación de los ecosistemas acuáticos empleando los tamaños poblacionales de las especies del género *Sotalia* en las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco

2017; Anderson, *et al.*, 2018; Mosquera-Guerra, *et al.*, 2018). Este tipo transformación de los ecosistemas acuáticos heterogéneos y complejos, especialmente en la Amazonia y la cuenca del Tocantins, como resultado de la construcción de más de un centenar de centrales hidroeléctricas provoca la homogeneización ecológica de estos sistemas, cambios en los pulsos de inundación aguas debajo de las represas, así como la retención de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, que limitan la productividad primaria en redes tróficas acuáticas (Forsberg, *et al.*, 2017; Latrubesse, *et al.*, 2017; Anderson, *et al.*, 2018; Mosquera-Guerra, *et al.*, 2018b). La presencia de este tipo de infraestructura también genera pérdidas significativas en la conectividad fluvial en cuencas como la del Amazonas, donde se presenta la mayor diversidad de delfines de río y peces del planeta (Mosquera-Guerra *et al.*, 2015; Anderson *et al.*, 2018). Estos tensores han causado la transformación de extensas áreas ocupadas por los delfines de río en Suramérica. Araujo & Wang, (2014) señalaron los efectos que tendría en la población de la especie recientemente descrita *I. araguaiaensis* (Hrbek, *et al.*, 2014), la presencia de siete proyectos hidroeléctricos, entre estos la hidroeléctrica de Tucuruí, los cuales transformarían el 54,9% de su área de distribución y restringirían los movimientos de la especie a tramos entre estos proyectos (Mosquera-Guerra, *et al.*, 2018). Por otra parte, las especies *I. boliviensis*, *I.g. geoffrensis* y *Sotalia*

*fluviatilis* se verían afectadas por tres nuevas hidroeléctricas en los ríos Maraón, Madeira y Ucayali.

La reducción del sedimento ha sido otro efecto negativo que se ha venido agudizando en las macrocuencas, según Forsberg, *et al.*, (2017), quienes predicen que al entrar en operación las presas de Rositas, Angosto Del Bala, Inambari, Tam 40, Pongo De Aguierre y Pongo De Monseriche, se reducirá el suministro de sedimento en un 69 %, el de fósforo en un 67 % y el de nitrógeno en 57 %, en tanto que en la región Andina y en toda la cuenca del Amazonas, las reducciones serán de 64, 51 y 23 %, respectivamente. Dichas reducciones tendrán un impacto también en la geomorfología de los canales, la fertilidad de los planos de inundación y la productividad acuática (Latrubesse, *et al.*, 2017). La eventual reducción de los niveles de biomasa en estos sistemas podría exacerbar los conflictos entre los delfines de río y las pesquerías artesanales y comerciales debido a la disminución de los recursos pesqueros en el Amazonas.

Por último, se reportan valores de bioindicación diferentes de los géneros *Inia* y *Sotalia* en los ecosistemas acuáticos del Amazonas colombiano, el peruano y el brasilero, resultados que probablemente se deban a las capturas dirigidas de la especie *I.g.geoffrensis*, utilizada como atrayente en las pesquerías de *Calophysus macropterus* (mota, simí, piracathinga) (Trujillo, *et al.*, 2010; Mosquera-Guerra, *et al.*, 2015c).

## Conclusiones

El proceso de estandarización del protocolo metodológico para la estimación poblacional de delfines ha tenido elementos positivos a lo largo de su construcción, como la realimentación entre investigadores, la cual ha resultado en sugerencias valiosas que lo han consolidado. En este sentido, es importante reconocer que en el futuro pueden hacerse otros ajustes, especialmente por la posibilidad de usar herramientas que mejoren los conteos, por ejemplo, la que ya se está implementando con drones, especialmente en zonas de confluencias y lagunas, donde la transparencia del agua permite contar de manera más precisa el número de delfines avistados y ajustar, así, el coeficiente de detección de los observadores.

El programa de conservación de delfines de agua dulce en Suramérica ha mostrado ser una herramienta contundente de manejo al incorporar la estimación poblacional, la capacitación y la creación de redes de trabajo, así como la construcción y la implementación de planes de manejo, y la articulación de la academia, las ONG y los gobiernos de la región.

Uno de los resultados concretos de la información recolectada durante los últimos 12 años fue la revisión de la categoría de amenaza de *Inia geoffrensis* por parte de la IUCN, que la modificó de “Datos deficientes” (DD) a “En peligro” (EN).

Por último, se corroboró la utilidad de los delfines de río como especies indicadoras y centinelas del estado de salud de los ecosistemas acuáticos en los cuales se distribuyen, y su uso potencial como valores objeto de conservación de las áreas protegidas de la Amazonia y la Orinoquia.

## Agradecimientos

Esta iniciativa no habría sido posible sin el apoyo y liderazgo de la Fundación Omacha, del *World Wildlife Fund*, el *Whitley Fund for Nature*, *Whale and Dolphin Conservation*, *National Geographic*, el Instituto Alexander von Humboldt, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, la *Wildlife Conservation Society* en Ecuador, Perú y Bolivia, Faunagua, Solinia, la Fundación La Salle de Venezuela, de Colciencias a través de la “Beca Doctorados Nacionales Convocatoria 785”, y de las comunidades locales. Debemos especial agradecimiento a Victor Utreras, Mariana Escobar, Paul Van Damme, Cedric Gillman, Enrique Crespo y Marcela Portocarrero, así como a la dedicación de Catalina Gómez-Salazar, Mariana Fariás, Heloise Pavanato, Miriam Marmontel, Saulo Usma y Marcelo Oliveira, entre otros.

## Contribución de los autores

Fernando Trujillo-González: análisis de la información, organización de las bases de datos y generación de la cartografía; Federico Mosquera-Guerra: diseño metodológico, trabajo de campo y análisis de la información; Nicole Franco: trabajo de campo y análisis de la información.

## Conflicto de intereses

No tenemos conflictos de intereses para reportar.

## Referencias

- Anderson, E. P., Jenkins, C. N., Heilpern, S., Maldonado-Ocampo, J. A., Carvajal-Vallejos, F. M., Encalada, A. C., Rivadeneira, J. F., Hidalgo, M., Cañas, C. M., Ortega, H., Salcedo, N., Maldonado, M. (2018). Tedesco, Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydro-power dams. *Sci. Adv.* 4, eaao1642.
- Araujo, C & Wang, J. (2014). The dammed river dolphins of Brazil: impacts and conservation. *Fauna & Flora International*, *Oryx* 49 (1): 17-24. Doi: 10.1017/S0030605314000362
- Baum, J.K. & Worm, B. (2009). Cascading top-down effects of changing oceanic predator abundances. *J. Anim. Ecol.* 78: 699-714.
- Buckland, S.T., D.R. Anderson, Burnham, K.P., Laake, J.L. (2001). Introduction to Distance sampling: Estimating abundance of biological populations. Oxford University Press, New York, NY.
- Caballero, S., Trujillo, F., Vianna, J.A., Barrios-Garrido, H., Montiel, M.G., Beltran-Pedrerros, S., Marmontel, M., Santos, M.C.O., Rossi-Santos, M.R., Santos, F.R., Baker, C.S. (2007). Taxonomic status of the genus *Sotalia*: Species level ranking for “tucuxi” (*Sotalia fluviatilis*) and “costero” (*Sotalia guianensis*) dolphins. *Marine Mammal Science*. 23 (2): 358-386.
- da Silva, V., Trujillo, F., Martin, A., Zerbini, A.N., Crespo, E., Aliaga-Rossel, E. & Reeves, R. (2018). *Inia geoffrensis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T10831A50358152. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T10831A50358152.en>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2014). ArcGIS Desktop: Release 10.2.x. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- Forsberg, B.R., Melack, J.M., Dunne, T., Barthem, R.B., Goulding, M., Paiva, R.C.D., et al. (2017). The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. *PLoS ONE* 12(8): e0182254. Doi: 10.1371/journal.pone.0182254
- Gómez-Salazar, C., Trujillo, F., Whitehead, H. (2011). Population size estimates of pink river dolphins (*Inia geoffrensis*) using mark-recapture methods on photo-identification. *Latin American Journal of Aquatic Mammals*. 9 (6): 40-47.
- Gómez, C., Trujillo, F., Portocarrero-Aya, Whitehead H. (2012). Population, density estimates, and conservation of river dolphins (*Inia* and *Sotalia*) in the Amazon and Orinoco river basins. *Marine Mammal Science*. 28 (1): 124-153.
- Gómez-Salazar C., Coll, M., Whitehead, H. (2012a). River dolphins as indicators of ecosystem degradation in large tropical rivers. *Ecol. Ind.* 23 (1):19-26.
- Gravena, W., da Silva V.M.F., da Silva M.N.F., Farias, I.P., Hrbek, T. (2015). Living between rapids: Genetic structure and hybridization in botos (Cetacea: Iniidae: *Inia* spp.) of the Madeira River, Brazil. *Biological Journal of the Linnean Society*. 114 (4-1): 764-777. Doi: 10.1111/bij.12463
- Hrbek, T., da Silva, V.M.F., Dutra, N., Gravena, W., Martin, A.R., Farias, I.P. (2014). A new species of river dolphin from Brazil or: how little do we know our biodiversity. *PLoS ONE*. 9 (1): e83623. Doi: 10.1371/journal.pone.0083623

- International Whaling Commission (IWC).** (2000). Report of the Scientific Sub-Committee on Small Cetaceans. International Whaling Commission Scientific Committee. Journal of Cetacean Research and Management. Supplement 3: 263-291.
- Latruesse, E.M., Arima, E.Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V.R., d'Horta, F.M., Wight, C., Wittmann, F., Zuanon, J., Baker, P.A., Ribas, C.C., Norgaard, R.B., Filizola, N., Ansar, A., Flyvbjerg, B., Stevaux, J.C.** (2017). Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature*. **546** (7658): 363-369.
- Martin, A. R., & da Silva, V. M. F.** (2004). River dolphins and flooded forest: Seasonal hábitat use and sexual segregation of botos (*Inia geoffrensis*) in an extreme cetacean environment. *Journal of Zoology*. **263**: 295-305.
- Mosquera-Guerra F., F. Trujillo., Díaz-Granados, M.C. y H. Mantilla Meluk.** (2015). Conservación de delfines de río (*Inia geoffrensis* y *Sotalia fluviatilis*) en los ecosistemas acuáticos de la Amazonia y Orinoquia en Colombia. *Momentos de Ciencia*. **12** (2): 77-86. ISSN 1692-5491.
- Mosquera-Guerra F., Parra, C., Trujillo, F., Jiménez-Ortega, A.M., Mantilla-Meluk, H.** (2015a). Valoración estacional de las amenazas contra la conservación de *Inia geoffrensis humboldtiana* (Cetartiodactyla Iniidae) en la cuenca del río Meta, Colombia. *Therya*. **6** (2): 371-388.
- Mosquera-Guerra F., Trujillo, F., Caicedo-Herrera, D., Martínez-Callejas, S.** (2015b). Indicios de biomagnificación de mercurio total (Hg) en las especies del género *Inia* (Cetartiodactyla: Iniidae) en los ríos Amazonas y Orinoco (Colombia). *Momentos de Ciencia*. **12** (2): 145-149.
- Mosquera-Guerra, F., Trujillo, F., Caicedo-Herrera, D., Zoque-Cancelado, J., Mantilla Meluk, H.** (2015c). Impactos de las pesquerías de *Calophrys macropterus* un riesgo para la salud pública y la conservación de los delfines de río en Colombia. *Momentos de Ciencia*. **12** (2): 88-99. ISSN 1692-5491.
- Mosquera-Guerra, F., Trujillo, F., Díaz-Granados, M.C., Mantilla-Meluk, H.** (2015d). Estimación poblacional y densidad para *Inia geoffrensis* y *Sotalia fluviatilis* en los ecosistemas acuáticos de la Amazonia y Orinoquia. *Momentos de Ciencia*. **12** (2): 93-99. ISSN 1692-5491.
- Mosquera-Guerra, F., Trujillo, F., Danni, P., Oliveira-da-Costa, M., Marmontel, M., Armenteras-Pascual, D., Usma, S., Willems, D., Carvajal-Castro, J.D., Mantilla-Meluk, H., Franco, N., Amorocho, D., Maldonado, R., Berg, K., Sainz, L., Van Damme, P.A., Cambell, E.** (2018). Analysis of distribution of river dolphins (*Inia* and *Sotalia*) in protected and transformed areas in the Amazon and Orinoco basins. SC/67B/SM/16. Bled, Slovenia.
- Mosquera-Guerra, F., Trujillo, F., Parks, D., Oliveira-da-Costa, M., Usma, S., Willems, D., Maldonado, R., Amorocho, D., Berg, K., Armenteras-Pascual, D., Van Damme, P.A., Sainz, L., Franco, N., Mantilla-Meluk, H., Carvajal-Castro, J.D., Cambell, E., Cordova, L., Echeverria, A., Caballero, S., Marmontel, M.** (2018a). Presence of mercury in river dolphins (*Inia* and *Sotalia*) in the Amazon and Orinoco basins: evidence of a growing threat for these species. SC/67B/SM/16. Bled, Slovenia.
- Mosquera-Guerra, F., Trujillo, F., Oliveira-da-Costa, M., Marmontel, M., Armenteras-Pascual, D., Usma, S., Willems, D., Carvajal-Castro, J.D., Mantilla-Meluk, H., Franco, N., Amorocho, D., Maldonado, R., Berg, K., Sainz, L., van Damme, P.A.** (2018b). Movements and habitat use of river dolphins (Cetartiodactyla: Iniidae) in the Amazon and Orinoco river basins, determined from satellite tagging. SC/67B/SM/16. Bled, Slovenia.
- Pavanato, H., Melo-Santos, G., Lima, D., Portocarrero-Aya, M., Paschoalini, M., Mosquera, F., Trujillo, F., Meneses, R., Marmontel, M., Maretti, C.** (2016). Risk of dam construction for South American River Dolphins: a case of study of the Tapajós River. *Endangered Species Research*. **31**: 47-60. Doi: 10.3354/esr00751.
- Perrin, W. F., Brownell, R. L., Zhou, K., Jiankang, L.** (1989). Biology and conservation of the river dolphins. Proceedings of the Workshop on Biology and Conservation of the Platanistoid Dolphin held at Wuhan, People's Republic of China, October 28-30, 1986. Occasional Papers of the IUCN species survival commission (SSC). **3**: 173.
- Pires, A.** (2006). Community timber enterprises in the Mamiraua Sustainable Development Reserve, Brazil. Community-based forest enterprises in tropical forest countries: Scoping study: 27. Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamiraua, Brazil. Fecha de consulta: 22 de septiembre, 2018. Disponible en: [http://www.rightsandresources.org/documents/files/doc\\_295.pdf](http://www.rightsandresources.org/documents/files/doc_295.pdf)
- Reeves, R. R. & Leatherwood, S.** (1994). Dolphins, Porpoises and Whales 1994-1998 Action Plan for the Conservation of Cetaceans. IUCN Species Survival Commission, Gland, Switzerland.
- Reeves, R. & Leatherwood, S.** (1994a). Dams and river dolphins: can they co-exist. *Royal Swedish Academy of Sciences*. **23** (3): 172-175.
- Rosas, F.C.W., & Kesä, K.L.** (1996). Nutritional and mercury content of milk of the Amazon river dolphin, *Inia geoffrensis*. *Comp.Biochem. Physiol.* **115A** (2): 117-119.
- Sanderson, E.W., Jaiteh, M., Levy, M.A., Redford, K.H., Wannebo, A.V., Woolmer, G.** (2002). The human footprint and the last of the wild. *Bioscience*. **52**: 891-904.
- Sandin, S.A., Smith, J.E., DeMartini, E.E., Dinsdale, E.A., Donner, S.D., Friedlander, A.M., Konotchick, T., Malay, M., Maragos, J.E., Obura, D.** (2008). Baselines and degradation of coral reefs in the northern Line Islands. *PLoS ONE*. **3**: 1-11.
- Sergio, F., Caro, T., Brown, D., Clucas, B., Hunter, J., Ketchum, J., McHugh, K., Hiraldo, F.** (2008). Top predators as conservation tools: ecological rationale, assumptions, and efficacy. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **39**: 1-19.
- Sioli, H.** (1984). The Amazon and its main affluents: Hydrography, morphology of the river courses, and river types. p. 127-166. In *The Amazon, Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. H. Sioli, editor. Dr. W. Junk Publishers. The Hague, The Netherlands.
- Shostell, J.M & Ruiz-García, M.** (2010). An introduction to river dolphin species. In: *Biology, Evolution and Conservation of River Dolphins*. Editors: Manuel Ruiz-García and Joseph Shostell. Nova Science Publishers, Inc. New York. p.1-28.
- Smith, B., Braulik, G., Strindberg, S., Ahmed, B., Mansur, R.** (2006). Abundance of Irrawaddy dolphins (*Orcaella brevirostris*) and Ganges river dolphins (*Platanista gangetica gangetica*) estimated using concurrent counts made by independent teams in waterways of the Sundarbans mangrove forest in Bangladesh. *Marine Mammal Science*. **22**: 527-547.
- Smith, B. D., & Braulik, G. T.** (2008).

- Platanista gangetica*. In: IUCN 2008. IUCN Red List of Threatened Species. Conservation of Indus River Dolphin (*Platanista gangetica minor*) in the Indus River System, Pakistan: an overview | Request PDF. Fecha de consulta: 14 de diciembre, 2008. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/259240004\\_Conservation\\_of\\_Indus\\_River\\_Dolphin\\_Platanista\\_gangetica\\_minor\\_in\\_the\\_Indus\\_River\\_System\\_Pakistan\\_an\\_overview](https://www.researchgate.net/publication/259240004_Conservation_of_Indus_River_Dolphin_Platanista_gangetica_minor_in_the_Indus_River_System_Pakistan_an_overview) [accessed Sep 17 2018]
- Thomas, L., B S.T. Buckland, E.A. Rexstad, J.L. Laake, S. Strindberg, S. Hedley, J.R.B. Bishop, Marques, T., Burnham, K.P.** (2010). Distance software: Design and analysis of distance sampling surveys for estimating population size. *Journal of Applied Ecology*. **47**: 5-14.
- Turvey, S.T., Pitman, R.L., Taylor B.L., Barlow, J., Akamatsu, T., Barrett, L.A. Zhao, X., Reeves, R.R., Stewart, B.S., Wang, K., Wei, Z., Zhang, X., Pusser, L. T., Richlen, M., Brando, J.R., Wang, D.** (2007). First human-caused extinction of a cetacean species? *Biology letters*. The Royal Society. **3**: 537-540.
- Trujillo, F.** (2000). Habitat use and social behaviour of the freshwater dolphin *Inia geoffrensis* (de Blainville 1817) in the Amazon and Orinoco basins. Ph.D. thesis, University of Aberdeen, Aberdeen, Scotland. 157 p.
- Trujillo, F., Crespo, E., Van Damme, P., Susma, J. (Eds.)** (2010). The Action Plan for South American River Dolphins 2010-2020. WWF, Fundación Omacha, WCS, WDCS, Solamac. 240 p.
- Trujillo, F., Crespo, E., Van Damme, P., Usma, S., Morales-Betancourt, D., Wood, A., Portocarrero, M.** (2010a). Summary of threats for river dolphins in South America: past, present and future. p. 145-158. In: Trujillo, F., Crespo, E., Van Damme, P. & J. Susma (Editores). The Action Plan for South American River Dolphins 2010-2020. WWF, Fundación Omacha, WCS, WDCS, Solamac. 240 p.
- Trujillo, F., Gómez-Salazar, C., Portocarrero, M., Aliaga-Rossel, E., Utreras, V., Usma, S., Tavera, G.** (2011). Estimaciones de abundancia de delfines de río: una herramienta para diseñar estrategias de conservación. Pp. 57-70. En: Trujillo, F., Crespo, E., van Damme, P., Usma, J. (2011). Plan de Acción para la conservación de los delfines de río en Sudamérica: Resumen Ejecutivo y Avances 2010-2020. WWF, WCS, WFN, Solamac, Fundación Omacha, 104 p.
- Trujillo, F., C. Gómez., S. Martínez., Herrera, O., Mosquera-Guerra, F.** (2016). Estimaciones de densidad, y conservación del delfín de río (*Inia geoffrensis*) en el río Meta. Pp 274 2 a 28. En: Trujillo, F; R. Antelo & Usma S. (editores). 2016 Biodiversidad de la cuenca baja y media del río Meta. Fundación Omacha, Fundación Palmarito, WW F. Bogotá 336 páginas.
- US Geological Service.** (2018). HydroSHEDS. Fecha de Consulta: 14 de diciembre, 2008. Disponible en: <https://hydrosheds.cr.usgs.gov/>
- Vidal, O., Barlow, J., Hurtado, L., Torre, J., Cendon, P., Zully, O.** (1997). Distribution and Abundance of the Amazon River Dolphin (*Inia geoffrensis*) and the Tucuxi (*Sotalia fluviatilis*) in the upper Amazon. *Mar. Mamm. Sci.* **13** (3): 427-445.
- Utreras, V., Trujillo, F. Usma, S.** 2013. Plan de Acción para la Conservación de los mamíferos Acuáticos de Ecuador. Ministerio de Ambiente de Ecuador, WWF, WCS, Fundación Omacha. 124 p.
- Williams, R., Moore, J., Gomez-Salazar, C. Trujillo, F., Burt, L.** (2016). Searching for trends in river dolphin abundance: Designing surveys for looming threats, and evidence for opposing trends of two species in the Colombian Amazon. *Biological Conservation*. **195**: 136-145.



# Odonatos de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: una lista preliminar

Melizza Tobias-Loaiza\*, Cesar E. Tamaris-Turizo

Grupo de Investigación en Biodiversidad y Ecología Aplicada, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

## Resumen

Se presenta una lista de especies y géneros de odonatos de ocho ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) producto de la revisión de artículos científicos, trabajos de grado y especímenes depositados en el centro de Colecciones Biológicas de la Universidad del Magdalena (CEBUMAG). Se registran 38 especies distribuidos en 35 géneros en ocho familias. La familia Libellulidae presentó la mayor riqueza (14 géneros) y los rangos más amplios de distribución altitudinal (entre 50 y 2800 msnm), encontrándose en todas las coberturas vegetales. El río Gaira exhibió la mayor riqueza entre los ríos revisados, 26 géneros, de los cuales ocho son exclusivos de la cuenca, en tanto que en el río Ranchería solo se registró *Progomphus*. La distribución espacial más amplia fue la de los géneros *Argia* y *Brechmorhoga*, registrados en seis ríos. La revisión evidenció la falta de estudios en las vertientes oriental y suroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, por lo que se recomienda realizar trabajos taxonómicos y de biodiversidad para contribuir al conocimiento de odonatos en el Caribe colombiano. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabra clave:** Libélula; Caballito del diablo; Distribución; Magdalena.

## Odonata of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: A preliminary list

### Abstract

We raised a list of Odonata species and genera from eight rivers of the *Sierra Nevada of Santa Marta* (SNSM) after the revision of scientific articles, theses, and specimens deposited in the *Centro de Colecciones de la Universidad del Magdalena* (CEBUMAG). We found 38 species distributed in 35 genera and eight families. The Libellulidae family presented the greatest richness (14 genera) and the widest range of altitudinal distribution (between 50 and 2,800 m a.s.l.) found in all vegetable coverages. The Gaira River exhibited the greatest wealth among the revised rivers with 26 genera of which eight are exclusive to the basin while in the Rancheria River only *Progomphus* was registered. *Argia* and *Brechmorhoga* had a wide spatial distribution as they were recorded in six rivers. The review revealed the lack of studies on the eastern and southwestern slopes of the *Sierra Nevada de Santa Marta*, so it is recommended to carry out taxonomic and biodiversity work to contribute to the knowledge of Odonata in the Colombian Caribbean. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Dragonfly; Damselfly; Distribution, Magdalena.

## Introducción

Los odonatos son insectos hemimetábolos, pues presentan los estados de huevo, larva y adulto (Arango & Roldán, 1983; Roldán, 1988). Los huevos y las larvas se desarrollan en diferentes ambientes como ríos, lagos, pozos, pantanos, manglares e, incluso, en el agua acumulada en las plantas (fitotelmata), mientras que los adultos habitan en la vegetación cerca a los cuerpos de agua (Roldán, 1988; Gómez-Anaya, 2008). El ciclo de vida de la larva puede durar desde pocos meses hasta más de un año, según la especie, el clima, el hábitat y la disponibilidad de alimento (Arango & Roldán, 1983; Ramírez, 2010).

En los ecosistemas de agua dulce los odonatos son importantes porque actúan como control biológico de insectos vectores de enfermedades tropicales (López, et al., 1998).

Además, tienen un papel fundamental en la transferencia de energía (desde los niveles intermedios hasta el superior), por lo que son considerados como un eslabón intermedio superior (en ausencia de organismos como peces y anfibios) en las redes tróficas (Santos, et al., 1981). Este grupo de insectos es utilizado como indicador de alteraciones ambientales debido a las exigencias ambientales que tienen algunas especies durante sus estadios inmaduros, los cuales se desarrollan en el medio acuático, y la dependencia de los adultos de una estructura vegetal compleja que les permita completar su ciclo de vida (Gómez-Anaya, 2008; Sánchez,

### \*Correspondencia:

Melizza Tobias-Loaiza; melizzatobias.26@gmail.com

Recibido: 31 de enero de 2019

Aceptado: 5 de abril de 2019

Editor: Elizabeth Castañeda

*et al.*, 2009). Por lo tanto, los factores de estrés que afectan los sistemas acuáticos y ribereños tienen efectos directos e indirectos en la dinámica de las poblaciones de odonatos.

En Colombia se han realizado trabajos que compilan información de los inventarios locales y revisiones de material depositado en centros de colecciones biológicas, entre los que sobresalen las investigaciones de **Palacino-Rodríguez** (2009), quien realizó un inventario de Anisoptera a partir de especímenes recolectados desde 1940 en 27 departamentos del país cuyo principal aporte fue el registro de 91 especies. Posteriormente, **Pérez-Gutiérrez & Palacino-Rodríguez** (2011) presentaron lo que en su momento sería considerado la lista más completa de odonatos, con 335 especies y 90 géneros. Más adelante, **Bota-Sierra, et al.** (2016) evaluaron el estado de conservación de las libélulas en los Andes tropicales e indicaron que el número de especies registrado para Colombia había aumentado a 389. Actualmente, en el país se han registrado aproximadamente 434 especies, principalmente por las contribuciones de **Bota-Sierra, et al.** (2018a, 2018b).

En el río Gaira (Sierra Nevada de Santa Marta) se registran 26 especies de odonatos en trabajos como el de **Pérez-Gutiérrez** (2003), el cual incluyó un estudio biotaxonomico en el distrito de Santa Marta y en ríos que descienden de la Sierra Nevada de Santa Marta, y el de **Tobías-Loaiza** (2016), en el que se evaluó la diversidad de odonatos en la parte media del río Gaira. Además, se han hecho trabajos aislados que involucran a las comunidades de macroinvertebrados acuáticos a nivel de géneros en otras zonas de la Sierra Nevada de Santa Marta (**Tamaris-Turizo, et al.**, 2013; **Rúa-García, et al.**, 2015; **Barragán, et al.**, 2017). Por ello, es necesario desarrollar estudios que recopilen la información dispersa sobre este grupo biológico, con el fin de comprender mejor su dinámica espacial y contribuir al estudio de este orden de insectos en el Caribe colombiano.

## Materiales y métodos

**Área de estudio.** La Sierra Nevada de Santa Marta (Sierra Nevada de Santa Marta) es un macizo montañoso ubicado al norte de Colombia, entre los 10°01'05", 11°20'11" N y los 72°36'16", 74°12'49" O (**Pro-Sierra**, 1998). Este sistema montañoso es de gran importancia para la región Caribe dado que se trata de una fuente hídrica por la que corren 29 ríos principales (**Pro-Sierra**, 1998). En esta formación, la vertiente norte bordea el mar Caribe desde el sur de La Guajira hasta Santa Marta, la vertiente occidental limita con la Ciénaga Grande de Santa Marta, la planicie del río Magdalena y el mar Caribe y la vertiente oriental está rodeada por el río Cesar y el río Ranchería. Cada flanco de la Sierra Nevada de Santa Marta presenta un clima diferente, determinado por factores como la exposición al mar y los vientos del nordeste (**Pro-Sierra**, 1998; **Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC**, 1993; **Unidad Administrativa Especial Parques Nacionales Naturales de Colombia-UAESPNN**, 2005).

En los ríos estudiados se encuentran siete formaciones vegetales, las cuales se localizan desde el nivel del mar hasta la parte más elevada de las cuencas. Según la clasificación sugerida por **Holdridge** y adaptada por **Espinal & Montenegro** (1963) para Colombia, en los ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta se registran las formaciones vegetales: monte espinoso tropical (0-100 m s.n.m.), bosque muy seco tropical (100-200 m s.n.m.), bosque seco tropical (200-700 m s.n.m.), bosque húmedo subtropical (700-900 m s.n.m.), bosque muy húmedo subtropical (900-1.700 m s.n.m.), bosque muy húmedo montano bajo (1.700-2.350 m s.n.m.) y bosque premontano (2.350-2.850 m s.n.m.).

**Análisis de los datos.** La lista de odonatos se recopiló a partir de la información obtenida de artículos científicos, trabajos de pregrado y mediante la consulta de los ejemplares depositados en el Centro de Colecciones Biológicas de la Universidad del Magdalena (CEBUMAG). Las muestras provienen principalmente de estudios de diversidad y de ecología de macroinvertebrados bentónicos en diferentes ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta.

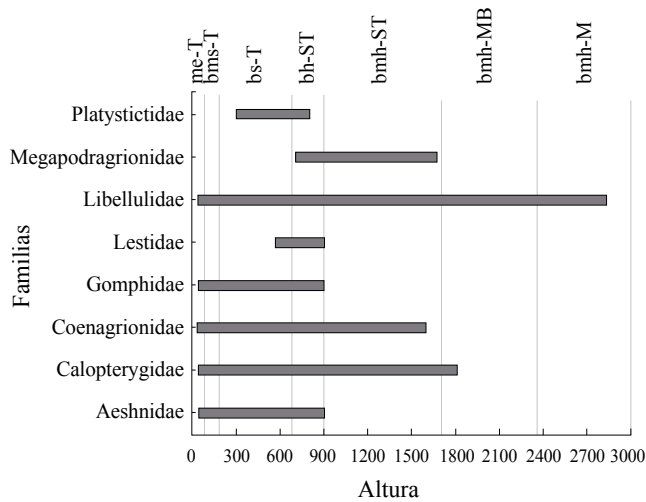
A partir de la revisión de la literatura, se elaboró una matriz con información del número de organismos por familias, géneros y especies, en la cual se registró la siguiente información: nombre de la localidad, coordenadas, altitud y formación vegetal según la clasificación de **Espinal & Montenegro** (1963). Con base en dicha matriz, se elaboraron gráficas de distribución altitudinal para asociar la presencia de los géneros con la altitud y con la formación vegetal correspondiente.

## Resultados

Como producto de la revisión, se presenta una lista de 38 especies distribuidas en 35 géneros y ocho familias de odonatos de ocho ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta: Gaira, Manzanares, Toribio, Córdoba, Palomino, Piedra, Ranchería y Guatapuri (Tabla S1, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/832/3841>). La familia Libellulidae fue la más representativa, con 14 géneros, seguida de la Coenagrionidae, con siete, en tanto que la Platystictidae y la Calopterygidae presentaron un género cada una (Tabla S1, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/832/3841>).

En cuanto a la distribución altitudinal, Libellulidae presentó los rangos más amplios de distribución (entre 50 y 2.800 m s.n.m.), mientras que Lestidae, la menor (entre los 600 y los 900 m s.n.m.) (Figura 1). Los géneros con mayor distribución fueron *Erythrodiplax*, *Hetaerina* y *Sympetrum*, y entre los de menor distribución se encontraron *Acanthagrion*, *Agriogomphus* y *Telebasis*. Se destaca que *Archaeogomphus*, *Coryphaesha*, *Enallagma*, *Gynacantha*, *Miathyria*, *Micrathyria*, *Perithemis* y *Triacanthagyna* solo se registraron en un solo sitio. La mayor riqueza de géneros se registró en los tramos medios y bajos de los ríos (Figura 2).

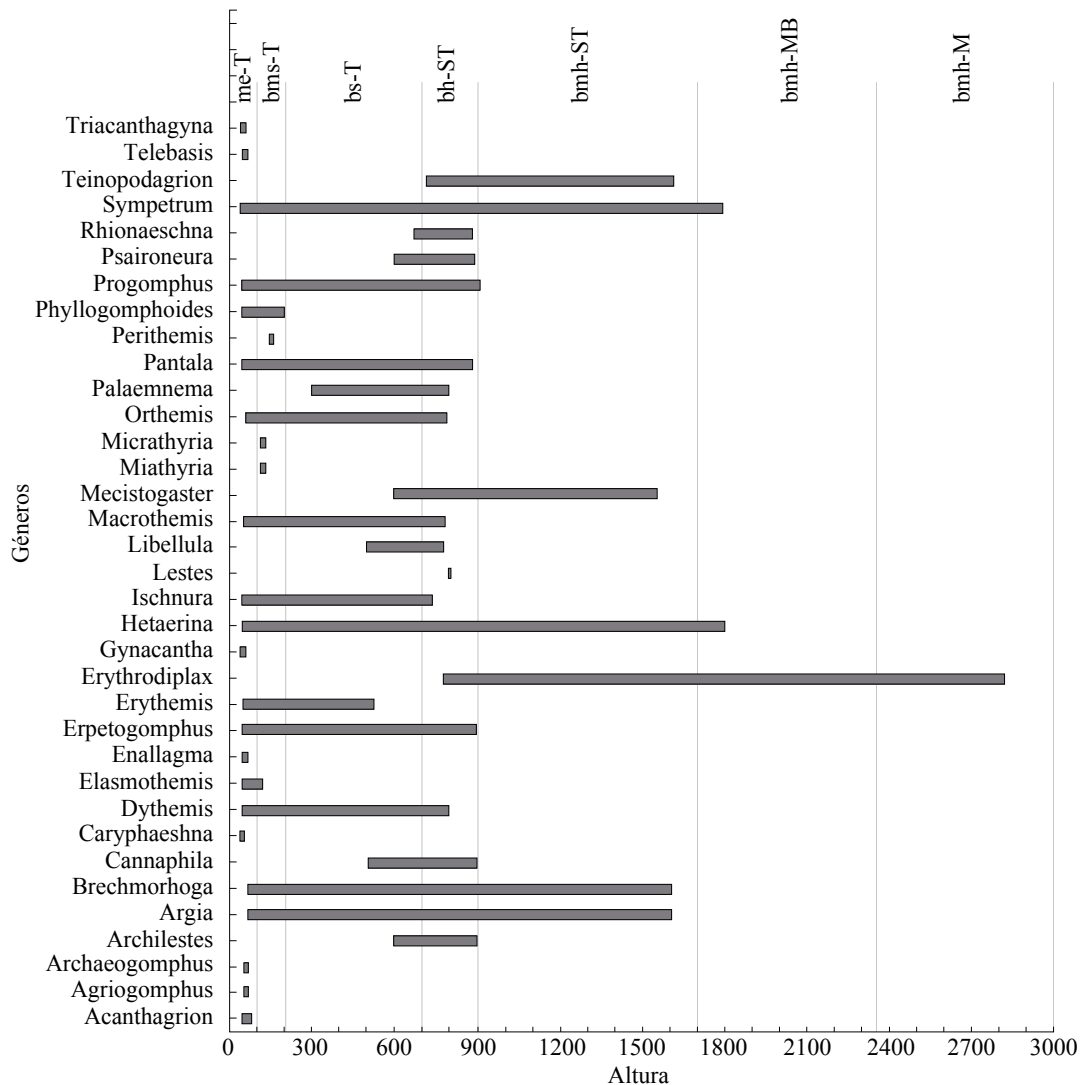
Con respecto a la distribución espacial, el río Gaira exhibió la mayor riqueza, con 26 géneros, de los cuales ocho son exclusivos, seguido del río Manzanares, con 17 géneros,



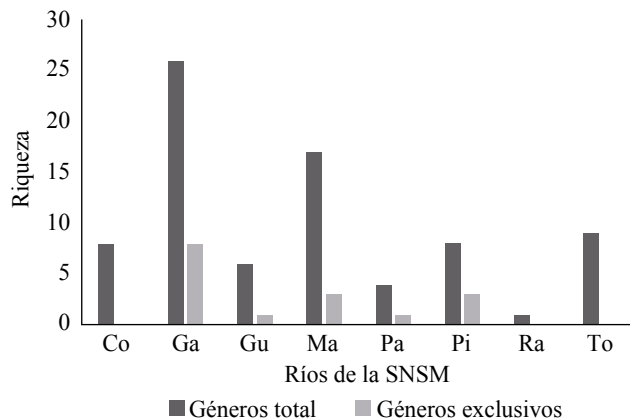
**Figura 1.** Distribución altitudinal de las familias del orden Odonata en sistemas fluviales de la Sierra Nevada de Santa Marta

de los cuales tres son exclusivos. Por el contrario, los ríos Ranchería y Palomino registraron las menores riquezas, con uno y cuatro géneros, respectivamente. Los géneros *Argia* y *Brechmorhoga* tuvieron la mayor distribución espacial, pues se encontraron en seis de los ocho ríos analizados, mientras que los ejemplares de *Coryphaeshna*, *Gynacantha*, *Rhionaeschna*, *Triacanthagyna*, *Acanthagrion*, *Enallagma*, *Mecistogaster*, *Psaironeura*, *Archaeogomphus*, *Archilestes*, *Erythrodiplax*, *Miathyria*, *Orthemis*, *Perithemis* y *Teinopodagrion* se capturaron en un solo lugar (Figura 3).

Con relación a las coberturas vegetales, Libellulidae estuvo en todos los tipos de bosques estudiados, desde el bosque espinoso tropical (be-T) hasta el bosque muy húmedo montano (bhm-M), a diferencia de lo observado en *Platystictidae* y *Lestidae*, que solo estuvieron presentes en el bosque seco tropical (bs-T) y el bosque húmedo subtropical (bh-ST) (figura 1). *Hetaerina* y *Sympetrum* se registraron en seis tipos de coberturas, desde el be-T hasta el bosque



**Figura 2.** Distribución altitudinal de los géneros del orden Odonata en sistemas fluviales de la Sierra Nevada de Santa Marta



**Figura 3.** Riqueza de géneros en ocho ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta. Co: río Córdoba, Ga: río Gaira, Gu: río Guatapurí, Ma: río Manzanares, Pa: río Palomino, Pi: río Piedra, Ra: río Ranchería y To: río Toribio

muy húmedo montano bajo (bmh-MB). En contraste, *Rhionaeschna* solo se encontró en el bh-ST. En todos los casos de géneros con el menor rango de distribución, los ejemplares fueron capturados en localidades exclusivas ubicadas principalmente en el be-T y el bms-T (Figura 2).

### Discusión

La revisión realizada refleja que hay poca riqueza de especies y de géneros de Odonata en la Sierra Nevada de Santa Marta en comparación con la registrada en trabajos realizados en otras regiones de Colombia, como el de **Bota-Sierra, et al.** (2015), en el cual se hizo una amplia revisión en la Amazonia colombiana y se registraron 108 especies distribuidas en 55 géneros y 15 familias, y el de **Bota-Sierra, et al.** (2018a), en el cual se llevó a cabo un trabajo de campo intensivo en los departamentos de Cauca, Nariño y Putumayo, y se registró una riqueza de 68 especies distribuidas en 39 géneros y 12 familias. Es muy probable que el número de especies y géneros en la Sierra Nevada de Santa Marta aumente en la medida de que se realicen más trabajos taxonómicos a nivel de especie en zonas donde se han hecho pocos estudios, como en la vertiente de la Sierra que colinda con La Serranía del Perijá (sur de La Guajira).

La gran riqueza de géneros exhibida por Libellulidae se corresponde con su gran diversidad y su capacidad para adaptarse en áreas con alto grado de intervención antrópica (**Carle, 1979; Bermúdez, 2005**). Los resultados de esta revisión coinciden con lo registrado en otros trabajos realizados en Colombia (**Arango & Roldán, 1983; Altamiranda, 2009; Garzón-Sanabria & Realpe, 2009 y Altamiranda, et al., 2010**) y en el Neotrópico (**Novelo-Gutiérrez & Gómez-Anaya, 2009**). Por el contrario, la poca riqueza de géneros de Calopterygidae y Platystictidae concuerda con sus distribuciones biogeográficas, pues el único género de la familia Calopterygidae al oeste de los Andes es *Hetaerina* y la familia Platystictidae solo está representada por el género *Palaemnema* en el Neotrópico (**Garrison, et al., 2010**).

La disminución en la riqueza de géneros de odonatos en la medida que incrementa la altitud, se ha documentado en América del Norte (**Corbet, 1999**), Sudafrica (**Samways, 1989**), Europa central (**Maibach & Meier, 1987**), en el Himalaya (**Mahato & Eds, 1993**) y en Colombia (**Arango & Roldán 1983; Bota-Sierra, 2014**). Según **McCoy (1990)**, la diversidad de insectos es limitada en las alturas, debido a las rigurosas condiciones del clima y a la disminución de los recursos, en tanto que la riqueza es mayor en las partes medias y bajas de las cuencas, lo que también puede estar relacionado con la heterogeneidad de coberturas vegetales en estas zonas.

En Colombia, la familia con mayor rango altitudinal es Aeshnidae, seguida de Libellulidae y Coenagrionidae (**Bota-Sierra, 2014**). Sin embargo, en este trabajo la familia Libellulidae presentó mayor rango altitudinal, como se ha registrado en otros estudios realizados en Colombia (**Arango & Roldán, 1983**) y en otros países como España (**Ocharán & Torralba, 2004; Mezquita-Aranburu, 2016**). Libellulidae se caracteriza por presentar una amplia distribución altitudinal, debido a los hábitos migratorios que tienen algunos géneros como *Pantala* y *Miathyria* (**Srygley, 2003; Kalkman, 2008; Bermúdez & López-Victoria, 2009, Paulson, 2009**) y por la capacidad que tienen otros géneros de adaptarse a ecosistemas de alta montaña como *Sympetrum* y *Erythrodiplax* (**Bota-Sierra, 2014**); además, está presente en todos los países neotropicales (**Kalkman, et al., 2008**). Otros factores que pueden influir en su distribución son la habilidad de los adultos de desarrollar un vuelo rápido, que les permite desplazarse a largas distancias, y la capacidad para colonizar diversos cuerpos de agua y coberturas vegetales de algunas especies euritolerantes (**Arango & Roldán, 1983; Srygley, 2003; Esquivel, 2006**). Ello explica que esta familia se haya encontrado en todos los tipos de coberturas comprendidos desde el nivel del mar hasta los 2.800 m s.n.m.

Por el contrario, Platystictidae y Lestidae presentaron los menores rangos de distribución, debido a que los adultos de Platystictidae tienen hábitos muy restringidos, se encuentran normalmente en el sotobosque y tienen un periodo de vuelo corto (**Ramírez, 2010; González-Soriano & Novelo-Gutiérrez, 2014**). Por su parte, Lestidae se encuentra en áreas abiertas y sus larvas se pueden encontrar en aguas lentas, remansos de arroyos, pantanos o pozas temporales (**Ramírez, 2010**), sin embargo, es una familia con tolerancia moderada a las condiciones climáticas, por lo que es más común en altitudes bajas (**Samways, 1989**). En países como Costa Rica, las familias Platystictidae y Lestidae se han encontrado desde el nivel del mar hasta los 1.500 m (**Ramírez, 2010**).

El amplio gradiente altitudinal presentado por *Erythrodiplax*, *Hetaerina* y *Sympetrum*, se debe a que son géneros que se pueden encontrar en diversos hábitats. *Sympetrum* y *Erythrodiplax* se han registrado en varios tipos de cuerpos de agua lénticos, como pantanos, lagos,

estanques, charcas temporales y arroyos con poca corriente, mientras que *Hetaerina* lo hace principalmente en corrientes rápidas (Garrinson, *et al.*, 2006). Estos géneros se encuentran comúnmente en zonas con alto grado de intervención antrópica y se adaptan a diferentes tipos de coberturas (Altamiranda, 2009).

*Acanthagrion* y *Telebasis* presentaron los menores rangos de distribución altitudinal. Sin embargo, estos géneros se encuentran distribuidos ampliamente en el Neotrópico (Alonso-Eguía, *et al.*, 2002), donde son muy comunes en zonas bajas y se pueden encontrar en aguas estancadas, tallos de plantas flotantes y pantanos. En el caso de *Telebasis*, es común encontrar ejemplares en marismas, pero, aparentemente, están ausentes en los ríos (Garrinson, *et al.*, 2006). En esta revisión, *Telebasis* se registró en zonas de desembocadura.

En cuanto a la distribución espacial, todos los géneros de esta lista estuvieron presentes en la vertiente noroccidental, en especial en los ríos Gaira y Manzanares, donde se han realizado la mayoría de los estudios con macroinvertebrados acuáticos. Pocos han sido los trabajos realizados en otras vertientes de la Sierra Nevada de Santa Marta, por lo que en esta revisión se registró poca riqueza de géneros en la vertiente suroccidental y su ausencia en la oriental.

## Conclusiones

En este trabajo se evidencia que la Sierra Nevada de Santa Marta tiene una gran riqueza de géneros de libélulas, en especial en la vertiente noroccidental. Sin embargo, es necesario realizar más estudios en las vertientes suroccidental y oriental enfocados en la taxonomía y en la asociación de larvas y adultos para llevar a cabo su identificación hasta el nivel de especie. Es posible que con más estudios en estas zonas, aumente el número de géneros presentes en la Sierra Nevada de Santa Marta y se obtenga una lista más completa de odonatos para la región.

---

## Información suplementaria

---

**Tabla S1.** Lista de especies registradas en ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta. Co: río Córdoba, Ga: río Gaira, Gu: río Guatapurí, Ma: río Manzanares, Pa: río Palomino, Pi: río Piedra, Ra: río Ranchería y To: río Toribio. \*Especies capturadas en estado adulto. Vea la tabla S1 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/832/3841>

---

## Agradecimientos

Agradecemos a la Colección Biológica de la Universidad del Magdalena, por facilitar la información complementaria para la realización de este documento. A Alonso Ramírez y Rodolfo Novelo-Gutiérrez, por la confirmación de la identificación de las especies, y a los evaluadores por sus grandes aportes y comentarios acertados, que sin duda mejoraron la calidad del manuscrito.

## Contribución de los autores

Los dos autores participaron en el proceso de conceptualización de la revisión, tratamiento de la información y los datos y escritura del manuscrito.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

## Referencias

- Aguirre-Pabón, J., Barrios, J. R., y Ospina-Torres, R. (2012). Deriva de macroinvertebrados acuáticos en dos sitios con diferente grado de perturbación, río Gaira, Santa Marta-Colombia. *Intropica: Revista del Instituto de Investigaciones Tropicales*. **7** (1): 1.
- Alonso-Eguía, L., González-Soriano, E., Gutiérrez-Yurrita, P. J. (2002). Listado y distribución de los odonatos de la cuenca del Río Moctezuma, Centro-Occidente de México (Insecta: Odonata). *Folia Entomológica Mexicana*. **41** (3): 347-357.
- Altamiranda, M. (2009). Diversidad de libélulas (insecta-odonata) para dos usos de suelo, en un bosque seco tropical. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. **62** (2): 5071-5079.
- Altamiranda, M., Pérez, L., Gutiérrez, L. (2010). Composición y preferencia de microhábitat de larvas de Odonata (Insecta) en la Ciénaga San Juan de Tocagua (Atlántico, Colombia). *Caldasia*. **32** (2): 1-13.
- Arango, M. C. & Roldán, G. (1983). Odonatos inmaduros del departamento de Antioquia en diferentes pisos altitudinales. *Actualidades Biológicas*. **12** (46): 91-105.
- Barragán, M. F., Tamaris-Turizo, C. E., Rúa-García, G. A. (2017). Comunidades de insectos acuáticos de los tres flancos de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Biota Colombiana*. **17** (2): 47-61.
- Bermúdez Rivas, C. (2005). Clave para los imagos de los géneros de Libellulidae (Odonata: Anisoptera) del Valle del Cauca, Colombia. *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle*. **6** (1): 7-22.
- Bermúdez, C. R. & López-Victoria, M. (2009). Primeros registros de libélulas (Odonata: Anisoptera) en la Isla Malpelo, Colombia/First records of dragonflies (Odonata: Anisoptera) of Malpelo Island, Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*. **35** (2): 286.
- Bota-Sierra, C.A., C. Moreno-Arias, Faasen, T. (2015). Preliminary list of Odonata from the Colombian Amazon, with descriptions of *Inpabasis nigridorsum* sp. nov. y *Diaphlebia richteri* sp. nov. (Coenagrionidae y Gomphidae). *International Journal of Odonatology*. **18** (3): 249-268.
- Bota-Sierra C. A. (2014). A brief look at the Odonata from the Páramo ecosystems in Colombia, with the descriptions of *Oxyallagma colombianum* sp. nov. and *Rhionaeschna caligo* sp. nov. (Odonata: Coenagrionidae, Aeshnidae, Libellulidae). *Zootaxa*. **3856** (2): 192-210.
- Bota-Sierra, C. A., Maufroy, B., Palacino-Rodríguez, F., Hofmann, J., Tennesen, K., Rache, L., Tognelli, M. F. (2016). Estado de conservación de las libélulas de los Andes Tropicales. En Tognelli, M. F., Lasso, C. A., Bota-Sierra, C. A., Jiménez-Segura, L. F., y Cox, N. A. (Editores). Estado de conservación y distribución de la biodiversidad de agua dulce en los Andes Tropicales. UICN. Gland, Cambridge y Arlington: UICN.

- Bota-Sierra, C. A., Corso, A., Janni, O., Sandoval-H, J., Viganò, M.** (2018a). First dragonfly records from Colombia and the confirmation of the synonymy of *Philogenia monotis* and *P. tinalandia* (Insecta: Odonata). *International Journal of Odonatology*. **21** (2):115-127.
- Bota-Sierra, C. A., Sánchez-Herrera, M., Palacino-Rodríguez, F.** (2018b). Odonata from protected areas in Colombia with new records and description of *Cora verapax* sp. nov. (Zygoptera: Polythoridae). *Zootaxa*. **4462** (1):115-131.
- Carle, F.L.** (1979). Environmental monitoring potential of the Odonata, with a list of rare and endangered Anisoptera of Virginia, United States. *Odonatologica*. **8** (4): 319-323.
- Corbet, P. S.** (1999). *Dragonflies, Behaviour and Ecology of Odonata*. Colchester, England: Harley Books. p. 829.
- Espinal, T. & Montenegro, L.S.** (1963). Formaciones vegetales de Colombia. Memoria explicativa del mapa ecológico. Bogotá, Colombia, IGAC-Instituto Geográfico Agustín Codazzi. p. 201.
- Esquivel, C.** (2006). Libélulas de Mesoamerica y el Caribe. San José de Costa Rica: Editorial INBIO. p. 319.
- Eyes-Escalante, M., Rodríguez-Barrios, J., Gutiérrez-Moreno, I. C.** (2012). Descomposición de la hojarasca y su relación con los macroinvertebrados acuáticos del río Gaira (Santa Marta-Colombia). *Acta Biológica Colombiana*. **17** (1): 77-92.
- Garrison, R.W., Von Ellenrieder, N., Louton, J. A.** (2006). *Dragonfly Genera of the New World: An illustrated and annotated key to the Anisoptera*. Baltimore: Johns Hopkins University Press. p. 368.
- Garrison, R.W., Von Ellenrieder, N., Louton, J. A.** (2010). *Damselfly Genera of the New World: An illustrated and annotated key to the Zygoptera*. Baltimore: Johns Hopkins University Press. p. 490.
- Garzón-Sanabria, C. & Realpe, E.** (2009). Diversidad de Odonata (Insecta) en la reserva natural Cabildo-Verde (Sabana de Torres-Santander, Colombia), una aproximación hacia la conservación. *Caldasia*. **31** (2): 459-470.
- González-Soriano, E. & Novelo-Gutiérrez, R.** (2014). Biodiversidad de Odonata en México. *Revista mexicana de biodiversidad*. **85**: 243-251.
- Gómez-Anaya, J. A.** (2008). Ecología de Los ensambles de larvas de odonatos (Insecta), y su uso potencial como indicadores de calidad ecológica en la Sierra de Coalcon, Michoacán, México. Tesis para obtener el título de doctor en Recursos Bióticos. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma de Estado de Hidalgo.
- Granados-Martínez, C. E.** (2013). Análisis de la dieta de los macroinvertebrados bentónicos en un gradiente altitudinal de la cuenca del río Gaira (Sierra Nevada de Santa Marta-Colombia). Universidad del Zulia. Facultad Experimental de Ciencias. Trabajo de Grado Magister Scientiarum en Ciencias Biológicas Mención Ecología Acuática.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC.** (1993). Proyecto Piloto de Ordenamiento Territorial de la Sierra Nevada de Santa Marta, Una Aproximación Metodológica. Santa Fe de Bogotá: IGAC.
- Kalkman, V. J., Clausnitzer, V., Dijkstra, K. D., Orr, A. G., Paulson, D. R., van Tol, J.** (2008). Global diversity of dragonflies (Odonata) in freshwater. *Hidrobiologia*. **595**: 351-363.
- López, D., Espinoza, P., López, M., Valle, S., Rivera, P., García, I.** (1998). Las libélulas (Insecta-Odonata) como biorreguladores de larvas de mosquitos en Nicaragua. *Revista Nicaraguense de Entomología*. **45**: 1-5.
- Mahato, M. & Edds, D.** (1993). Altitudinal distribution of odonate larvae in Nepal's Gandaki river. *Odonatologica*. **22**: 213-221.
- Maibach, A., Meier, C., Dufour, C.** (1987). Atlas de distribution des libellules de Suisse (Odonata) (avec liste rouge). Centre suisse de cartographie de la faune, Neuchâtel.
- McCoy, E. D.** (1990). The distribution of insects along elevational gradients. *Oikos*. **58**: 313-332.
- Manjarrez-García, G. & Manjarrez-Pinzón, G.** (2004). Contribución al conocimiento hidrobiológico de la parte baja de los ríos de la vertiente noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Intropica*. **1**: 39.
- Martínez, G.** (2010). Macroinvertebrados acuáticos como sistema de evaluación de contaminación del balneario Hurtado, río Guatapurí, Valledupar-Cesar. Trabajo de grado de Especialista en Química Ambiental. Universidad Industrial de Santander.
- Mezquita-Aranburu, I.** (2016). Primera cita de *Sympetrum sanguineum* (Müller, 1764) (Odonata, Libellulidae) para Gipuzkoa (País Vasco, España). *Munibe Ciencias Naturales*. **64**: 161-165.
- Novelo-Gutiérrez, R. y Gómez-Anaya J.A.** (2009). A comparative study of Odonata (Insecta) assemblages along an altitudinal gradient in the sierra de Coalcon Mountains, Michoacán, México. *Biodiversity and Conservation*. **18**: 679-698.
- Ocharán, F. J. & Torralba-Burrial, A.** (2004). La relación entre los odonatos y la altitud: el caso de Asturias (Norte de España) y la Península Ibérica (Odonata). *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*. **35**: 103-116
- Palacino-Rodríguez, F.** (2009). Dragonflies (Odonata: Anisoptera) of the collection of the Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle*. **10** (1): 37-41.
- Paulson, D. R.** (2009). *Dragonflies and damselflies of the West*. USA: Princeton University Press. p. 535.
- Pérez-Gutiérrez, L. A.** (2003). Estudio biotaxonomico de los odonatos (Insecta: Odonata Fabricius.1793) del distrito de Santa Marta (Magdalena-Colombia). Tesis de pregrado para optar el título de Biólogo. Universidad del Magdalena. Facultad de Ciencia Básica. Colombia.
- Pérez-Gutiérrez, L.A. & Palacino-Rodríguez, F.** (2011). Updated checklist of the Odonata known from Colombia. *Odonatologica*. **40** (3): 203.
- PROSIERRA - Fundación Pro-Sierra Nevada De Santa Marta.** (1998). Evaluación ecológica rápida: definición para áreas críticas para la conservación en la Sierra Nevada de Santa Marta. Santa Marta: Ministerio del Medio Ambiente, UAESPNN The Nature Conservancy -USAID- Embajada de Japón.
- Ramírez, A.** (2010). Capítulo 5: Odonata. *Revista de Biología Tropical*. **58**: 97-136.
- Roldán, G.** (1988). Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia, Fondo FEN. Medellín, Colombia.
- Rodríguez-Barrios, J. A.** (2011). Descriptores funcionales en un sistema fluvial de montaña. Santa Marta, Colombia. *Disertación doctoral*. Universidad Nacional de Colombia.

- Rúa-García, G., Tamaris-Turizo, C., Zúñiga, M. D.** (2015). Composición y distribución de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera (Insecta) en ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Revista de Ciencias*. **19** (2): 11-29.
- Samways, M. J.** (1989). Taxon turnover in Odonata across a 3000 m altitudinal gradient in southern Africa. *Odonatologica*. **18**: 263-274.
- Sánchez, A., Pérez, J., Jiménez, E., Tovar, C.** (2009). Los Odonatos de Extremadura. Consejería de industria, energía y medio ambiente. Junta de Extremadura, Mérida. p. 344.
- Santos, N.D.** (1981). Odonata. En: Hurlbert, s.h. *et al.* Aquatic Biota of Tropical South America. Part I. Arthropoda. San Diego State University, San Diego, California. p. 323.
- Srygley, R. B.** (2003). Wind drift compensation in migrating dragonflies *Pantala* (Odonata: Libellulidae). *Journal of Insect Behavior*. **16** (2): 217-232.
- Tamaris-Turizo, C., Rodríguez-Barrios, J., Ospina-Torres, R.** (2013). Deriva de macroinvertebrados acuáticos a lo largo del río Gaira, vertiente noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Caldasia*. **35** (1): 149-163.
- Tobías-Loaiza, M.** (2016). Comunidades del orden Odonata en la parte media del río Gaira, Sierra Nevada De Santa Marta, Colombia. Tesis de pregrado para optar el título de Biólogo. Universidad del Magdalena. Facultad de Ciencia Básica. Colombia.
- Unidad Administrativa Especial Parques Nacionales Naturales de Colombia-UAESPNN.** (2005). Plan de Manejo Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta 2005-2009. Ministerio del Medio Ambiente, Santa Marta-Colombia.

# Riqueza y distribución de tricópteros inmaduros del departamento del Chocó, Colombia

 Zuleyma Mosquera-Murillo

Grupo de Limnología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Tecnología del Chocó, Chocó, Colombia

## Resumen

Se presenta un registro preliminar de la riqueza y distribución del orden Trichoptera en el departamento del Chocó a partir de 925 especímenes que reposan en la Colección Limnológica del Chocó - CLCH-Insec (Universidad Tecnológica del Chocó) capturados en 18 municipios (entre los 0 y los 3.202 m s.n.m.), 60 corrientes hídricas de diferente orden y tres ecosistemas lénticos de las cuencas de los ríos Atrato, San Juan y Baudó. Se registran diez de las 15 familias y 20 de los 45 géneros registrados para Colombia. Hydropsychidae es la familia más abundante y de mayor distribución, en tanto que Hydroptilidae e Hydrobiosidae son las de menor distribución y abundancia. La mayor riqueza taxonómica corresponde de familia Hydropsychidae, con cuatro géneros entre los que sobresale *Smicridea* como el más representativo. Los géneros *Oxyethira*, *Celaenotrichia*, *Rhyacopsyche* (Hydroptilidae), *Grumichella* (Leptoceridae) y *Centromacronema* (Hydropsychidae) son nuevos registros para el departamento del Chocó. La mayor riqueza taxonómica se encuentra en la cuenca del río San Juan, seguida por la del Atrato y el Baudó. El sustrato de piedra es el de mayor abundancia y riqueza específica. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Trichoptera; Chocó; CLCH; Colección; Cuenca.

## Richness and distribution of immature caddisflies in the department of Chocó, Colombia

### Abstract

A preliminary report on the richness and distribution of the order Trichoptera in the department of Chocó is presented based on the study of 925 specimens that rest in the Limnological Collection of Chocó - CLCH - Insec (*Universidad Tecnológica del Chocó*) captured in 18 municipalities between 0 and 3,202 msnm in 60 different water currents and three lentic ecosystems in the Atrato, San Juan and Baudó river basins. Ten of the 15 families and 20 of the 45 genera reported for Colombia are registered. Hydropsychidae is the most abundant and widely distributed family while Hydroptilidae and Hydrobiosidae are the least distributed and abundant. The greatest taxonomic richness is registered for Hydropsychidae with four genera, *Smicridea* standing out as the most representative. The genera *Oxyethira*, *Celaenotrichia*, *Rhyacopsyche* (Hydroptilidae), *Grumichella* (Leptoceridae), and *Centromacronema* (Hydropsychidae) are new records for the department of Chocó. The largest taxonomic record corresponds to the San Juan River basin, followed by the Atrato and Baudó basins. The substrate stone registers the greatest abundance and specific richness. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Trichoptera; Chocó; CLCH; Collection; Basin.

## Introducción

El orden Trichoptera pertenece al grupo de órdenes de insectos en los que la totalidad de las especies depende del medio acuático para su desarrollo. Los tricópteros son insectos holo-metábolos que están relacionados con los lepidópteros y los adultos asemejan pequeñas polillas (Holzenthal, *et al.*, 2007a; Springer, 2010a). Las formas inmaduras son generalmente acuáticas y se encuentran comúnmente en ríos, riachuelos, cascadas y lagos (Wiggins, 1996; Merritt, *et al.*, 2008). Se le considera como uno de los más importantes grupos de insectos acuáticos por la diversidad, la abundancia y la distribución biogeográfica de sus especies. Está presente en los ecosistemas acuáticos de todas las regiones

biogeográficas, excepto en la Antártida, y desempeña un papel fundamental en dichos ecosistemas al participar en el flujo de energía y en la dinámica de nutrientes, ya que despliegan una diversidad amplia de adaptaciones tróficas y explotan varios microhábitats (Flint, *et al.*, 1999; Domínguez & Fernández, 2009). Además, se consideran como potencialmente útiles en los estudios sobre la calidad del agua debido a su sensibilidad frente a los cambios físicos y químicos (Valero, *et al.*, 2001; Guevara, *et al.*, 2006).

### Correspondencia:

Zuleyma Mosquera-Murillo; [zuleymamosquera@gmail.com](mailto:zuleymamosquera@gmail.com)

Recibido: 2 de abril de 2019

Aceptado: 12 de junio de 2019

Editor: Gabriel roldan



Una característica bien conocida y llamativa de las larvas es su capacidad de construir refugios o “casitas” (estuches) portátiles utilizando una seda pegajosa producida por una glándula de las partes bucales de la larva y una gran variedad de materiales (Wiggins, 2004; Springer, *et al.*, 2010b). Esta capacidad de las larvas de producir seda ha resultado en una notable variedad de formas de estuches y refugios, y su funcionamiento ha permitido a este orden de insectos explotar exitosamente una gran cantidad de nichos ecológicos en los ecosistemas de agua dulce con mucha exclusividad (Wiggins & Currie, 2008).

A nivel mundial se conocen alrededor de 15.000 especies de tricópteros, pertenecientes a 49 familias y 616 géneros (Holzenthal, *et al.*, 2007a; Morse, 2018). Sin embargo, varias estimaciones proponen que pueden existir más de 50.000 especies de este orden en el mundo (De Moor & Ivanov, 2008) dada la gran cantidad de especies nuevas que se están encontrando, especialmente en países asiáticos, africanos y neotropicales, donde hasta un 75 % de todas las especies recolectadas aún no han sido descritas (Holzenthal, *et al.*, 2007a).

En cuanto a los endemismos de géneros de Trichoptera, la región neotropical ocupa el segundo lugar a nivel mundial, con un 69 % de géneros endémicos, después de la región australiana, donde se ha registrado un 73 % de ellos (De Moor & Ivanov, 2008); se estima que hay 2.234 especies agrupadas en 153 géneros y 24 familias, de las cuales Colombia registra 211 distribuidas en 45 géneros y 15 familias (Posada & Roldán, 2003; Muñoz-Quesada, 2004).

En Colombia se destacan los aportes de los trabajos de Ramírez & Roldán (1989) al conocimiento de los tricópteros inmaduros en ríos de la región del Urabá antioqueño, de Zúñiga, *et al.* (1994) y Ballesteros, *et al.* (1997) en el Valle del Cauca, de Flint, *et al.* (1999) y de Rincón (1999) en la cordillera oriental, de Posada & Roldán (2003) en el noroccidente colombiano, de Guevara, *et al.* (2005), Vásquez, *et al.* (2008) y Vásquez-Ramos, *et al.* (2010, 2013, 2014) en el departamento del Tolima, y de Serna, *et al.* (2015) y Jaimes-Contreras & Granados-Martínez (2016) en la Sierra Nevada de Santa Marta, los cuales se han enfocado en conocer aspectos de su distribución y su relación con la calidad de las aguas. En cuanto a los aspectos taxonómicos, Rincón (2002), Posada & Roldán (2003) y Muñoz-Quesada (2004) han realizado importantes contribuciones al estudio de este orden en Colombia.

En el departamento del Chocó se habían registrado de forma fragmentaria 14 géneros distribuidos en diez familias, presentes en las cuencas de los ríos Atrato y San Juan (Pino, *et al.*, 2003; Bejarano, *et al.*, 2006; Asprilla, *et al.*, 2006; Mosquera, *et al.*, 2006; Salas, *et al.*, 2011; Mosquera & Córdoba, 2015). El presente estudio tuvo como propósito aportar información sobre la riqueza y la distribución de los tricópteros inmaduros en el departamento del Chocó a partir de la revisión de especímenes que se encuentran depositados en la Colección Limnológica del Chocó - CLCH.

## Materiales y métodos

La información taxonómica que se presenta es el resultado de la recopilación y revisión de las larvas del orden Trichoptera depositadas en la Colección Limnológica del Chocó «CLCH-Insec» (Universidad Tecnológica del Chocó), conservadas y preservadas en alcohol etílico al 80 % en recipientes de vidrio de 10 mL. Estos organismos fueron recolectados en el marco del desarrollo de proyectos de grado e investigaciones llevadas a cabo por el Grupo de Limnología de la Universidad Tecnológica del Chocó “UTCH” entre los años 2004 y 2018. Los especímenes estudiados corresponden a estadios inmaduros recolectados de forma cualitativa en diferentes sustratos sumergidos (piedras del lecho, hojarasca, troncos, vegetación ribereña y macrófitas). La identificación taxonómica se realizó en el laboratorio de limnología de la UTCH utilizando las claves de Fernández & Domínguez (2001), Posada & Roldán (2003) y Domínguez & Fernández (2009) y un estereomicroscopio Nikon SMZ 745.

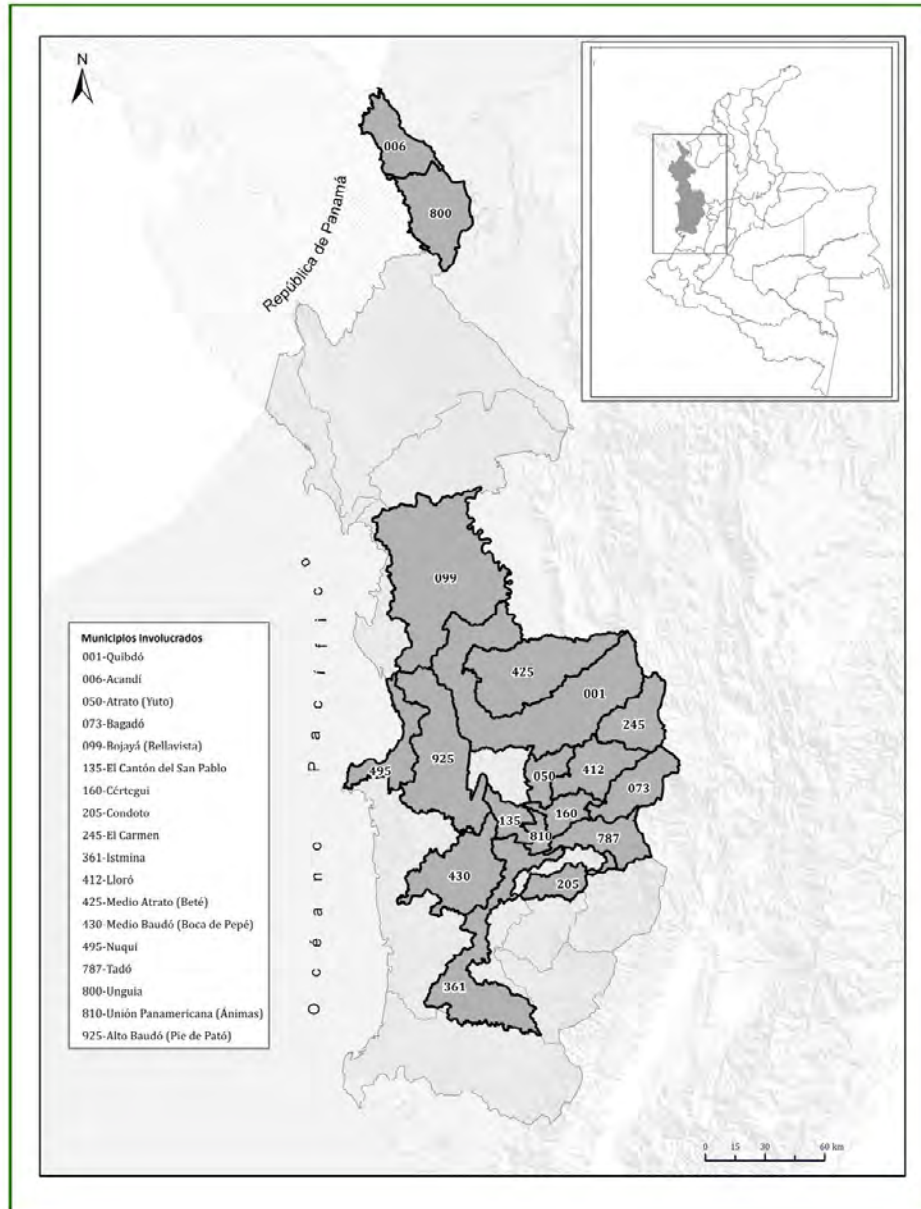
A partir de los datos obtenidos de la colección biológica, se elaboró un mapa con la representación geográfica de las familias y los géneros en el departamento (Figura 1), utilizando el programa ArcGIS, versión 10.5, así como matrices por familias y géneros con sus respectivas abundancias, altitudes y distribución por sustratos con la ayuda del programa Microsoft Excel 2013. Con este mismo programa se calcularon y graficaron los datos sobre la abundancia relativa.

## Resultados y discusión

### *Composición faunística y abundancia de los tricópteros.*

Los datos de los 925 ejemplares del orden Trichoptera analizados permitieron registrar tres subórdenes, diez familias y 20 géneros de forma preliminar para el departamento del Chocó (Tabla 1), de los cuales *Oxyethira*, *Celaenotrichia* y *Rhyacopsyche* (Hydroptilidae), *Grumichella* (Leptoceridae), *Cyrnellus* (Polycentropodidae) y *Centromacronema* (Hydropsychidae) se registraron por primera vez para el Chocó. Los organismos se recolectaron en 60 corrientes hídricas de diferente orden y tres ecosistemas lénticos de las cuencas de los ríos Atrato, San Juan y Baudó, ubicados en 18 municipios del departamento entre los 0 y los 3.202 m s.n.m. (Figura 1) (Tabla 2). Estos resultados constituyen un aporte muy significativo para el estudio de la diversidad regional y nacional de este grupo, puesto que se presentan 10 de las 15 familias y 20 de los 45 géneros registrados para Colombia por Posada & Roldán (2003) y Muñoz-Quesada (2004).

De las diez familias presentes en la Colección Limnológica del Chocó, Hydropsychidae es la que presenta el mayor número de organismos, con el 68,65 %, así como la mayor riqueza, con cinco géneros, seguida de lejos por Leptoceridae (7,28 %) y Philopotamidae (6,30 %), mientras que el menor número de organismos se presenta en la familia Hydrobiosidae (1,08 %) (Figura 2). Esta mayor abundancia



**Figura 1.** División política del departamento de Chocó (Colombia); las áreas representadas en la colección aparecen en un tono más oscuro.

de las familias Hydropsychidae y Leptoceridae coincide con lo registrado en otros estudios realizados en el Chocó (Bejarano, *et al.*, 2006; Mosquera, *et al.*, 2006; Mosquera & Córdoba, 2015; Mosquera-Murillo & Mosquera-Mosquera, 2017), en Colombia (Posada, *et al.*, 2000; Muñoz-Quesada, 2000, 2004; Guevara-Cardona, *et al.*, 2007; García, *et al.*, 2009; Vásquez-Ramos, *et al.*, 2010; Zúñiga, *et al.*, 2013) y en el Neotrópico (Stein, *et al.*, 2008; Angrisano & Sganga, 2009; Springer, *et al.*, 2010b).

Hydropsychidae es una de las familias dominantes en aguas corrientes, tanto por su abundancia como por su diversidad (Dominguez & Fernández, 2009), y se encuentra casi siempre en la zona de corrientes moderadas a fuertes (incluso en paredes de cascadas), donde las diversas especies

filtran la materia orgánica en suspensión y pueden ser localmente muy abundantes (Springer, 2010a). Otro aspecto importante es su capacidad para sobrevivir en diferentes tipos de hábitats que ofrezcan el sustrato necesario, como rocas, piedras, hojas, arena y grava, así como su tolerancia frente a aguas con un poco de perturbación (Duarte, 2014).

Si bien las familias Hydroptilidae y Polycentropodidae no son muy abundantes en la Colección Limnológica del Chocó, se hallan entre las de mayor riqueza, con cuatro y tres géneros, respectivamente (Figura 2). La familia Hydroptilidae es una de las más diversas del orden, con 37 géneros y cerca de 940 especies para la región neotropical (Holzenthal & Calor, 2017), está presente en todas las regiones del mundo y en todos los pisos altitudinales en ecosistemas

lóticos, donde coloniza diversos tipos de sustratos (Oliveira, *et al.*, 2005; De Moor & Ivanov, 2008; Vásquez, *et al.*, 2008; Gómez-Aguirre, *et al.*, 2009; Springer, 2010a). La familia Polycentropodidae, por su parte, es frecuente en ambientes lénticos y lóticos, sobre todo en pozas de ríos o áreas de corriente lenta, en donde los ejemplares instalan redes de seda en forma de tubo o trompeta con abertura en ambos extremos, aunque también se pueden localizar en

**Tabla 1.** Listado taxonómico, abundancia relativa y registro de nuevos géneros del orden Trichoptera para el departamento del Chocó a partir de ejemplares depositados en la Colección Limnológica del Chocó - CLCH

Taxón	Abundancia relativa (%)	Registro
Suborden Spicpalpia		
<b>Hydrobiosidae</b>		
<i>Atopsyche</i> Banks, 1905	1,08	
<b>Glossosomatidae</b>		
<i>Culoptila</i> Mosely, 1954	4,13	
<b>Hydroptilidae</b>		
<i>Ochrotrichia</i> Mosely, 1934	3,68	
<i>Oxyethira</i> Eaton, 1873	0,76	Nuevo
<i>Rhyacopsyche</i> Müller, 1879	0,32	Nuevo
<i>Celaenotrichia</i> Mosely, 1934	0,32	Nuevo
Suborden Annulipalpia		
<b>Hydropsychidae</b>		
<i>Smicridea</i> McLachlan, 1871	62,59	
<i>Leptonema</i> Guérin, 1843	2,16	
<i>Macronema</i> Pictet, 1836	1,73	
<i>Macrostemum</i> Kolenati, 1859	1,95	
<i>Centromacronema</i> Ulmer, 1905	0,22	Nuevo
<b>Philopotamidae</b>		
<i>Chimarra</i> Stephens, 1829	6,27	
<b>Polycentropodidae</b>		
<i>Polyplectropus</i> Ulmer, 1905	1,08	
<i>Polycentropus</i> Curtis, 1835	0,32	
<i>Cyrnellus</i> Banks, 1913	1,19	
Suborden Integripalpia		
<b>Calamoceratidae</b>		
<i>Phylloicus</i> Müller, 1880	1,51	
<b>Helicopsychidae</b>		
<i>Helicopsyche</i> Siebold, 1856	1,95	
<b>Leptoceridae</b>		
<i>Nectopsyche</i> Müller, 1879	5,84	
<i>Grumichella</i> Müller, 1879	1,41	Nuevo
<b>Odontoceridae</b>		
<i>Marilia</i> Müller, 1880	1,51	

tubitos de seda debajo de las rocas de los ríos, asociados con sustratos rocosos o madera sumergida (Springer, 2006; Holzenthal & Calor, 2017).

A nivel de géneros, *Smicridea* es el de mayor abundancia (62,93 %), seguido de *Chimarra* (6,30 %) y *Nectopsyche* (5,87 %) (Tabla 1). Las larvas de *Smicridea* construyen refugios fuertes y se adhieren a sustratos como las piedras, la grava y las macrófitas (Springer, 2010a; Vásquez-Ramos, *et al.*, 2010; Vásquez-Ramos, *et al.*, 2014), lo que incide positivamente en su capacidad para colonizar diferentes tipos de sustrato y, unido a su tolerancia a la contaminación, lo convierte en un género muy frecuente y abundante en las recolecciones (Roldán, 2003).

**Distribución de los tricópteros.** De las tres principales cuencas del departamento del Chocó, los municipios de la cuenca del río San Juan son los que registran el mayor número de individuos del orden Trichoptera en la Colección Limnológica, con un 60,43 %, representados en 10 familias y 16 géneros; le siguen los municipios pertenecientes a la cuenca del río Atrato, con el 37,30 %, nueve familias y 19 géneros, y los de la cuenca del río Baudó, con el 1,09 %, tres familias y cuatro géneros, en tanto que se registran tres familias y cinco géneros en microcuencas pericontinentales que fluyen directamente al océano Pacífico (1,20 %) (Tabla 2). El hecho de que por distintos factores, como dificultades de acceso y de orden público en los últimos años, en el departamento del Chocó no se puedan estudiar algunas áreas y existan localidades inexploradas, explica las diferencias en abundancia y riqueza encontradas entre los municipios de las cuencas representadas en la Colección Limnológica.

Entre las familias presentes en la Colección Limnológica, Hydropsychidae, con los géneros *Smicridea* y *Leptonema*, es la de mayor distribución, al encontrarse en 13 y nueve municipios, respectivamente, seguida de Calamoceratidae, con el género *Phylloicus* (Tabla 2). Esta distribución particularmente amplia de los géneros *Smicridea* y *Leptonema*, se ha registrado en otras investigaciones sobre este orden de insectos en el país, como las de Bejarano, *et al.* (2006), Mosquera, *et al.* (2006), López (2007), Vásquez-Ramos, *et al.* (2010) y Serna, *et al.* (2015). Según Rincón (1999), la familia Hydropsychidae posee un amplio rango de distribución, ya que se encuentra asociada a ríos y quebradas con diferentes corrientes y temperaturas; además, según López-Delgado, *et al.* (2015), los miembros de esta familia pueden tolerar grandes cambios en las condiciones ambientales, además de su capacidad para construir redes extensas de seda que les permiten fijarse al sustrato y capturar gran cantidad de alimento, lo que favorece su amplia distribución.

Desde el punto de vista altitudinal, los géneros que presentan los rangos más amplios son *Smicridea*, *Atopsyche* y *Polycentropus* (Tabla 2); no obstante, se amplía el rango altitudinal en el país para todos los géneros registrados, pues se han encontrado en localidades por debajo de los 100 m. Diversas investigaciones en Colombia evidencian la amplia

**Tabla 2.** Distribución de las familias y géneros de Trichoptera en los municipios del Chocó, ubicación por macrocuenca y rango de altura

Taxón	Distribución en el Chocó	Cuenca	Rango de altura (m s.n.m.)
<b>Hydrobiosidae</b>			
<i>Atopsyche</i>	Qb, Ba, Cda, Ta	Río Atrato, río San Juan	90 – 3202
<b>Glossosomatidae</b>			
<i>Culoptila</i>	Qb, Ta, Up, Is, Co, Mb	Río Atrato, río San Juan, río Baudó	53 – 138
<b>Hydroptilidae</b>			
<i>Ochrotrichia</i>	Qb, Ta, Up	Río Atrato, río San Juan	90 – 103
<i>Oxyethira</i>	Qb, Ta	Río Atrato, río San Juan	90 – 96
<i>Rhyacopsyche</i>	Qb	Río Atrato	90
<i>Celaenotrichia</i>	Qb	Río Atrato	96
<b>Hydropsychidae</b>			
<i>Smicridea</i>	Qb, Ce, At, Llo, Ba, Cda, Ta, Up, Is, Co, Cdp, Mb, Nu	Río Atrato, río San Juan, río Baudó, Pacífica +	32 – 3202
<i>Leptonema</i>	Qb, Ce, Cda, Ta, Is, Co, Cdp, Mb, Nu	Río Atrato, río San Juan, río Baudó, Pacífica +	32 – 2014
<i>Macronema</i>	Qb, At, Up, Is, Co, Cdp, Ac	Río Atrato, río San Juan, Pacífica +	0 – 133
<i>Centromacronema</i>	Qb	Río Atrato	90
<i>Macrostemum</i>	Qb, At, Ta, Is, Co	Río Atrato, río San Juan	37 – 96
<b>Philopotamidae</b>			
<i>Chimarra</i>	Ta, Up, Is, Co, Nu	Río San Juan, Pacífica +	32 – 138
<b>Polycentropodidae</b>			
<i>Polyplectropus</i>	Un, Ta, Up, Is	Río San Juan	5 – 133
<i>Polycentropus</i>	Bag, Up	Río Atrato, río San Juan	93 – 3202
<i>Cyrnellus</i>	Qb, Un, Bo, Ta, Is	Río Atrato, río San Juan	5 – 133
<b>Calamoceratidae</b>			
<i>Phylloicus</i>	Qb, Ma, Ta, Up, Is, Co, Cdp, Ab, Nu	Río Atrato, río San Juan, río Baudó, Pacífica +	5 – 133
<b>Helicopsychidae</b>			
<i>Helicopsyche</i>	Qb, At, Ta, Cdp	Río Atrato, río San Juan	49 – 96
<b>Leptoceridae</b>			
<i>Nectopsyche</i>	Qb, At, Ca, Ta, Is, Cdp, Mb	Río Atrato, río San Juan, río Baudó	44 – 2180
<i>Grumichella</i>	Qb, At	Río Atrato	72 – 90
<b>Odontoceridae</b>			
<i>Marilia</i>	Qb, Ta, Up	Río Atrato, río San Juan	47 – 138

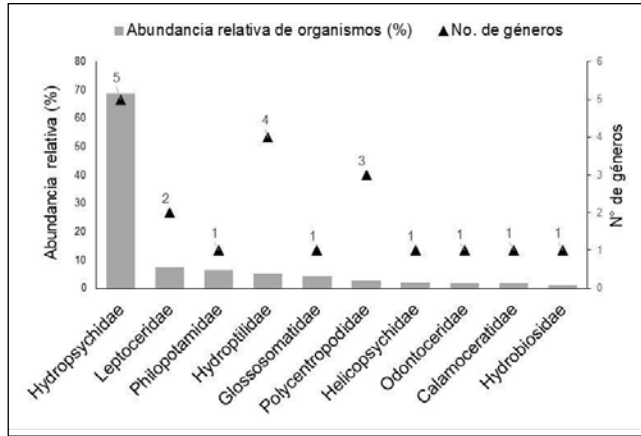
+ Microcuenca pericontinental; Qb: Quibdó, Ce: Cértegui, At: Atrato, Llo: Lloró, Un: Unguía, Bo: Bojayá, Ma: Medio Atrato, Ba: Bagadó, Cda: Carmen de Atrato, Ta: Tadó, Up: Unión Panamericana, Is: Istmina, Co: Condoto, Cdp: Cantón de San Pablo, Ab: Alto Baudó, Mb: Medio Baudó, Nu: Nuquí, Ac: Acandí

distribución altitudinal del género *Smicridea* (Rincón, 1999; Guevara, 2004; Vázquez-Ramos, et al., 2010; López-Delgado, et al., 2015; Serna, et al., 2015), mientras que *Atopsyche* y *Polycentropus* se encuentran más restringidos a ciertas zonas del país (Posada & Roldán, 2003; Guevara, et al., 2005; López, 2007).

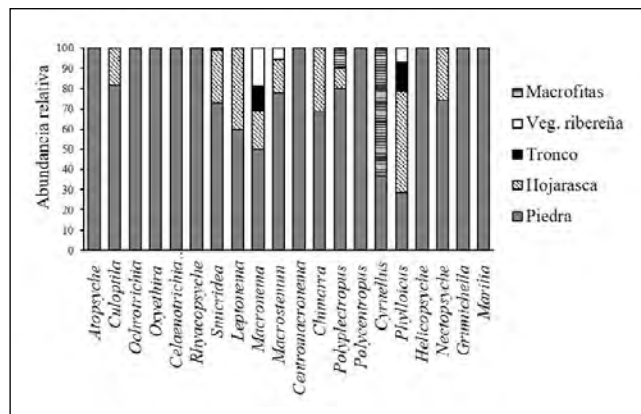
En general, la distribución de los tricópteros es el resultado de un gran número de variables físicas, químicas y ecológicas (López, et al., 2015). Bonada (2003) encontró que la altitud es uno de los principales factores que explican la presencia de tricópteros; así mismo, Marchant, et

al. (1995) han sugerido que la altitud afecta indirectamente la distribución de los macroinvertebrados acuáticos debido a los cambios en la temperatura del agua y el contenido de oxígeno.

Los ejemplares del orden Trichoptera examinados, se encontraron asociados con cinco sustratos: piedras del lecho, hojarasca, troncos, vegetación ribereña y macrófitas, siendo las piedras del lecho el sustrato que registra el mayor número de familias y géneros, con 10 y 18, respectivamente, seguido de la hojarasca, con seis familias y nueve géneros, los troncos, con dos familias y tres géneros, y la vegetación



**Figura 2.** Abundancia relativa y riqueza genérica de familias del orden Trichoptera registradas en la Colección Limnológica del Chocó (CLCH-Insec)



**Figura 3.** Distribución por sustratos de géneros de tricópteros presentes en la Colección Limnológica del Chocó

riberaña, con dos familias y cuatro géneros, en tanto que en las macrófitas se presenta el menor número, con una familia y dos géneros (Figura 3). Según **Holzenthall, et al.** (2007b), los tricópteros se han adaptado para colonizar diferentes sustratos, los cuales utilizan en la confección de sus refugios, bien sea con materiales individualizados o mixtos de origen natural o antropogénico (restos de materiales inorgánicos y desechos), y para capturar alimento de una manera más eficiente, por lo que la presencia de una gran variedad de sustratos favorece su establecimiento y colonización (**Motta & Uieda, 2004; Angrisano & Sganga, 2009; Vásquez-Ramos, et al., 2010**). Lo anterior coincide con las características de los cuerpos de agua presentes en las áreas representadas en la colección, la mayoría de los cuales es rica en una variedad de sustratos orgánicos e inorgánicos, sobre todo hojarasca, como resultado de la alta cobertura boscosa existente en la región del Chocó, que aumenta la oferta de microhábitats colonizables por la fauna de tricópteros.

Los resultados de este trabajo constituyen un gran aporte al conocimiento taxonómico y sobre la distribución de los tricópteros en el departamento del Chocó y en el país; además, se pone en evidencia la enorme diversidad del orden en la región, por lo que se espera que con el aumento de los estudios taxonómicos de la fauna de tricópteros, el número de taxones registrados se incremente considerablemente.

**Agradecimientos**

La autora agradece al laboratorio de limnología, a la Vicerrectoría de Investigaciones y al Centro de Investigación en Biodiversidad y Hábitat “CEIBHA” de la Universidad Tecnológica del Chocó, por el apoyo económico que facilitó la organización y la creación de la Colección Limnológica del Chocó, a partir de la cual se generó la información que se presenta en este artículo, y a las biólogas Yasiris Salas Tovar (Q.E.P.D.), Karen Córdoba, Sandra Sánchez y a la estudiante Karen Palomeque, por su participación en la organización de la colección y el trabajo de laboratorio.

**Conflicto de intereses**

La autora declara que no existen conflictos de intereses que pongan en riesgo la validez de los resultados presentados.

**Referencias**

**Angrisano, E. B., Sganga, J. V.** (2009). Trichoptera. En: E. Domínguez y H.R. Fernández (Eds.). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología (pp. 255-308). San Miguel de Tucumán, Argentina: Fundación Miguel Lillo.

**Asprilla, S., Mosquera-Murillo, Z., Rivas, M.** (2006). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad ecológica del agua en la parte media del río Cabí (Quibdó-Chocó). *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*. **18**: 43-50.

**Ballesteros, Y., Zúñiga, M. del C., Rojas, A.** (1997). Distribution and structure of the order Trichoptera in various drainages of the Cauca River basin, Colombia and their relationship to water quality. *Proceedings of the 8th International Symposium on Trichoptera* (19-23). Perugia, Italia: Ohio Biological Survey.

**Bejarano, D., Palacios, E. D., Mosquera-Murillo, Z.** (2006). Evaluación de la calidad del agua por medio de la comunidad de tricópteros (Insecta) durante los periodos de aguas altas y bajas en la quebrada la Francisca, Quibdó - Chocó - Colombia. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó*. **25**: 59-64.

**Bonada, N.** (2003). Ecology of the macroinvertebrate communities in Mediterranean rivers at different scales and organization levels. Tesis de Doctorado. Universidad de Barcelona. p. 355.

**De Moor, F. C., Ivanov, V. D.** (2008). Global diversity of caddisflies (Trichoptera: Insecta). *Hydrobiologia*. **595**: 393-407.

**Domínguez, E., Fernández, H. R. (Ed.)**. (2009). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Fundación Miguel Lillo, Tucumán, Argentina. p. 656.

**Duarte, R.E.J.** (2014). Análisis faunístico de las larvas de insectos del orden Trichoptera en la cuenca del río Alvarado, departamento del Tolima. Universidad del Tolima. Facultad de Ciencias Básicas. Programa de Biología. Ibagué-Tolima. p. 118.

- Fernández, H., Domínguez, E.** (2001). Guía para la determinación de los artrópodos bentónicos sudamericanos. Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto M. Lillo, Tucumán. p. 282.
- Flint, O.S. (Jr), Holzenthal, R.W., Harris, S.C.** (1999). Catalog of the Neotropical caddisflies (Insecta: Trichoptera). Ohio Biological Survey. College of Biological Sciences. The Ohio State University. Columbus Ohio. USA. p. 239.
- García, J.F., Cantera, J., Zúñiga, M.C., Montoya, J.** (2009). Estructura y diversidad de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en la cuenca baja del río Dagua (Andén Pacífico Vallecaucano-Colombia). *Revista de Ciencias de la Universidad del Valle*. **13**: 27-48.
- Gómez-Aguirre, A.M., Longo-Sánchez, M.C., Blanco, J.F.** (2009). Macroinvertebrate assemblages in Gorgona Island streams: Spatial patterns during two contrasting hydrologic periods. *Actual Biol*. **31** (91): 161-178.
- Guevara, G.** (2004). Análisis faunístico del orden Trichoptera en su estado larval en la cuenca del río Coello, departamento del Tolima. (Tesis de Maestría). Universidad del Tolima, Tolima-Colombia.
- Guevara, G., Reynoso, G., Villa, F.** (2005). Estudio del orden Trichoptera en su estado larval en la cuenca del río Coello departamento del Tolima. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*. **17** (1): 59-70.
- Guevara, G., Reynoso, G., Villa-Navarro, F.** (2006). Caddisfly larvae (Insecta: Trichoptera) of the Coello River basin in Tolima (Colombia): Spatial and temporal patterns and bioecological aspects. *Proceedings of the XIIth International Symposium on Trichoptera, Mexico, D.F.*
- Guevara-Cardona, G., López-Delgado, E.O., Reinoso-Flórez, G., Villa-Navarro, F.** (2007). Structure and distribution of the Trichoptera fauna in a Colombian Andean river basin (Prado, Tolima) and their relationship to water quality. En: J. Bueno-Soria, R. Barba-Álvarez, y B. Armitage (Eds.). *Proceedings of the XIIth International Symposium on Trichoptera* (pp. 129-134). Columbus, Ohio: The Caddis Press.
- Holzenthal, R. W., Blahnik, R. J., Prather, A. L., Kjer, K. M.** (2007a). Order Trichoptera Kirby, 1813 (Insecta), Caddisflies. *Zootaxa*. **1668**: 639-698.
- Holzenthal, R.W., Blahnik, R.J., Prather, A.L., Kjer, K.M.** (2007b). Order Trichoptera Kirby, 1813 (Insecta), Caddisflies: 638-698. En Shang, Z. Q. & Shear, W. A. (Eds.). *Linnaeus Tercentenary: Progress in Invertebrate Taxonomy*. *Zootaxa*. 1668.
- Holzenthal, R. W., Calor A. R.** (2017). Catalog of the Neotropical Trichoptera (Caddisflies). *ZooKeys*. **654**: 1-566.
- Jaimes-Contreras, A.M., Granados-Martínez, C.** (2016). Tricópteros asociados a siete afluentes de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. **87**: 436-442.
- López, E.** (2007). Análisis faunístico de las larvas del orden Trichoptera en la cuenca del río Prado y la subcuenca de Amoyá (Tolima-Colombia). Trabajo de grado (Biólogo). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Ibagué. p. 176.
- López-Delgado, E.O., Vásquez-Ramos, J.M., Reinoso-Flórez, G.** (2015). Listado taxonómico y distribución de los tricópteros inmaduros del departamento del Tolima. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **39**: 42-49.
- Marchant, R., Barmuta, L.A., Chessman, B.C.** (1995). Preliminary study of the ordination and classification of macroinvertebrate communities from running waters in Victoria, Australia. *Aust. J. Mar. Freshwat. Res.* **45**: 945-962.
- Merritt, R. W., Cummins, K. W., Berg, M. B.** (2008). *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Dubuque, Kendall/Hunt. Publishing Company. 1214 p.
- Morse, J. C.** (2018). Trichoptera World Checklist. Fecha de consulta: 20 de noviembre de 2018. Consultado en: <https://entweb.sites.clemson.edu/database/trichopt/>
- Mosquera, Z., Bejarano, D., Asprilla, S.** (2006). Estudio del orden Trichoptera (Insecta) en dos ecosistemas lóticos del municipio de Quibdó, Chocó - Colombia. Libro de la Asociación Colombiana de Limnología. **1**: 85-91.
- Mosquera-Murillo, Z., Córdoba-Aragón, K. E.** (2015). Caracterización de la entomofauna acuática en cuatro quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **39** (150): 67-76.
- Mosquera-Murillo, Z., Mosquera-Mosquera, M. M.** (2017). Diversidad de la entomofauna acuática y calidad de agua en quebradas del río San Juan, Chocó - Colombia. *Revista UDCA Actualidad y divulgación Científica*. **20** (1): 149-161.
- Motta, R. L., Uieda, V. S.** (2004). Diet and trophic groups of an aquatic insect community in a tropical stream. *Brazilian Journal of Biology*. **64**: 809-817.
- Muñoz-Quesada, F.** (2000). Especies del orden Trichoptera (Insecta) en Colombia. *Biota Colombiana*. **1**: 267-288.
- Muñoz-Quesada, F.** (2004). El orden Trichoptera (Insecta) en Colombia, II: inmaduros y adultos, consideraciones generales. En F. Fernández, M. G. Andrade, y G. Amat (Eds.) *Insectos de Colombia Vol III*. (pp. 319-349). Universidad Nacional de Colombia-Instituto Humboldt. Bogotá, D.C.
- Oliveira, A. M., Hamada, N., Nessimian, J. L.** (2005). Chaves de identificação de larvas para famílias e gêneros de Trichoptera (Insecta) da Amazônia central, Brasil. *Revista Brasileira de Entomologia*. **49** (2): 181-204.
- Pino, W., Mena, D., Mosquera, M., Caicedo, K., Palacios, J., Castro, A., Guerrero, J.** (2003). Diversidad de macroinvertebrados y evaluación de la calidad del agua de la quebrada La Bendición, municipio de Quibdó (Chocó, Colombia). *Acta Biológica Colombiana*. **8**: 23-30.
- Posada, J.A., Roldán, G., Ramírez, J.J.** (2000). Caracterización fisicoquímica y biológica de la calidad de aguas de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Revista de Biología Tropical*. **48**: 59-70.
- Posada, J.A., Roldán, G.** (2003). Clave ilustrada y diversidad de las larvas de Trichoptera en el noroccidente de Colombia. *Caldasia*. **25** (1): 169-192.
- Ramírez, J.J., Roldán, G.** (1989). Contribución al conocimiento limnológico y de los macroinvertebrados acuáticos de algunos ríos de la región del Urabá antioqueño. *Actualidades Biológicas*. **18** (66): 113-121.
- Rincón, M. E.** (1999). Estudio preliminar de la distribución altitudinal de los Trichoptera de la cordillera oriental colombiana: 267-284. En Andrade, G., Fernández, F. & Amat, G. (Eds.) *Insectos de Colombia Vol. II*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Bogotá, D.C.
- Rincón, M. E.** (2002). Comunidad de insectos acuáticos de la quebrada Mamarramos (Boyacá, Colombia). *Revista Colombiana de Entomología*. **28** (1): 101-108.

- Roldán, G.** (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Uso del método BMWP/Col. Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. 170 p.
- Salas, Y., Geovo, S., Asprilla, S.** (2011). Caracterización de las comunidades perifíticas y de macroinvertebrados acuáticos presentes en el río Pacurita, corregimiento de Pacurita, Quibdó-Chocó-Colombia. *Revista Biodiversidad Neotropical*. **2**: 98-104.
- Serna, D. J. M., Tamaris-Turizo, C. E., Gutiérrez Moreno, L. C.** (2015). Distribución espacial y temporal de larvas de Trichoptera (Insecta) en el río Manzanares, Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). *Rev. Biol. Trop.* **63** (2): 465-477.
- Springer, M.** (2006). Clave taxonómica para larvas de las familias del orden Trichoptera (Insecta) de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* **54** (1): 273-286.
- Springer, M.** (2010a). Trichoptera. *Rev. Biol. Trop.* **58** (Suppl. 4): 151-198.
- Springer, M., Ramírez, A., Hanson, P. (Eds.)** (2010). Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica I. *Revista de Biología Tropical*. **58** (suplemento 4): 1-38.
- Springer, M., Serrano-Cervantes, L., Zepeda-Aguilar, J. A.** (2010b). Guía ilustrada para el estudio ecológico y taxonómico de los insectos acuáticos inmaduros del orden Trichoptera en El Salvador. Manual. Editorial Universitaria, San Salvador. p. 47.
- Stein, H., Springer, M., Kohlmann, B.** (2008). Comparison of two sampling methods for biomonitoring using aquatic macroinvertebrates in the Dos Novillos River, Costa Rica. *Ecological Engineering*. **34**: 267-275.
- Valero, L., Durant, P., Arellano, E.** (2001). Trichoptera como indicadora de calidad de agua. Río Albarregas. Mérida, Venezuela. *Revista de Ecología se amplía el rango altitudinal en el país Latinoamericana*. **8**: 11-16.
- Vásquez, J., Ramírez, F., Reinoso, G., Guevara, G.** (2008). Hydroptílicos (Trichoptera) de la cuenca del río Totare, Tolima-Colombia. En E. Peña, J. Cantera, M. Zúñiga, S. Duque, E. Londoño, L. Aguirre, B. Albán, P. Bedoya & D. Santofimio (Eds.). *Resúmenes del VIII Seminario Colombiano de Limnología y I Reunión Internacional de Cuenas Bajas y Zonas Estuarinas*. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali.
- Vásquez-Ramos, J., Ramírez-Díaz, F., Reinoso-Flórez, G.** (2010). Distribución espacial y temporal de los tricópteros inmaduros en la cuenca del río Totare (Tolima-Colombia). *Caldasia*. **32** (1): 129-148.
- Vásquez-Ramos, J., Guevara-Cardona, G., Reinoso-Flórez, G.** (2013). Impactos de la urbanización y agricultura en cuencas con bosque seco tropical: influencia sobre la composición y estructura de larvas de tricópteros. *Rev. Asoc. Colomb. Cienc.* **25** (1): 61-70.
- Vásquez-Ramos, J., Guevara-Cardona, G., Reinoso-Flórez, G.** (2014). Factores ambientales asociados con la preferencia de hábitat de larvas de tricópteros en cuencas con bosque seco tropical (Tolima, Colombia). *Revista de Biología Tropical*. **62** (Supl. 2): 21-40.
- Wiggins, G. B.** (1996). Larvae of the north American Caddisfly Genera (Trichoptera). University of Toronto Press, Toronto. p. 472.
- Wiggins, G. B.** (2004). Caddisflies: The underwater architects. University of Toronto Press, Toronto. 292 p.
- Wiggins, G.B., Currie, D.C.** (2008). Trichoptera. Chapter 17. pp. 439-552. En Merritt, R.W., K.W. Cummins & M.B. Berg. (Eds). 2008. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Kendall & Hunt Publishing Co. Dubuque, Iowa, EE.UU.
- Zúñiga-de Cardoso, M. del C., Rojas-de Hernández, A.M., Serrato-Hurtado, C.** (1994). Interrelación de indicadores ambientales de calidad de cuerpos de agua superficiales del Valle del Cauca. *Revista Colombiana de Entomología*. **20** (1): 124-130.
- Zúñiga, M. C., Chará, J., Giraldo, L. P., Chará-Serna, A. M., Pedraza, G. X.** (2013). Composición de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en pequeñas quebradas de la región andina colombiana, con énfasis en la entomofauna. *Dugesiana*. **20**: 263-277.

# Comparación de métodos de inoculación de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen, causante del marchitamiento vascular del tomate

✉ Luisa Fernanda Cardona-Piedrahíta<sup>1,\*</sup>, ✉ Jairo Castaño-Zapata<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal, UNISARC, Santa Rosa de Cabal, Risaralda, Colombia

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

## Resumen

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.), la hortaliza de mayor importancia en Colombia y en el mundo, es atacada por numerosas enfermedades, entre ellas la marchitez vascular causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. La enfermedad produce pérdidas entre el 21 y el 47 % en cultivos en exposición libre y bajo cubierta. El objetivo del presente trabajo fue comparar cuatro métodos de inoculación del hongo en plántulas de tomate Sweet Million obtenidas a partir de semilla, sembradas en turba canadiense estéril y medio Murashige & Skoog (MS) y conservadas en condiciones controladas en el Laboratorio de Tejidos Vasculares y del cuarto de termoterapia de la Universidad de Caldas donde se seleccionaron 25 plántulas por cada método de inoculación. Los tratamientos fueron: inyección en la corona de la raíz (T<sub>1</sub>), inmersión de las raíces (T<sub>2</sub>), disco de agar en la corona de la raíz (T<sub>3</sub>) e inoculación *in vitro* (T<sub>4</sub>). En la incidencia final de la enfermedad, así como las pruebas comparativas de Duncan, se registraron diferencias significativas ( $p \leq 0,001$ ) entre los diferentes métodos de inoculación. La única metodología que produjo el 100 % de incidencia del marchitamiento vascular en un menor periodo de incubación fue la inoculación *in vitro*. La mayor tasa de desarrollo (r) del marchitamiento vascular se reportó con el método de inoculación *in vitro* con una tasa de  $r=0,92$ , seguido por los discos de agar, la inmersión y la inyección, siendo estas dos últimas las de menor tasa de desarrollo. El método de inoculación *in vitro* puede ser útil para la selección masiva de materiales de tomate promisorios contra la marchitez vascular. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** *Fusarium*; Forma especial; Nectriaceae; Hortaliza; Solanaceae; *in vitro*.

**Comparison of inoculation methods of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Sacc. (Snyder & Hansen), the causal agent of the vascular wilt of tomato**

## Abstract

Tomato (*Solanum Lycopersicum* L.), the most important vegetable in Colombia and worldwide, is attacked by numerous diseases, among them, the vascular wilting caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. The disease can cause losses between 21 and 47% in full exposure and under cover crops. The objective of this work was to compare four inoculation methods of this fungus in seedlings of the Sweet Million cultivar obtained from seeds and planted in sterilized Canadian peat and in MS medium and maintained under controlled conditions at the Laboratory of Tissue Culture and thermotherapy room of the Universidad de Caldas where 25 seedlings were selected per method of inoculation. The treatments were: Injection in the crown root (T<sub>1</sub>), immersion of the roots (T<sub>2</sub>), agar disc in the crown root (T<sub>3</sub>), and inoculation *in vitro* (T<sub>4</sub>). The final disease incidence and the comparative tests of Duncan showed highly significant differences ( $p \leq 0.001$ ) among the different methods of inoculation. The only method that induced a 100% incidence of the vascular wilt in the shortest period of incubation was the *in vitro* method. The highest rate of disease development (r) was obtained with the *in vitro* inoculation method ( $r=0.92$ ) followed by agar discs, immersion, and injection. The *in vitro* inoculation method can be useful for the massive selection of tomato materials promising against vascular wilt. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** *Fusarium*; Formae special; Nectriaceae; Vegetable; Solanaceae; *in vitro*.

## \*Correspondencia:

Luisa Fernanda Cardona-Piedrahíta; [luisa.cardona@unisarc.edu.co](mailto:luisa.cardona@unisarc.edu.co); **Recibido:** 11 de marzo de 2019; **Aceptado:** 26 de abril de 2019

**Editor:** Elizabeth Castañeda



## Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas más consumidas en el mundo; su producción en el 2017 fue de 241.641.489 t (FAOSTAT, 2017). Se cultiva en más de 100 países para consumo fresco e industrial; el 81 % de la producción se concentra en China, India, Estados Unidos, Turquía, Egipto, Irán, Italia, España, México y Brasil (FAOSTAT, 2017). El consumo promedio en países desarrollados es de 86 g diarios per cápita y en países en vía de desarrollo, 27 g. Colombia produjo 714.314 t en el 2017, con un rendimiento promedio de 33,94 t/ha. El rendimiento promedio mundial es de 55,27 t/ha, cifra por debajo de la obtenida en áreas con mayor rendimiento y gran tecnificación como Bélgica (496 t/ha), Reino Unido (388,95 t/ha) y Noruega (320,39t/ha) (FAOSTAT, 2017).

El tomate tiene su origen en la región andina que se extiende desde el sur de Colombia al norte de Chile (Rick, 1974), lo que explica la cantidad de patógenos que limitan su producción; además, del incremento del área sembrada y la popularización del monocultivo, en Colombia se reportan 48 enfermedades importantes, entre las cuales se encuentra la marchitez vascular, la cual es causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder & Hansen, una de las más de 100 formas especiales que se conocen de *Fusarium oxysporum*, de amplia distribución mundial (Gordon, 2017). Este hongo pertenece al reino Fungi, división Ascomycota, subdivisión Pezizomycotina, clase Sordariomycetes, subclase Hypocreomycetidae, orden Hypocreales, familia Nectriaceae, género *Fusarium* (Mycobank, 2017).

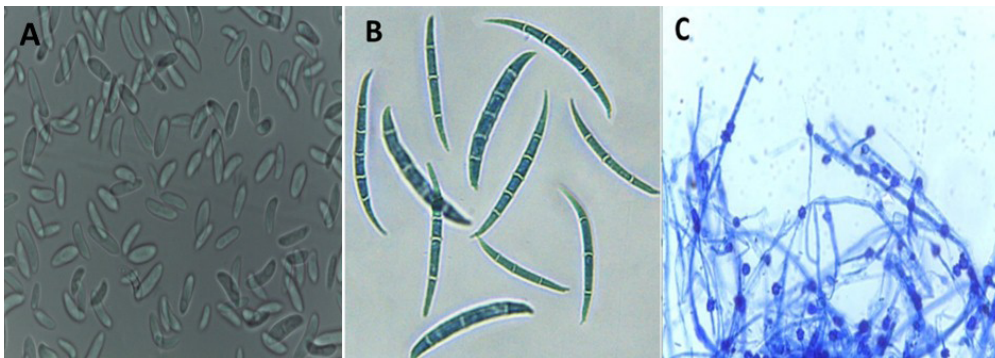
La enfermedad causa pérdidas entre el 21 y el 47 % en cultivos en exposición libre y bajo cubierta (Ramayabharathi, et al., 2012; Singh & Dwivedi, 2014). En Colombia aún no se conocen datos sobre pérdidas por esta enfermedad. Cuando este patógeno ataca plántulas ocasiona el mal del talluelo, el cual es favorecido por la carencia de lignina en el tallo, lo que las hace más susceptibles y permite que el patógeno alcance rápidamente los vasos del xilema, causando la destrucción y el colapso del tejido (Agris, 2005). Los síntomas tempranos que presentan las plántulas de

tomate incluyen coloración amarillenta, pérdida prematura de cotiledones y hojas inferiores, y retraso del crecimiento, se observa, además, una lesión marrón pronunciada que rodea el hipocótilo (unión entre raíz y brote) (McGovern & Datnoff, 1992). El tejido vascular de una planta enferma se torna de color pardo oscuro, siendo más notable en el punto de unión del peciolo con el tallo; este color es característico de la enfermedad y se emplea para su identificación (Jones, 1991). El marchitamiento de las hojas, la pudrición de la raíz y, finalmente, la muerte, son señal de la enfermedad en su estado más avanzado (McGovern & Datnoff, 1992).

El hongo produce las siguientes tres clases de esporas asexuales.

**Microconidios.** Conformados por una o dos células, son los más frecuentes y los únicos que se pueden producir en el interior de los haces vasculares de las plantas afectadas sin septos. Son hialinos, elipsoidales a cilíndricos, rectos o curvados; se forman sobre filídes laterales, cortas y simples, o sobre conidióforos poco ramificados. Los microconidios miden entre 5 y 12  $\mu\text{m}$  de largo por 2,5 a 3,5  $\mu\text{m}$  de ancho (Figura 1A) (Nelson, 1981; Leslie & Summerell, 2006). Los que son mucho más pequeños pueden formarse tanto en la superficie como en el interior del hospedante e, incluso, pueden ser transportados por la savia hacia los haces vasculares. La diseminación de la enfermedad en las plantas vecinas es posible por contacto directo de una planta infectada y una sana, así como también a través de las raíces. También es posible la transmisión de la enfermedad por la semilla (Kranz, 1982).

**Macroconidios.** Estos se forman en esporodoquios de color naranja pálido, generalmente abundantes cuando se siembran en agar de papa y dextrosa (PDA) complementado con hojas de clavel, y son curvos, con tres a cinco células. Se ha observado que la mayoría de los macroconidios de los aislamientos de esta especie presentan diversos tamaños que varían entre 20,3 y 27,0  $\mu\text{m}$  de largo y 6,7  $\mu\text{m}$  de ancho (Figura 1B) (Leslie & Summerell, 2006; Lugo & Sanabria, 2001). Los macroconidios del hongo producidos sobre los tejidos del hospedante pueden ser transportados por el viento, las gotas de lluvia, la maquinaria agrícola o



**Figura 1.** A. Microconidios de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (100X). B.- Macroconidios (40X). C. Clamidosporas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. 40X

por los humanos, entre otros. Las infecciones secundarias suelen producirse a través de las raíces, aunque también son posibles a través de heridas en la parte aérea de las plantas (Kranz, 1982).

**Clamidosporas.** En el medio PDA complementado con hojas de clavel se forman muy rápido, en un periodo de 2 a 4 semanas, a partir de la condensación del contenido de las hifas y de los conidios, cuyas paredes son gruesas. Se forman simples o en pares, terminales o intercalares y miden de 5 a 15  $\mu\text{m}$  de diámetro (Figura 1C) (Leslie & Summerell, 2006; Nelson, 1981). Son estructuras de supervivencia que pueden perdurar en el suelo y germinan y se introducen a través de las heridas que se forman cuando las raíces laterales emergen, o penetran directamente al tejido joven de las raíces en la zona de elongación. El micelio avanza intercelularmente y alcanza la región del xilema. El hongo se desarrolla en las traqueidas y en los vasos y células parenquimatosas. El micelio se ramifica y produce microconidios, los cuales se desprenden y son arrastrados hacia arriba por el flujo de la savia, vuelven a germinar y producen más micelio y microconidios (Agrios, 2005).

El patógeno puede permanecer en el suelo en forma de clamidosporas durante seis o más años como saprófito, sin un hospedante (Cerkaskas, 2005).

Generalmente, el hongo penetra en las plantas de tomate por las raíces, causando una obstrucción de los tejidos vasculares y pardeamiento. Los primeros síntomas de la enfermedad son el amarillamiento del follaje, seguido por defoliación. Las hojas infectadas posteriormente se oscurecen y se secan. La parte superior de la planta se marchita durante el día y se recupera en la noche, pero el marchitamiento se incrementa hasta que la planta se marchita completamente y se observa el oscurecimiento vascular en los tallos y los pecíolos de las hojas maduras infectados. Las plantas afectadas y sus sistemas radicales se atrofan. Bajo condiciones de mucha humedad, en los tejidos atacados y con pudrición seca se forma un micelio aéreo blanco cubierto por macroconidios que puede tornarse de color rosa anaranjado; esto ocurre con frecuencia cerca de la superficie del suelo o en cultivos con gran densidad de siembra (Kranz, 1982).

El hongo produce retraso en el crecimiento y síntomas de marchitamiento foliar, hasta que ocurre la quemazón foliar y el secamiento total de las plantas de tomate, y se produce una necrosis interna de color marrón en la base del tallo (Jaramillo, *et al.*, 2007).

Por la gravedad de los síntomas, la resistencia genética es el método más eficiente, económico y ecológico de manejo del marchitamiento vascular en el tomate. Sin embargo, para el proceso de evaluación y de selección de genotipos resistentes, es necesario inducir el desarrollo de los síntomas de la enfermedad mediante un método de inoculación eficiente que permita clasificar la reacción de los diferentes genotipos evaluados. Los métodos de inoculación artificial permiten observar la variabilidad en los

periodos de incubación y de latencia del hongo, el proceso de colonización, el mecanismo de patogenia, la edad óptima de sensibilidad al agente causante de la enfermedad, así como la optimización del tiempo y los recursos económicos (Castaño-Zapata, 1994; Ortiz & Hoyos, 2016).

Para la selección de materiales de tomate y otros cultivos resistentes a *Fusarium* spp., se han descrito diferentes métodos de inoculación (Lozovaya, *et al.*, 2004; Fischer, *et al.*, 2005; Narayanasamy, 2011; Ortiz & Hoyos, 2016; Ángel-García, *et al.*, 2018), pero en Colombia el desarrollo de métodos de inoculación de *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* en tomate aún no se ha estudiado. Por esta razón, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de cuatro métodos de inoculación para inducir los síntomas causados por *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* en plántulas de tomate bajo condiciones controladas de luz y de temperatura.

## Materiales y métodos

**Recolección de material vegetal.** El material vegetal con sintomatología típica del marchitamiento vascular se obtuvo de una finca comercial ubicada en la vereda Alto Bonito del municipio de Neira (Caldas) a una altura de 1.969 m.s.n.m., y una temperatura promedio anual de 19 °C. Se recolectaron muestras de raíces y tallos de plantas de tomate en estado vegetativo, las cuales se guardaron en bolsas de plástico debidamente selladas y rotuladas que posteriormente se llevaron al Laboratorio de Fitopatología de la Universidad de Caldas.

**Aislamiento y prueba de patogenia del hongo.** Se procedió a hacer la siembra de tejido en medio de cultivo PDA (39 g/L de agua). Se hicieron cortes longitudinales en la corona de las raíces de las plantas que presentaban síntomas de necrosis en el área de los haces vasculares; en la cámara de flujo laminar se tomaron porciones de tejido de aproximadamente 3 mm de diámetro y se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio al 1 %, luego se pasaron a una solución de alcohol antiséptico al 70 % y, por último, se lavaron en agua destilada estéril dejando el tejido sumergido en cada una de las soluciones durante un minuto. Se sembraron cuatro porciones de tejido en cada una de las cajas de Petri (9 cm x 1,5 cm) que contenían 20 mL de PDA, y estas se rotularon con el número de la muestra, la repetición y la fecha de siembra, y posteriormente se sellaron con papel vinilpel (marca Cristaflex) y se llevaron a una incubadora digital marca WTB Binder calibrada a 27 °C en condiciones de oscuridad hasta observar esporulación abundante del hongo. Siguiendo la metodología de Castaño-Zapata & Salazar (1998), se extrajeron las estructuras reproductivas del hongo de 15 días de edad con una aguja de disección y se colocaron en una lámina portaobjetos con dos gotas de azul de lactofenol al 0,05 % (20 g de fenol cristalino + 20 cm<sup>3</sup> de ácido láctico + 20 cm<sup>3</sup> de glicerina + 20 cm<sup>3</sup> de agua destilada y azul de algodón al 5 % en agua); la muestra se cubrió con un cubreobjetos y se procedió a observarla bajo un microscopio

compuesto de luz Scientific Revelation III (LW Scientific) con objetivo de 40X, para observar las características morfológicas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* descritas por **Leslie & Summerell** (2006).

**Purificación del hongo.** Después de observar los macroconidios septados y los microconidios (en su mayoría unicelulares) característicos del patógeno, se tomó un trozo del crecimiento micelial del primer aislamiento (incluida una pequeña porción de la colonia), con un poco de medio de cultivo utilizando una aguja de disección, el cual se colocó con PDA en cajas de Petri debidamente rotuladas que se llevaron a una incubadora a 27 °C en oscuridad; diariamente se observó el micelio, así como la formación de las estructuras reproductivas del hongo.

**Métodos de inoculación.** Se establecieron cuatro métodos de inoculación: 1) método de inyección en la corona de la raíz; 2) método por inmersión de las raíces; 3) método de discos de agar en la corona de la raíz, y 4) método de inoculación en plántulas *in vitro*. Estas metodologías se aplicaron en plántulas de tomate Sweet Million (*Solanum lycopersicum* L.) obtenidas a partir de semillas sembradas en turba canadiense estéril y medio MS (4,6 g/L de agua + 30 g/L de sacarosa + 7,5 g/L de Phytigel®) (**Murashige & Skoog**, 1962) conservadas en condiciones controladas del Laboratorio de Tejidos Vegetales y del cuarto de termoterapia de la Universidad de Caldas donde se seleccionaron 25 plántulas en buenas condiciones de desarrollo por método.

**Inyección en la corona de la raíz ( $T_1$ ).** En el laboratorio se hizo la inoculación inyectando el hongo de 15 días de edad purificado en agar PDA a 25 plántulas de tomate Sweet Million cuando éstas tenían tres hojas verdaderas (código BBCH 103); en cada plántula se inyectó en la corona de la raíz 1 mL de suspensión conidial con una concentración de  $1 \times 10^6$  conidios por mL<sup>-1</sup> de agua destilada estéril con jeringas para insulina de 1 mL (**Okiror**, 1998). Posteriormente, se trasplantaron en bolsas de plástico con dimensiones de 25 cm de alto x 10 cm de diámetro llenadas con turba Spagnum estéril y se dejaron en condiciones de laboratorio a una temperatura promedio de 18,5 °C.

**Inmersión de las raíces ( $T_2$ ).** Esta inoculación se hizo siguiendo la metodología propuesta por **Williams** (1981) y **Estupiñan & Ossa** (2007). Se retiraron cuidadosamente de las bandejas de germinación 25 plántulas de tomate cultivar Sweet Million de 30 días de edad obtenidas a partir de semilla; se hizo un lavado de las raíces con agua de grifo y con unas tijeras estériles se cortaron los ápices de la raíz principal. Posteriormente, cada una de las plántulas se sumergió hasta el cuello de la raíz durante 30 minutos en vasos de precipitación que contenían 250 mL de la suspensión conidial concentrada de  $1 \times 10^6$  conidios por mL<sup>-1</sup> de agua destilada estéril. Finalizado este proceso, las plántulas se sembraron en bolsas de plástico con turba Spagnum estéril y se dejaron en condiciones de laboratorio a una temperatura promedio de 18,5 °C con fotoperiodo de 12 horas de día y 12 horas de noche.

**Disco de agar en la corona de la raíz ( $T_3$ ).** Se trasplantaron 25 plántulas de tomate Sweet Million de 30 días de edad obtenidas a partir de semilla provenientes de bandejas de germinación con suelo estéril a vasos que contenían turba Spagnum estéril. Después se cortaron con la boca de un tubo de ensayo estéril porciones de agar PDA de 1 cm de diámetro con un crecimiento del patógeno de 15 días, y el disco de agar se colocó con las esporas del hongo en la base del tallo de cada plántula para después ser llevadas al cuarto de termoterapia bajo condiciones controladas.

**Inoculación *in vitro* ( $T_4$ ).** Se realizaron pruebas de patogenia en 25 plántulas de tomate Sweet Million de una edad de 30 días obtenidas a partir de semilla; cada semilla se sembró en 25 mL de medio nutritivo MS vertido en frascos de vidrio de 4 cm de diámetro x 7 cm de alto, los cuales fueron cuidadosamente tapados y sellados con papel vinilpel (Cristaflex). Las plántulas crecieron bajo condiciones controladas en el Laboratorio de Tejidos Vegetales a una temperatura promedio de 18,5 °C y una intensidad lumínica de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad. La inoculación individual de cada plántula se efectuó con 1 mL de suspensión conidial en una concentración de  $1 \times 10^6$  conidios por mL<sup>-1</sup> de agua destilada estéril, la cual se depositó en la base del tallo mediante una micropipeta de 10-1.000 µL (Himedia®).

La concentración de la suspensión conidial utilizada se ajustó con la ayuda de un hemacitómetro (Bright Line®) siguiendo la metodología descrita por **Castaño-Zapata** (1998): se contaron los macroconidios y microconidios en la cuadrícula del centro y de las cuatro esquinas del hemacitómetro, cada una con un área de 1 mm<sup>2</sup>, se sumó el número de conidios de las cinco cuadrículas y el resultado se multiplicó por 50.000, que es una constante, y se hicieron mediciones y diluciones hasta obtener la concentración deseada de  $1 \times 10^6$  conidios por mL<sup>-1</sup> de agua.

**Variables evaluadas.** Se determinó la incidencia de la enfermedad aplicando la siguiente fórmula:

Incidencia (%) = Número de individuos enfermos/ total de individuos \* 100.

También se determinó el periodo de incubación, definido como el tiempo necesario para que se desarrollaran los signos de la enfermedad desde el momento de la inoculación hasta su expresión. Asimismo, se calculó la tasa de desarrollo de la enfermedad. Al ser *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* un patógeno monocíclico, no se debería tener en cuenta el factor de corrección  $\log_e (1/1-X)$ , sin embargo, la incidencia superó el  $X=0,05$ , por lo que se empleó la fórmula descrita por **Castaño-Zapata** (2002):

$$r = \frac{1}{T_1 - T_0} \left( \log_e \frac{X_1}{1 - X_1} - \log_e \frac{X_0}{1 - X_0} \right),$$

donde r = tasa de desarrollo,  $T_1$  = tiempo final,  $T_0$  = tiempo inicial,  $X_1$  = proporción de incidencia de la enfermedad en tiempo final,  $X_0$  = proporción de incidencia de la enfermedad en tiempo inicial.

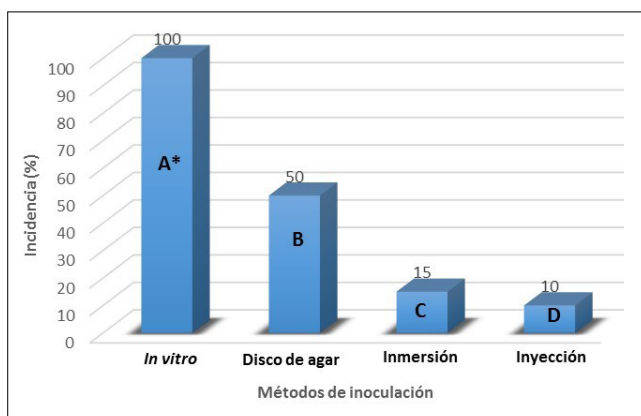
**Análisis de datos.** Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cinco tratamientos; la unidad

experimental fue de cinco plántulas por repetición. Se analizó la varianza y se hicieron pruebas de promedio de tipo Duncan utilizando el programa PROC GLM de SAS (SAS, 1992).

## Resultados y discusión

**Incidencia del marchitamiento vascular con los diferentes métodos de inoculación.** La incidencia final de la enfermedad mostró diferencias estadísticas muy significativas ( $p \leq 0,001$ ) entre los diferentes métodos de inoculación evaluados, así como en las pruebas comparativas de tipo Duncan. La única metodología que produjo el 100 % de incidencia del marchitamiento vascular fue la inoculación *in vitro* (Figura 2).

Las evaluaciones de incidencia de la enfermedad en cada uno de los métodos de inoculación se realizaron durante 29 días. Con el método *in vitro*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* tuvo un periodo de incubación de cinco días y se evidenció el marchitamiento de las plántulas (Figura 3A); al término de los cinco días ya se manifestaba una incidencia del 25 % y para el día 11 se registró una del



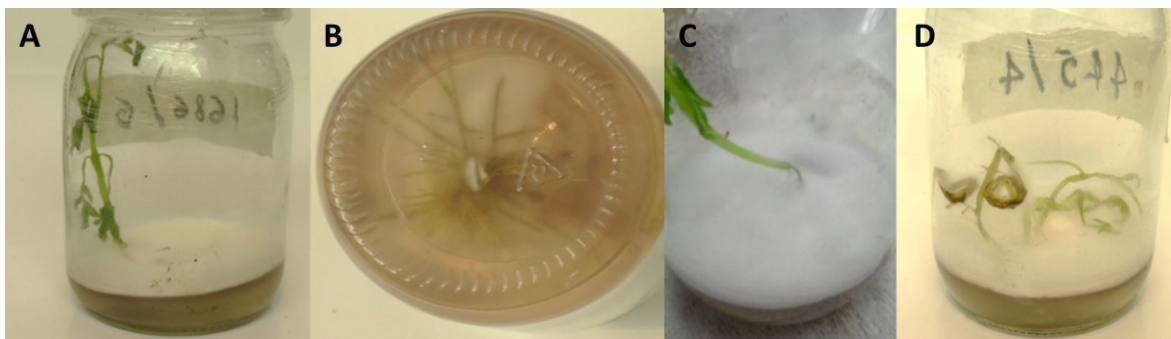
**Figura 2.** Incidencia final del marchitamiento vascular con cada método de inoculación utilizado

\* Las letras diferentes denotan diferencias significativas entre los métodos de inoculación según la prueba de rangos múltiples de Duncan al 5 %.

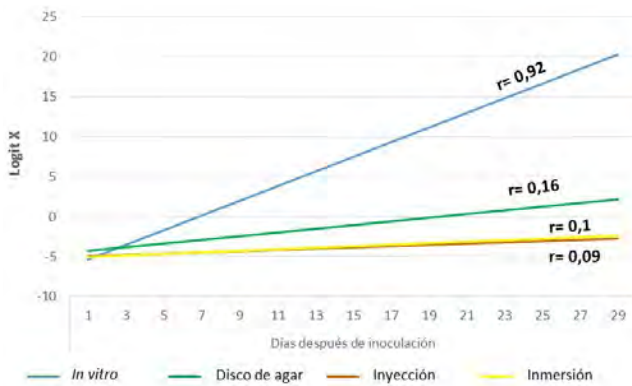
100 %, a lo que siguió la necrosis de las raíces (Figura 3B), el estrangulamiento del cuello del tallo (Figura 3C) y, finalmente, la muerte de las plántulas (Figura 3D), siendo éste el único método de inoculación con el que se registró en un 100 % de las plántulas la patogenia de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, resultado muy similar al obtenido por Ángel-García, *et al.* (2018), quienes, al evaluar diferentes métodos de inoculación de *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* en plántulas de maracuyá (*Passiflora edulis* Sims), obtuvieron un 100 % de incidencia de la secadera del maracuyá a los 6,2 días de la inoculación con el método de cribado en tubos de ensayo (Kelman, 1967).

Con el método del disco de agar también se evidenció una respuesta positiva pero no tan completa como con el método anterior. El periodo de incubación del hongo fue de siete días y la incidencia, del 20 %; para el día 29 ésta llegó al 50 %, aunque no se observó la muerte de las plántulas. Con estos dos métodos se obtuvieron los mejores resultados, lo que podría explicarse por las condiciones ambientales del cuarto de termoterapia a donde se llevaron las plántulas después de las inoculaciones y se mantuvieron con un fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 de oscuridad y una temperatura promedio de 20 °C; la temperatura óptima para el crecimiento micelial del hongo oscila entre 27 y 28 °C (Walker, 1971).

Los métodos que no mostraron un resultado satisfactorio fueron los de inmersión e inyección, ya que el periodo de incubación del hongo fue de 17 días, con una incidencia del 15 y el 10 %, respectivamente. Con ambos métodos se observaron síntomas leves de marchitamiento, la incidencia fue baja hasta el final del experimento y no se causó la muerte de las plántulas. Este resultado se considera atípico debido a la agresividad del hongo, pero es posible que haya habido una pérdida de la virulencia del patógeno por el manejo del hongo en el laboratorio, sumado a las pocas condiciones ambientales favorables para su cultivo, ya que una vez se hicieron las inoculaciones, las plántulas se colocaron en la cámara húmeda y se mantuvieron en condiciones de laboratorio a una temperatura promedio de 18,5 °C. Walker (1971) afirma que a temperaturas inferiores a 16 °C y sobre los 34 °C los síntomas de la enfermedad difícilmente se desarrollan.



**Figura 3.** Síntomas observados en el desarrollo del marchitamiento vascular del tomate. A) Marchitamiento de la plántula. B) Necrosis de las raíces. C) Estrangulamiento en el cuello del tallo. D) Muerte de la plántula



**Figura 4.** Tasas de desarrollo (r) del marchitamiento vascular causado por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* a lo largo del tiempo con los diferentes métodos de inoculación

Así mismo, en un estudio realizado por **Morales, et al.** (2014), quienes inocularon *Fusarium oxysporum* en especies silvestres del género *Solanum* sección *lycopersicon* mediante el método de inyección, se registró un periodo de incubación de 15 días y se evidenciaron pocos signos de la enfermedad y, hacia el final del experimento, en el día 32 de la inoculación, no había muerte de plántulas, por lo que los autores concluyeron que la poca virulencia del hongo se debía al proceso de manejo y a la falta de condiciones climáticas para su desarrollo, ya que las plántulas se mantuvieron en baldes plásticos en exposición libre. Sin embargo, utilizando la inoculación por inmersión estos mismos autores no emplearon el hongo aislado, sino el macerado de raíces de plantas con síntomas de la enfermedad provenientes de campos infestados, con lo cual indujeron la muerte del 57,8 % de las plantas en un periodo de incubación del hongo de 10 días.

En condiciones de laboratorio, **López-Cardona & Castaño-Zapata** (2013) inocularon la bacteria *Pseudomonas* sp. mediante el método de inyección en tallos de tomate de árbol (*Solanum betaceum*) y obtuvieron un 100 % de incidencia de la muerte descendente y un periodo de incubación de la bacteria de cinco días. Con este método de inoculación se hundió la aguja en el tallo principal para llegar a los vasos conductores de xilema y floema (**Jiménez, et al.**, 2004; **Trandafirescu & Botu**, 2009).

**Poulsen, et al.** (2013) realizaron un estudio de comparación entre técnicas de inoculación de *Fusarium verticillioides* en espigas de maíz y obtuvieron una mejor respuesta con el método de inyección en el canal de los estigmas, con un promedio de incidencia final de 51 % en los híbridos de maíz evaluados.

**Tasas de desarrollo (r) del marchitamiento vascular con los diferentes métodos de inoculación.** El cálculo de las tasas de desarrollo del marchitamiento vascular con los diferentes métodos de inoculación evidenció (como era de esperarse después de los resultados de la incidencia de la enfermedad) que la mayor tasa de desarrollo del marchitamiento vascular se logró con el método de inoculación *in vitro*,

seguido por los discos de agar, la inmersión y la inyección, siendo estos dos últimos métodos los que registraron la menor tasa de desarrollo. Asimismo, los resultados permitieron inferir que la tasa de desarrollo tuvo una relación directamente proporcional con la incidencia (Figura 4). En este sentido, **Castaño-Zapata** (2002) menciona que cuanto mayor es la incidencia de una enfermedad, mayor es su velocidad de desarrollo. En las condiciones del ensayo en el presente estudio, con el método de inoculación *in vitro* se comprobó la teoría que define el triángulo de la enfermedad, es decir, un hospedante genéticamente susceptible, un patógeno genéticamente virulento y un medio ambiente favorable. Ninguno de estos componentes es independiente.

En conclusión, aunque los métodos de inoculación empleados en este estudio indujeron los síntomas de la enfermedad, el método de inoculación *in vitro* fue el más eficiente debido a la homogeneidad en los resultados obtenidos para las variables evaluadas de incidencia, tasa de desarrollo y periodo de incubación en condiciones controladas. Dicho método puede ser útil para la selección masiva de materiales promisorios de tomate por su reacción a la marchitez vascular.

### Contribución de los autores

LFCP, realización de todos los tratamientos y seguimiento de la investigación, consolidación e interpretación de los datos. JCZ: planteamiento de la idea del trabajo, supervisión y participación en todo el proceso de ejecución

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

### Financiación

Esta investigación fue financiada por la Universidad de Caldas y realizada dentro de sus instalaciones.

### Referencias

- Agrios, G.N.** (2005). Plant pathology. 5th Edition. Academic Press. New York, USA. p. 27, 422, 635, 831, 840-841, 867, 922.
- Ángel-García, C., Robledo-Buriticá, J., Castaño-Zapata, J.** (2018). Comparación de métodos de inoculación de *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* en plántulas de maracuyá (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*). Rev. U.D.C.A. Act. & Div. Cient. **21** (1): 23-31.
- Castaño-Zapata, J.** (1994). Principios básicos de fitopatología. Zamorano Academic Press. Tegucigalpa, Honduras. 518 p.
- Castaño-Zapata, J.** (1998). Práctica de laboratorio de fitopatología. 2ª Edición. Universidad de Caldas-Zamorano Academic Press. 104p.
- Castaño-Zapata, J. & Salazar, H.** (1998). Illustrated guide for identification of plant pathogens. Centro Editorial Universidad de Caldas. 108p.
- Castaño-Zapata, J.** (2002). Principios básicos de fitoepidemiología. Editorial Universidad de Caldas. 396p.
- Cerkauskas, R.** (2005). *Fusarium* wilt. Fecha de consulta: 14 de enero de 2019.- Disponible en: <http://www.avrc.org/pdf/tomato/fusarium.pdf>

- Estupiñán, H. & Ossa, J.** (2007). Efecto del agente causal de la marchitez vascular de la uchuva (*Physalis peruviana* L.), el hongo *Fusarium oxysporum* Schlecht, sobre algunas solanáceas y otras especies cultivadas afectadas por formas especiales del microorganismo. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrícola y Veterinaria. Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. 89 p.
- FAOSTAT.** (2017). Statistical Databases. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. Italia. Fecha de consulta: 4 de marzo, 2019. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Fischer, I., Lourenco, S., Martins, M., Kimati, H., Amorin, L.** (2005). Seleção de plantas resistentes e de fungicidas para o controle da podridão do colo do maracujazeiro causada por *Nectria haematococca*. Fitopatologia Brasileira. **30**: 250-258.
- Gordon, T.R.** (2017). *Fusarium oxysporum* and the Fusarium wilt syndrome. Ann. Rev. Phytopathology. **55**: 23-39.
- Jaramillo, J., Rodríguez, V.P., Guzmán, M., Zapata, M., Rengifo, T.** (2007). Manejo del cultivo de tomate. Manual Técnico Buenas Prácticas Agrícolas–BPA. La producción de tomate bajo condiciones protegidas. CORPOICA – MANA – Gobernación de Antioquia – Centro de Investigación “La Selva”. FAO. **78**: 133-134.
- Jiménez, O., Contreras, N., Nass, H.** (2004). *Xanthomonas albilineans* agente causal de la escaldadura foliar de la caña de azúcar (*Saccharum* sp.) en los estados Lara y Yaracuy. Rev. Fac. Agron. **21** (3): 233-245.
- Jones, J.P.** (1991). Fusarium wilt. p. 15-16. In: Compendium of Tomato Diseases. J. B. Jones, et al. (Editores). APS Press. The American Phytopathological Society. 73 p.
- Kelman, A.** (1967). Source book of laboratory exercises in plant pathology. APS. W. Freeman & Company. U.S.A. 387 p.
- Kranz, J.** (1982). Enfermedades de los cultivos tropicales. Deuteromycotina. Primera edición. Paul Parey. Berlin & Hamburgo. p. 213-214.
- Leslie, J.F. and Summerell, B.A.** (2006). Chapter 13. *Fusarium oxysporum* Schlechtendahl emend. Snyder & Hansen. p. 212-218. The *Fusarium* Laboratory Manual. Blackwell Publishing, Hoboken.
- López-Cardona, N. & Castaño-Zapata, J.** (2013). Etiología de la muerte descendente del tomate de árbol [*Solanum betaceum* (Cav.) Sendt.]. Revista Agronomía. **21** (1):7-18.
- Lozovaya, V.V., Lygin, A.V., Hartman, G.L., Widholm, J.M.** (2004). Biochemical response of soybean roots to *Fusarium solani* f.sp. *glycines* infection. Crop Science. **44** (3): 819-826.
- Lugo, Z.C. & Sanabria, N.H.** (2001). Características culturales y patogénicas en aislamientos de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, procedentes de plantaciones comerciales de tomate. Agronomía Tropical. **51** (4): 519-530.
- McGovern, R.J. & Datnoff, L.E.** (1992). *Fusarium* crown and root rot of tomato: Reevaluation of management strategies. En: Vavrina, C.S. (Editores), Fla. Tom. Instit. Proc., Vegetable Crops Special Series, SS HOS1 University of Florida-IFAS, p. 75-82.
- Morales, N., Espinosa, G., Morales, A., Sánchez, B., Jiménez, A., Milián-García, Y.** (2014). Caracterización morfológica y evaluación de resistencia a *Fusarium oxysporum* en especies silvestres del género *Solanum* sección *lycopersicon*. Rev. Colomb. Biotechnol. **16** (1): 62-73.
- Murashige, T. & Skoog, F.** (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. Physiol. Plantarum. **15**: 473-497.
- Mycobank.** (2017). Search on: Mycobank names. Utrecht, The Netherlands. MYCOBANK Data base Fungal Data bases. Nomenclature & Species Banks. Fecha de consulta: 16 de abril, 2019. Disponible en: <http://www.mycobank.org/BioMICSDetails.aspx?Rec=203140>
- Narayanasamy, P.** (2011). Detection of fungal pathogens in plants. En: Fungal Pathogens. Springer & Dordrecht (India). 200 p.
- Nelson, P.E.** (1981). Life cycle and epidemiology of *Fusarium oxysporum*. p: 51-80. En: M. E. Mace, A. A: Bell and C. C. H. Beckman. (Editores). Fungal Wilt Diseases of Plants. Academic Press. New York.
- Okiror, M. A.** (1998). Screening techniques for *Fusarium* wilt of pigeon pea. African Crop Science Journal. **6** (4): 345-350.
- Ortiz, E. & Hoyos, L.** (2016). Standard methods for inoculations of *F. oxysporum* and *F. solani* in *Passiflora*. African J. Agricultural Res. (Nigeria). **11** (17):1569-1575.
- Poulsen Hornum, M., Ridao, A. Del C. & Castaño, F.** (2013). Comparación entre técnicas de inoculación de *Fusarium verticillioides* en espigas de maíz. Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA). **39** (3): 312-317.
- Ramyabharathi, S.A., Meena, B., Raguchander, T.** (2012). Induction of chitinase and  $\beta$ -1, 3-glucanase PR proteins in tomato through h liquid formulated *Bacillus subtilis* EPCO 16 against Fusarium wilt. Journal of Today's Biological Sciences: Research & Review. India. **1** (1): 50-60.
- Rick, C. M.** (1974). El tomate, Investigación y Ciencia. Scientific American No. 25 Edición. Reverté S. A. Barcelona, España Pp. 46.
- SAS.** (1992). En: SAS Institute Cary, N.C. EEUU. Version 9,0.
- Singh, E. & Dwivedi, S. K.** (2014). Effectiveness of some antagonistic fungi and botanicals against *Fusarium solani* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* infecting brinjal and tomato plants. Asian J. of Plant Pathology. **18** (1): 18-26.
- Trandafirescu, M. & Botu, M.** (2009). Epidemiology of bacterial dieback of peach (*Pseudomonas mors-prunorum* f. sp. *persicae*) in the conditions of Valu lui Traian fruit growing area. Cetara (SA) Italy. p. 1-6. Fecha de consulta: 25 de junio, 2015. Disponible en: [http://www.cost873.ch/uploads/\\_files/MBotu\\_BacterialDiebackPeachRomania.pdf](http://www.cost873.ch/uploads/_files/MBotu_BacterialDiebackPeachRomania.pdf)
- Walker, J. C.** (1971). *Fusarium* wilt of tomato. Monograph No. 6, Am. Phyt. Soc. St. Paul, Minn. p. 95-97.
- Williams, P.H.** (1981). *Fusarium* yellows. In: Screening Crucifers for Multiple Disease Resistance. University of Wisconsin, USA. p. 124-129.

# Flujo de CO<sub>2</sub> del suelo bajo diferentes coberturas de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá

✉ María Catalina Lopera

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

## Resumen

El flujo de CO<sub>2</sub> del suelo contribuye con las emisiones de gases de efecto invernadero y varía de acuerdo con la topografía, la calidad de los suelos, las características de la vegetación y los usos del suelo, entre otros. En este estudio se evaluó la variación del flujo de CO<sub>2</sub> del suelo bajo tres coberturas vegetales de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá y su relación con factores edafoclimáticos. Se escogieron tres sitios de muestreo por cobertura y se midió el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo en mayo, julio y septiembre del 2018. Se encontró que el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo fue mayor en las plantaciones de eucalipto y menor en los herbazales abiertos de páramo, y fue mayor en mayo (el mes con mayor precipitación), y menor en septiembre. Se encontraron relaciones positivas entre el flujo de CO<sub>2</sub> y la temperatura del ambiente, la temperatura del suelo y la elevación. Los resultados obtenidos sugieren que el tipo de cobertura vegetal y la temperatura son dos factores que determinan los procesos de respiración y flujo de CO<sub>2</sub> del suelo. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Respiración del suelo; Páramo; Eucalipto; Bosques andinos.

## Soil CO<sub>2</sub> flux under different land-cover types in the Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental of Bogotá

### Abstract

The soil CO<sub>2</sub> efflux contributes to greenhouse gases and varies according to topography, soil quality, vegetation characteristics, and land use, among others. The aim of this study was to estimate CO<sub>2</sub> efflux variation from soils under three land-cover types located in Bogotá's *Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental* and its relationship with climate and edaphic factors. For each cover, three sampling areas were selected and measurements were made in May, July, and September 2018. Soil CO<sub>2</sub> efflux was higher in eucalyptus plantations and lower in the páramo grasslands. The highest soil CO<sub>2</sub> efflux occurred in the rainy season (May) and the lowest in the drier season (September). A positive relationship was found between soil CO<sub>2</sub> efflux and environmental temperature, soil temperature, and elevation. The results suggest that differences in land cover and temperature are drivers of soil respiration and soil CO<sub>2</sub> effluxes in the study area. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Soil respiration; Land cover; Páramo; Eucalyptus; Andean forests.

## Introducción

El carbono contenido en el suelo puede representar hasta tres veces más del que hay en la atmósfera y la vegetación (Pouyat, *et al.*, 2002); su liberación en forma de CO<sub>2</sub> desde la superficie es resultado de los procesos de respiración del suelo que cumplen un papel primordial en el ciclo global del carbono y el balance del CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Raich & Schlesinger, 1992), además de que constituye uno de los gases de efecto invernadero que contribuye al cambio climático global (Lal, 2004; Scharlemann, *et al.*, 2014). Para entender las dinámicas del carbono como fuente o sumidero en los ecosistemas y, así, su equilibrio global, es importante medir y entender el intercambio del flujo de CO<sub>2</sub> entre los suelos y la atmósfera (Kutzbach, *et al.*, 2007).

Los principales factores determinantes de la respiración del suelo y el flujo del CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera son la temperatura y la humedad del suelo (Riveros-Iregui, *et al.*, 2008;

Deb, *et al.*, 2015), pues influyen en la actividad microbiana y la diversidad de la comunidad de microorganismos (FAO, 2017). Estos dos factores varían espacialmente, por ejemplo, a escala del paisaje se ven afectados por la topografía y por diferencias en la cobertura vegetal (Pacific, *et al.*, 2008). Existen otros factores abióticos que influyen en la respiración, entre los cuales son importantes algunas propiedades físicas del suelo como la textura y la densidad aparente (Rochette & Hutchinson, 2005; Luo & Zhou, 2006).

En las últimas décadas ha aumentado el interés por entender el efecto de los cambios en el uso del suelo y la transformación del paisaje en el *stock* del carbono y en el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo frente a las acciones de mitigación

### Correspondencia:

María Catalina Lopera; clopera@jbb.gov.co

Recibido: 27 de diciembre de 2018

Aceptado: 8 de mayo de 2019

Editor: Sandra Baena

del cambio climático (Lal, 2004; Carvajal, *et al.*, 2009; Rodríguez, 2016). Se ha encontrado que la respiración del suelo está relacionada con la cobertura de la vegetación (Riveros-Iregui, *et al.*, 2008; Decina, *et al.*, 2016; Sánchez, 2016), con las comunidades vegetales (Metcalfe, *et al.*, 2011), con el estado de sucesión (Wang, *et al.*, 2015), con las especies vegetales dominantes en el ecosistema (van Haren, *et al.*, 2010) y con los cambios en el uso del suelo (Raich & Schlesinger, 1992; De Jong, 2001; Lal, 2004; Pacific, *et al.*, 2008; Oyonarte, *et al.*, 2012; Scharlemann, *et al.*, 2014).

En Colombia se han realizado estudios para estimar el contenido de carbono en la biomasa aérea de los bosques (Phillips, *et al.*, 2011; Borrero-Benavides, 2012; Sanabria & Puentes, 2017) y en el suelo (Carvajal, *et al.*, 2009; Rodríguez, 2016; Sánchez & Romero, 2016). En cuanto a la estimación del flujo de CO<sub>2</sub> del suelo hacia la atmósfera, los esfuerzos son escasos. Sin embargo, se encuentran algunos estudios sobre la respiración del suelo en áreas con diferentes usos del suelo (Murcia & Ochoa, 2008; Vásquez, *et al.*, 2013), y sobre el flujo de carbono en páramos (Peña, 2015), en ecosistemas altoandinos (Murcia, *et al.*, 2012), en sistemas agroforestales (Sánchez, 2016) y en diferentes coberturas urbanas y periurbanas en Bogotá (Bonell, 2018).

Dada la importancia de conocer mejor cómo se comporta y cómo varía el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo y cuáles son los factores que lo afectan, es necesario estudiar sus dinámicas para generar discusiones y elementos teóricos y prácticos que ayuden en la adopción de decisiones relacionadas con el uso y la conservación de las diferentes coberturas vegetales, incluyendo el manejo de la dinámica del carbono del suelo frente a escenarios de cambio climático. En esta investigación se planteó evaluar el flujo del CO<sub>2</sub> del suelo en la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá, para responder a las siguientes preguntas de investigación: ¿cómo varía el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo en diferentes coberturas dentro de esta Reserva? y ¿cómo se relacionan algunos factores edafoclimáticos con el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo en sus diferentes coberturas?

## Materiales y métodos

**Área de estudio.** La Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá se ubica en el oriente de la ciudad y está conformada por un paisaje de montaña. La reserva tiene una extensión de 14.000 ha y se encuentra en un rango de elevación entre los 2.650 y los 3.600 m. Se extiende desde el sur de la ciudad a partir de las quebradas El Amoladero y Yomasa, tributarias del río Tunjuelo, hasta la cuenca de la quebrada Torca, en el norte. En la zona sur, el régimen de precipitaciones es monomodal, con un máximo de precipitación a mitad del año y un valor medio multianual de 1.292 mm (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, 2006). En la zona norte de la reserva se presenta un régimen de precipitaciones tipo bimodal con dos periodos húmedos entre abril y mayo y entre octubre y noviembre; la precipitación media multianual es de 916 mm (CAR, 2006).

La Reserva se ha visto sometida a muchas transformaciones a lo largo de los años. El resultado actual es un mosaico de coberturas en el que se encuentran fragmentos de bosques, arbustales y matorrales, plantaciones forestales de pino (*Pinus patula*) y eucalipto, (*Eucalyptus globulus*), áreas dominadas por especies invasoras como el retamo espinoso (*Ulex europaeus*), pastizales, cultivos, suelos dedicados a la ganadería y, en las zonas de mayor altitud (más de 3.000 m), áreas con coberturas de herbazales abiertos de páramo, pajonales y frailejonales (Conservación Internacional - CI & CAR, 2009). Para este estudio se escogieron tres coberturas representativas de la reserva: bosque secundario con dosel arbóreo discontinuo, plantaciones forestales de eucalipto y herbazales abiertos de páramo.

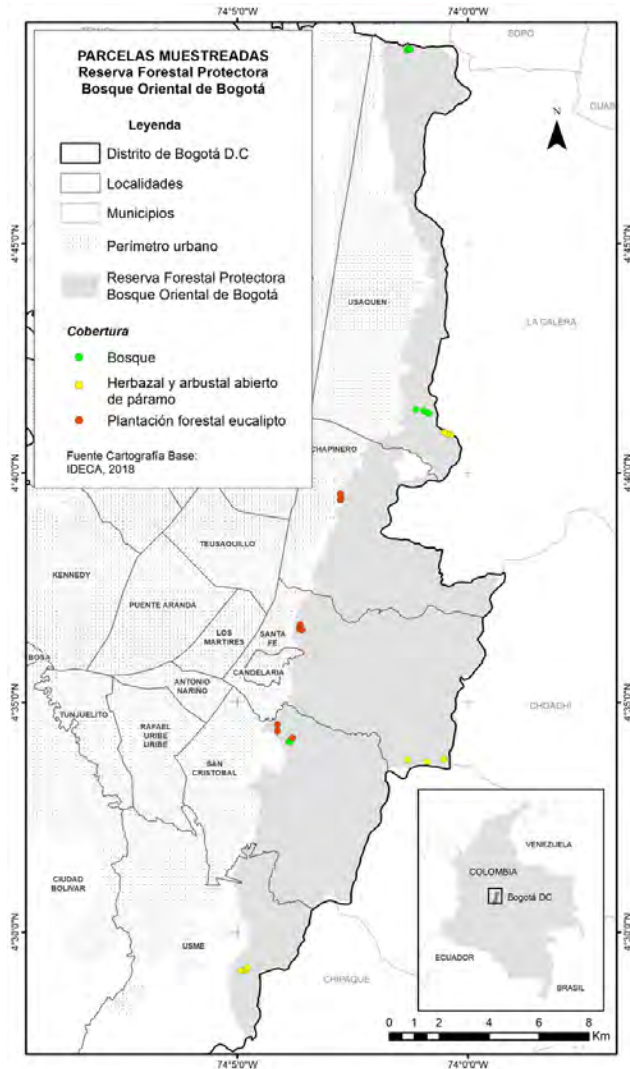
En la cobertura de bosque secundario los tres sitios de muestreo fueron: en el norte, los Bosques de Torca entre los 2.600 y los 2.950 m de elevación, donde se encuentra el fragmento de bosque mejor conservado de la reserva; el Club La Aguadora, entre los 2.400 y los 2.700 m de elevación, y en el sur, la Escuela de Logística (localidad de San Cristóbal), entre los 2.800 y los 2.950 m de elevación. En la cobertura de herbazal de páramo se seleccionaron tres sitios de muestreo: al norte, en la cuchilla de los cerros Orientales, limitando al oriente con el antiguo camino al Meta, entre los 2.900 y los 3.200 m de elevación; en el oriente de la Reserva, en el Parque Ecológico Matarredonda, vereda Los Verjones, entre los 3.300 y los 3.500 m de elevación, y al sur, en el área rural de la vereda Los Soches, entre los 2.700 y los 3.400 m de elevación. En las plantaciones forestales de eucalipto, los sitios se ubicaron en la Reserva Umbral Horizontes, al oriente del barrio Los Rosales, entre los 2.710 y los 2.750 m de elevación, en el Parque Nacional - etapa II, entre los 2.500 y los 2.680 m de elevación, y en la Escuela de Logística, al sur de la Reserva, a 2.800 m de elevación (Figura 1).

## Métodos de campo

Se realizaron tres muestreos en cada cobertura en los meses de mayo, julio y septiembre. En cada sitio de muestreo se establecieron tres parcelas de 5 x 5 m con una distancia de, por lo menos, 50 m entre ellas y distribuidas de manera aleatoria. En cada parcela se instalaron cinco collares de medición en cada esquina y en el centro. En cada cobertura se ubicaron nueve parcelas de medición. Cada parcela se georreferenció y se marcó para que las siguientes mediciones fueran en el mismo lugar.

Todas las mediciones del flujo de CO<sub>2</sub> se realizaron entre las 9:00 am y las 2:00 pm. Cada mes se pudo la vegetación sobre la superficie antes de realizar las mediciones para minimizar las variaciones por el efecto de la respiración aérea autótrofa de la vegetación (Pacific, *et al.*, 2008). Para determinar el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo se utilizó un equipo de análisis de CO<sub>2</sub> de cámara cerrada portátil, con un analizador infrarrojo incorporado (IRGA), modelo EGM-5, (PP Systems, 2017) y se realizó cada medición durante 120 segundos (Sainju, *et al.*, 2012).





**Figura 1.** Ubicación de las parcelas de muestreo en las tres coberturas estudiadas. Elaboró: Monroy, J. Jardín Botánico de Bogotá, 2018.

Simultáneamente, se registraron la temperatura y la humedad del suelo a 10 cm de profundidad al lado de la cámara de medición del flujo de  $\text{CO}_2$  (Oyonarte, *et al.*, 2012; Sainju, *et al.*, 2012). La temperatura del suelo se midió mediante una sonda de temperatura STP-2 incorporada al equipo EGM-5 (PP Systems, 2017), y la humedad mediante un higrómetro para suelo marca EXTECH®, modelo MO-750. Además, en cada punto de medición se registraron la temperatura y la humedad del ambiente mediante un medidor de clima marca Kestrel, 5500.

Para analizar la variación de la precipitación durante el periodo de muestreo (mayo a septiembre de 2018), se consultó la información disponible en la página de Internet de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá dispuesta por la Secretaría Distrital de Ambiente (2018). En esta página se encuentra la información de distintas estaciones de monitoreo, por lo que se seleccionaron las que se encuentran más cercanas a los sitios de muestreo.

**Análisis estadístico.** Para analizar las diferencias entre coberturas se promediaron los valores de los cinco collares de medición de cada parcela. Con los datos resultantes se llevaron a cabo pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk ( $n < 30$ ) y de homogeneidad de varianzas de Levene. Los datos de las coberturas se ajustaron a la distribución normal y presentaron homogeneidad de varianzas, por lo tanto, para los análisis se utilizaron pruebas paramétricas.

Para evaluar si las tres mediciones realizadas para cada cobertura presentaban diferencias significativas, se hicieron análisis de varianza (ANOVA) para muestras repetidas y se complementó con pruebas de Tukey para probar la diferencia entre muestras pareadas. Las diferencias del flujo de  $\text{CO}_2$  del suelo y las variables ambientales en las diferentes coberturas se evaluaron mediante análisis de ANOVA y pruebas pareadas de Tukey.

Para determinar la relación entre el flujo de  $\text{CO}_2$  del suelo y las variables ambientales se hicieron análisis de correlación de Spearman. Además, se transformaron los datos mediante logaritmo natural para ajustar un modelo de regresión múltiple lineal, el cual se evaluó mediante regresión paso a paso para conocer el valor predictivo y la significación de cada variable en el modelo. Por último, se incluyó la variable de la elevación para conocer si esta tenía significación en el modelo.

En los análisis estadísticos se empleó el programa estadístico PAST®, versión 3.21, 2018, y el Minitab®, versión 15 (Minitab® Inc. 2007).

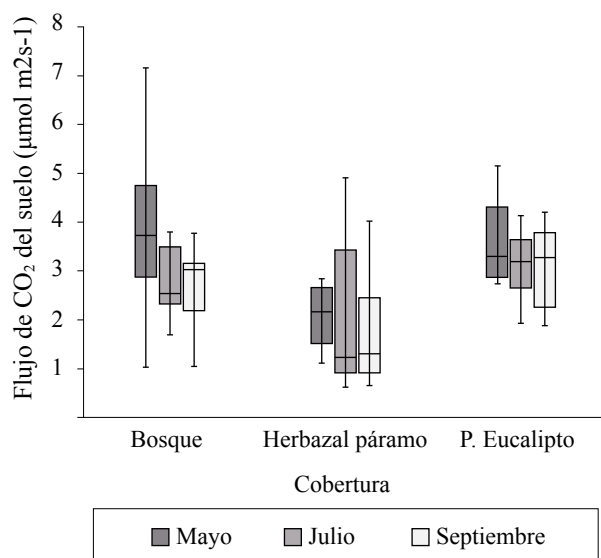
## Resultados

**Flujo de  $\text{CO}_2$  del suelo.** En la cobertura de bosque, el promedio del flujo de  $\text{CO}_2$  fue de  $3,06 \pm 1,5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$  y varió entre  $1,03$  y  $7,14 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Las mediciones en los tres meses presentaron diferencias significativas ( $F=4,33$ ;  $p=0,03$ ), siendo las medidas registradas en mayo más altas y significativamente diferentes a las tomadas en julio y septiembre ( $p < 0,05$ ). En la cobertura de herbazal de páramo el promedio de flujo de  $\text{CO}_2$  fue de  $1,85 \pm 1,41 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$  y varió entre  $0,61$  y  $4,9 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Las mediciones en los tres meses no presentaron diferencias significativas ( $F=0,51$ ;  $p=0,60$ ); en el mes de mayo se presentó el valor promedio más alto (Figura 2). En la cobertura de plantación de eucalipto el promedio de flujo de  $\text{CO}_2$  del suelo fue de  $3,24 \pm 1,5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$  y varió entre  $1,8$  y  $5,15 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Las mediciones en los tres meses presentaron diferencias significativas ( $F=6,48$ ;  $p=0,010$ ), con el valor promedio más alto en mayo ( $3,6 \pm 1,59 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

En los tres meses evaluados, el flujo de  $\text{CO}_2$  del suelo en la cobertura de herbazal abierto de páramo fue menor que en la de bosque y eucalipto (Figura 2). Las coberturas presentaron diferencias significativas entre sí ( $p < 0,05$ ). En mayo y septiembre la cobertura de herbazal abierto de páramo fue significativamente diferente a la de eucalipto ( $Q=4,33$ ;  $p=0,014$ ), mientras que los valores registrados para la de bosque fueron similares a los registradas en la de eucalipto ( $Q=1,099$ ;  $p=0,72$ ).

**Temperatura del suelo.** En la cobertura de bosque la temperatura varió entre 10,66 y 12,5 °C; la mayor temperatura promedio se registró en el mes de mayo y la menor fue en julio. En la cobertura de herbazal abierto de páramo, la temperatura varió entre 8,5 y 14,5 °C; el mes con la temperatura promedio más alta fue mayo y la menor temperatura fue en julio. En la cobertura de plantación forestal de eucalipto la temperatura varió entre 11,2 y 14,3 °C; el mes con mayor temperatura promedio fue mayo y el de menor fue julio (Tabla 1). La temperatura del suelo para todos los meses fue menor en las coberturas de herbazal de páramo y bosque y mayor en las plantaciones de eucalipto con diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

**Humedad del suelo.** En la cobertura de bosque la humedad varió entre 2 y 9,8 %; la mayor humedad promedio se registró en el mes de mayo y la menor fue en septiembre. En la cobertura de herbazal abierto de páramo la humedad del suelo varió entre 3 y 12,5 %; el mes con la humedad promedio más alta fue julio y el de menor humedad fue septiembre. En la cobertura de plantación forestal de eucalipto la humedad varió entre 1 y 8,9 %; el mes con mayor humedad promedio fue julio y el de menor fue septiembre (Tabla 1).



**Figura 2.** Flujo de CO<sub>2</sub> registrado en las diferentes coberturas en los tres meses de muestreo

La humedad del suelo para todos los meses de muestreo fue menor en la cobertura de plantación forestal de eucalipto y mayor en la de bosque y herbazal de páramo, presentándose diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). En mayo y septiembre la cobertura de plantación de eucalipto presentó diferencias significativas con las otras dos coberturas ( $p < 0,05$ ).

**Temperatura ambiente.** En la cobertura de bosque la temperatura varió entre 12 y 20°C; en la de herbazal abierto de páramo varió entre 7,4 y 18,24 °C, y en la cobertura de plantación forestal de eucalipto esta varió entre 13,8 y 20,68 °C. La temperatura ambiente para todos los meses de muestreo fue menor en las coberturas de herbazal de páramo y la cobertura con mayor valor varió en todos los meses: en mayo fue en la de bosque, en julio en la de eucalipto y en septiembre en la de arbustal (Tabla 1). En los tres meses de muestreo se encontraron diferencias significativas entre las coberturas ( $p < 0,05$ ) y la cobertura de herbazal de páramo presentó diferencias significativas con las otras dos ( $p < 0,05$ ).

**Humedad relativa.** En la cobertura de bosque la humedad relativa varió entre 64,3 y 99,8 %; en la de herbazal abierto de páramo, entre 58 y 99 %, y en la de plantación forestal de eucalipto, entre 57 y 92 %. En todas las coberturas el mes con mayor humedad promedio fue julio y el de menor fue septiembre (Tabla 1).

La humedad relativa para todos los meses de muestreo fue menor en la cobertura de plantación forestal de eucalipto y mayor en las de bosque y herbazal de páramo, presentándose diferencias significativas entre las plantaciones de eucalipto y las de páramo y bosque ( $p < 0,05$ ).

**Relaciones entre el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo y los factores edáficos y ambientales.** Según los análisis de correlación de Spearman, el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo presentó correlaciones significativas positivas con la temperatura del suelo y la temperatura ambiente y negativas con la humedad del suelo y la humedad del ambiente (Tabla 2). Con respecto a las variables ambientales, se observaron correlaciones significativas entre todos los factores, siendo la más alta entre la humedad relativa y la temperatura ambiente (Tabla 2). También se encontraron correlaciones negativas entre la precipitación y el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo en los meses de mayo ( $r_s = -0,39$ ;  $p < 0,05$ ) y julio ( $r_s = -0,27$ ;  $p < 0,05$ ).

**Tabla 1.** Valores promedio y desviación estándar de las condiciones ambientales registradas en las coberturas estudiadas (para cada cobertura: n=9)

Variable	Bosque			Herbazal abierto de páramo			Plantación de eucalipto		
	Mayo	Julio	Sept.	Mayo	Julio	Sept.	Mayo	Julio	Sept.
Humedad del suelo (%)	7±2,1	6,1±1,8	5,2±2,1	7,4±2,2	7,5±2,1	7,8±2,9	4,0±2,4	5,03±2,8	2,1±0,6
Temperatura del suelo (°C)	12,1±0,5	11,6±0,4	11,4±0,5	11,6±1,9	10,1±1,5	10,5±1,7	13,4±0,5	12,4±0,7	12,9±0,5
Humedad ambiente (%)	69,8±3,3	91,3±6	76,5±7,3	80,8±7,4	91,8±8,2	79,1±13,8	78,1±4,6	81,2±8,2	65,3±6,8
Temperatura ambiente (°C)	19±1,7	14,1±1,7	16,0±0,7	14,7±2,7	10,5±1,9	12,7±3,7	17±0,5	15,4±1,3	18,3±1,9

**Tabla 2.** Coeficientes de correlación ( $r_s$ ) de Spearman entre el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo y los factores edáficos y ambientales evaluados

	Flujo de CO <sub>2</sub> del suelo	Humedad del suelo	Temperatura del suelo	Humedad ambiente
Humedad del suelo	-0,25*			
Temperatura del suelo	0,39*	-0,50*		
Humedad ambiente	-0,16*	0,20*	-0,44*	
Temperatura ambiente	0,28*	-0,35*	0,58*	-0,71*

\* Significativo para  $p < 0,05$ 

En cuanto a la relación entre el flujo de CO<sub>2</sub> y las variables evaluadas, se encontró una relación significativa entre este y la temperatura del ambiente y del suelo y la elevación ( $r^2=0,40$ ;  $F_{3,126}=28,48$ ;  $p<0,001$ ), la cual se describe mediante la siguiente ecuación:

$$\ln(\text{Flujo CO}_2) = -17,5 + 1,58 \ln(T \text{ ambiente}) + 1,45 \ln(T \text{ suelo}) + 1,35 \ln(\text{elevación}).$$

### Discusión

El flujo de CO<sub>2</sub> del suelo fue diferente en las coberturas de herbazal de páramo y en la de plantaciones de eucalipto, lo que indica que el tipo de vegetación influye en la respiración del suelo, como se ha demostrado en diferentes estudios (Vásquez, *et al.*, 2013; Grand, *et al.*, 2016). Sin embargo, en otros estudios, como el de Peña (2015), se reporta que no se encontraron diferencias significativas en el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo entre coberturas de diferentes usos de suelo en el páramo de Guerrero, Cundinamarca.

La cobertura que presentó el mayor flujo de CO<sub>2</sub> del suelo fue la de plantaciones forestales de eucalipto, en tanto que el menor se registró en la de herbazal abierto de páramo. Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Bonell (2018), quien reportó mayor flujo de CO<sub>2</sub> en plantaciones forestales que en coberturas de bosque, y menor en los herbazales y arbustales de páramo. Uno de los factores que puede explicar el mayor flujo de CO<sub>2</sub> del suelo en plantaciones forestales es la textura del suelo, pues en los tres sitios de muestreo con este tipo de cobertura los suelos se catalogaron como franco-arenosos, con un contenido de arena superior al 50 %, lo cual concuerda con Bonell (2018), quien reportó suelos franco-arenosos en sitios de muestreo cercanos a las plantaciones de eucalipto evaluadas en este estudio. Un alto porcentaje de arena en el suelo puede significar mayor aireación y transporte de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera.

Los resultados en páramo fueron mayores que los reportados por Bonell (2018) en el páramo de Cruz Verde y por Peña (2015) en el páramo de Guerrero, Cundinamarca, y menores en plantaciones forestales que lo reportado por Bonell (2018). Estas diferencias se pueden explicar por el hecho de que la respiración del suelo presenta una alta variabilidad tanto espacial como temporal, ya que depende de diversos factores como el tipo de suelos y su textura, y algunas propiedades químicas y físicas como la temperatura y la humedad del suelo (Fóti, *et al.*, 2016). Además, se deben tener en cuenta las distintas técnicas de medición, el

número de muestras y el diseño de los muestreos, los cuales podrían explicar las diferencias entre los resultados de este estudio y los reportados previamente.

En las tres coberturas evaluadas, el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo fue mayor en mayo que en septiembre, lo cual se añade a la relación encontrada con la precipitación que, aunque baja, sugeriría que las condiciones climáticas influyen en la respiración del suelo, como se ha demostrado en estudios sobre la variación estacional de la respiración del suelo, en los cuales también se ha observado que la interacción entre la temperatura y la humedad, y su cambio a lo largo del año, determinan la variación de la respiración del suelo a lo largo del tiempo (Merbold, *et al.*, 2011).

La relación positiva encontrada entre el flujo de CO<sub>2</sub> y la temperatura del ambiente se ha reportado en otros estudios como el de Murcia, *et al.* (2012), quienes concluyeron que los cambios en la temperatura media del ambiente pueden afectar las tasas de respiración diurna en mayor medida que la humedad relativa. Por otra parte, también se encontraron relaciones positivas con la temperatura del suelo, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura, pues se ha encontrado que si aumenta la temperatura del suelo, el flujo de CO<sub>2</sub> se incrementa, puesto que induce a cambios en las tasas de respiración de las raíces y de descomposición de la materia orgánica (Wang, *et al.*, 2010; Carvalho, *et al.*, 2016; Grand, *et al.*, 2016); asimismo, se ha encontrado que la relación de la respiración del suelo con la temperatura se observa cuando el contenido de agua del suelo no es una variable limitante (Luo & Zhou, 2006). Esto explica la correlación entre la temperatura y la humedad, descrita ampliamente, y que afecta la respiración del suelo (Luo & Zhou, 2006). Ello se ha observado en diferentes estudios en los que el efecto de la temperatura sobre el flujo de CO<sub>2</sub> se mostró dependiente del contenido de agua del suelo y varió temporalmente dependiendo de las condiciones de humedad (Wang, *et al.*, 2015; Fóti, *et al.*, 2016).

La relación encontrada entre la temperatura y el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo contribuye a explicar las diferencias entre las coberturas evaluadas. En el páramo, donde fue menor el flujo de CO<sub>2</sub>, las temperaturas registradas fueron las más bajas. Esto influye sobre la actividad de los microorganismos y la descomposición de la materia orgánica presente en el suelo. En la cobertura de bosque se presentaron los valores intermedios, tanto de flujo de CO<sub>2</sub> como de

temperatura; debe tenerse en cuenta, también, que en los bosques evaluados se observó una gruesa capa de materia orgánica en descomposición. Por último, en la cobertura de plantaciones de eucalipto se registraron los valores más altos de temperatura del suelo y del ambiente, así como los valores más altos de flujo de CO<sub>2</sub>.

Aunque la humedad del suelo se considera uno de los principales factores que influyen en la respiración del suelo y la actividad de los microorganismos, en este trabajo se encontró una correlación muy baja con el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo, situación que también ha sido reportada en estudios de respiración del suelo en los que la humedad del suelo no es una limitación (**Jordan, et al., 2009; Peña, 2015**). Para saber si este es el caso en las coberturas aquí estudiadas, debería evaluarse este aspecto en estudios futuros.

En múltiples publicaciones se ha reportado que el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo tiene una gran variabilidad temporal (**Murcia & Ochoa, 2008; Merbold, et al., 2011; Decina, et al., 2016**), y espacial (**Jordan, et al., 2009**), ya que son múltiples los factores y procesos que pueden determinarlo, por ejemplo, las diferencias en el rango altitudinal en el que se evalúe, pues a mayor altitud disminuye el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo (**Carvalho, et al., 2016; Sun, et al., 2018**), lo cual se corroboró en el presente estudio al relacionar el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo con los datos de elevación.

A pesar de que se encontraron variables edafoclimáticas que permitieron explicar la variabilidad del flujo del CO<sub>2</sub>, se debe tener en cuenta que existen otros factores que pueden afectar la respiración del suelo y que no se tuvieron en cuenta en este estudio; es el caso de las concentraciones de algunos elementos químicos como el nitrógeno, el cual se ha comprobado que tiene gran influencia sobre los procesos de respiración del suelo y el flujo de CO<sub>2</sub> (**Wang, et al., 2019**).

Otros factores que se sabe que influyen en la respiración del suelo son el tipo de vegetación o las diferencias en el dosel, como es el caso de lo observado por **Carvalho, et al. (2016)**, quienes determinaron que las diferencias en el dosel de sistemas agroforestales cambiaron el microclima y produjeron variaciones espaciotemporales en el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo. Otros autores han encontrado que las diferencias en las dinámicas del CO<sub>2</sub> del suelo pueden deberse a las especies de plantas que se encuentren en la superficie (**van Haren, et al., 2010**). En este estudio no se tuvo en cuenta este factor, pero puede haber influido en los resultados aquí descritos, ya que las diferentes coberturas evaluadas presentaron diferentes tipos de dosel y de especies dominantes.

## Conclusiones

El flujo de CO<sub>2</sub> del suelo varió según las diferentes coberturas vegetales evaluadas en la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá, especialmente entre las de herbazal abierto de páramo y las de plantación de eucalipto. El flujo de CO<sub>2</sub> del suelo fue mayor en las plantaciones forestales de eucalipto y menor en los herbazales abiertos de páramo. La temperatura del suelo y la temperatura ambiental, así como

la elevación, son los factores que más se relacionaron con el flujo de CO<sub>2</sub> del suelo, lo que explica, a su vez, la variación en la respiración del suelo.

## Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por el proyecto 1121 de la Sub-dirección Científica del Jardín Botánico de Bogotá. Agradezco este apoyo, así como el brindado por el equipo de profesionales, técnicos y operativos de la línea de Investigación en Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos y por su coordinador, Jairo Solorza. Por último agradezco los permisos de ingreso y trabajo en las instalaciones en las que se llevó a cabo el trabajo de campo.

## Conflicto de intereses

La autora declara que no tiene ningún conflicto de intereses que pueda influir en el proceso de revisión por pares y la publicación del artículo.

## Referencias

- Bonnell, A. C. (2018)**. Monitoreo del flujo del carbono presente en el suelo en 675m<sup>2</sup> de parcelas establecidas para evaluar los efectos de cambio climático. Documento de trabajo. Jardín Botánico de Bogotá. Bogotá. p. 77.
- Borrero-Benavides, J. C. (2012)**. Biomasa aérea y contenido de carbono en el campus de la Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá. Trabajo de grado. Ecología, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Carvajal, A., Feijoo, A., Quintero, H., & Rondón, M. (2009)**. Carbono orgánico del suelo en diferentes tipos de uso del terreno en paisajes andinos colombianos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. **9** (3): 222-235.
- Carvalho Gomes, L., Cardoso, I. M., Mendonca, E. S., Braganca, R., Schiavon, V., Sena, T. (2016)**. Trees modify the dynamics of soil CO<sub>2</sub> efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*. **224**: 30-39.
- Conservación Internacional-CI & Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR. (2009)**. Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá: Inventario de Fauna. Bogotá. 133 p.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR. (2006)**. Plan de manejo de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá. Documento principal. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR. Bogotá.
- Deb, S., Bhadoria, P. B. S., Mandal, B., Rakshit, A., Singh, H. B. (2015)**. Soil organic carbon: Towards better soil health, productivity and climate change mitigation. *Climate Change and Environmental Sustainability*. **3** (1): 26-34. Doi: 10.5958/2320-642X.2015.00003.4
- Decina, S. M., Hutyra, L. R., Getson, J. M. Reinmann, A. B., Short Gianotti, A. G., Templer P. H. (2016)**. Soil respiration contributes substantially to urban carbon fluxes in the greater Boston area. *Environmental Pollution*. **212**: 433-439.
- De Jong, B. (2001)**. Cambio de uso de suelo y flujos de carbono en los Altos de Chiapas, México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, p. 11. Valdivia, Chile.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO. (2017)**. Soil Organic Carbon: The hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 77 p.

- Fóti, S., Balogh, J., Herbst, M., Papp, M., Koncz, P., Bartha, S., Acosta, M.** (2016). Metaanalysis of field scale spatial variability of grassland soil CO<sub>2</sub> efflux: Interaction of biotic and abiotic drivers. *Catena*. **143**: 78-89.
- Grand, S., Rubin, A., Verrecchia, E., Vittoz, P.** (2016). Variation in soil respiration across soil and vegetation types in an alpine valley. *PLoS ONE*. **11** (9): e0163968. Doi:10.1371/journal.pone.0163968
- Jordan, A., Jurasinski, G., Glatzel, S.** (2009). Small scale spatial heterogeneity of soil respiration in an old growth temperate deciduous forest. *Biogeosciences Discuss*. **6**: 9977-10005.
- Kutzbach, L., Schneider, J., Sachs, T., Giebels, M., Nykanen, H., Shurpali, N. J., Martikainen, P. J., Alm, J., Wilmking, M.** (2007). CO<sub>2</sub> flux determination by closed-chamber methods can be seriously biased by inappropriate application of linear regression. *Biogeosciences*. **4**: 1005-1025.
- Lal, R.** (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. **123**: 1-22.
- Luo, Y. & Zhou, X.** (2006). *Soil Respiration and the Environment*. Academic Press, Elsevier, Inc. USA. 316 p.
- Merbald, L., Ziegler, W., Mukelabai, M. M., Kutsch, L.** (2011). Spatial and temporal variation of CO<sub>2</sub> efflux along a disturbance gradient in a miombo woodland in Western Zambia. *Biogeosciences*. **8**: 147-164. Doi: 10.5194/bg-8-147-2011.
- Metcalf, D. B., Fisher, R. A., Wardle, D. A.** (2011). Plant communities as drivers of soil respiration: pathways, mechanisms, and significance for global change. *Biogeosciences*. **8**: 2047-2061.
- Murcia-Rodríguez, M. A. & Ochoa-Reyes, M. P.** (2008). Respiración del suelo en una comunidad de pastizal del bosque altoandino en la cuenca del río Pamplonita, Colombia. *Caldasia*. **30** (2): 337-353.
- Murcia-Rodríguez, M. A., Ochoa-Reyes, M. P., Poveda-Gómez, F.E.** (2012). Respiración del suelo y caída de hojarasca en el matorral del bosque altoandino (Cuenca del río Pamplonita, Colombia). *Caldasia*. **34** (1): 165-185.
- Oyonarte, C. Rey, A., Raimundo, J., Miralles, I., Escribano, P.** (2012). The use of soil respiration as an ecological indicator in arid ecosystems of the SE of Spain: Spatial variability and controlling factors. *Ecological Indicators*. **14**: 40-49. Doi: 10.1016/j.ecolind.2011.08.013.
- Phillips J.F., Duque A.J., Yepes A.P., Cabrera K.R., García M.C., Navarrete D.A., Álvarez E., Cárdenas D.** (2011). Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia. Estratificación, alometría y métodos analíticos. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 68 p.
- Pacific, V. J., McGlynn, B. L., Riveros-Iregui, D. A., Welsh, D. L., Epstein, H.** (2008). Variability in soil respiration across riparian-hillslope transitions. *Biogeochemistry*. **91**: 51-70. Doi: 10.1007/s10533-008-9258-8.
- Peña, D. C.** (2015). Variabilidad del flujo de CO<sub>2</sub> del suelo bajo diferentes coberturas vegetales en el páramo de Guerrero. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 102 p.
- Pouyat, R., Groffman, P., Yesilonis, I., Hernández, L.** (2002). Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*. **116**: S107-S118.
- Raich, J. & Schlesinger, W.** (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*. **44**: 81-99.
- Riveros-Iregui, D. A., McGlynn, B. L., Epstein, H. E., Welsh, D. L.** (2008). Interpretation and evaluation of combined measurements techniques for soil efflux: Discrete surface chambers and continuous soil CO<sub>2</sub> concentration probes. *Journal of Geophysical Research*. **113**: 1-11. Doi: 10.1029/2008JG000811
- Rochette, P. & Hutchinson, G.** (2005). *Measurement of soil respiration in situ: Chamber Techniques*. Publications from USDA-ARS/UNL Faculty. 1379. Nebraska, USA. 40p. Fecha de consulta: 23 de febrero de 2018. Disponible en: <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1379>
- Rodríguez, M.** (2016). Stock de carbono del suelo, a escala local, en ocho sistemas de uso agrícola en el piedemonte llanero. Tesis de doctorado en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia. 140 p.
- Sainju, U. M., Caesar-TonThat, T., Caesar, A.** (2012). Comparison of soil carbon dioxide flux measurements by static and portable chambers in various management practices. *Soil & Tillage Research*. **118**: 123-131. Doi:10.1016/j.still.2011.10.020.
- Sanabria, Y. K. & Puentes, D. L.** (2017). Evaluación de la biomasa y captura de carbono en bosques altoandinos mediante patrones florísticos, estructurales y funcionales en la cordillera oriental, Cundinamarca. Trabajo de grado, Ingeniería Forestal. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 74 p.
- Sánchez, D. V.** (2016). Dinámica de carbono orgánico en suelos de sistemas agroforestales cafeteros en Tibacuy, Cundinamarca. Trabajo de grado, Maestría en Agroforestería Tropical. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, UDCA. Bogotá. 99 p.
- Sánchez, M. R. & Romero, L. P.** (2016). Transformación del paisaje, carbono orgánico en el suelo y selección de áreas prioritarias de conservación de la Reserva Forestal Bosque Oriental (Bogotá, Colombia). Trabajo de grado. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, UDCA. Bogotá.
- Scharleman, J. P.W., Tanner, E., Hiederer, R., Kapos, V.** (2014). Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*. **5** (1): 81-91. Doi: 10.4155/cmt.13.77
- Secretaría Distrital de Ambiente.** (2018). Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Bogotá. Fecha de consulta: 9 de noviembre 2018. Disponible en: <http://201.245.192.252:81/>
- Sun, Q., Wang, R., Hu, Y., Yao, L., Guo, S.** (2018). Spatial variation of soil respiration and temperature sensitivity along a steep slope of semiarid Loess Plateau. *PLoS One*. **13** (4): e0195400. Doi: 10.1371/journal.pone.0195400.
- van Haren, J. L. M., Cosme de Oliveira Jr., Restrepo-Coupe, N., Hutyrá, L. de Camargo, P. B., Keller, M., Saleska S. R.** (2010). ¿Do plant species influence soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in a diverse tropical forest? *Journal of Geophysical Research*. **115**: G03010. Doi: 10.1029/2009JG001231
- Vásquez, J., Macías, F., Menjivar, J. C.** (2013). Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el departamento del Magdalena, Colombia. *Bioagro*. **25** (3): 175-180.
- Wang, M., Liu, X., Zhang, J., Li, X., Wang, G., Li, X., Chen, W.** (2015). Soil respiration associated with plant succession at the meadow steppes in Songnen Plain, Northeast China. *Journal of Plant Ecology*. **8** (1): 51-60
- Wang J, Fu X, Zhang Z, Li M, Cao H, Zhou X., Ni, H.** (2019). Responses of soil respiration to nitrogen addition in the Sanjiang Plain wetland, northeastern China. *PLoS ONE*. **14** (1): e0211456. Doi: 10.1371/journal.pone.0211456

# Caracterización del agente causante de la deformación de los frutos de la uva (*Vitis vinifera* L.) var. Red Globe en La Unión, Valle del Cauca, Colombia

✉ Silvia Patricia López-Zapata<sup>1,\*</sup>, ✉ Jairo Castaño-Zapata<sup>1</sup>,  
✉ Rafael Arango-Isaza<sup>2</sup>, ✉ Dayana Andrea Vásquez-Barajas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Maestría en Fitopatología, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Medellín, Escuela de Biociencias, Medellín (Antioquia), Colombia.

## Resumen

En años recientes una enfermedad caracterizada por la necrosis y el hundimiento de la epidermis de las bayas de la vid (*Vitis vinifera* L.) se ha venido presentando en la variedad Red Globe, cultivada en predios vitícolas del municipio de La Unión, Valle del Cauca, lo que ha resultado en pérdidas de rendimiento y calidad. Para determinar la etiología de la enfermedad, se recolectaron y procesaron frutos que mostraban los signos típicos de decoloración y posterior necrosis. Con mayor prevalencia se encontró un hongo, que fue sometido a pruebas de patogenicidad y caracterización morfológica mediante microscopía de luz y electrónica (*Environmental scanning electron microscopy*, ESEM), complementadas con pruebas moleculares. Los postulados de Koch se cumplieron mediante la inoculación de una suspensión conidial de  $1 \times 10^6$  conidios por  $\text{mL}^{-1}$  de agua en bayas sanas de la misma variedad. Al cabo una semana se empezaron a observar signos similares a los observados en campo. Las búsquedas de similitud con la herramienta BLAST mostraron una identidad del 100 % entre las secuencias del espaciador transcribible interno (*internal transcribed spacer*, ITS) y *Colletotrichum aenigma* y *C. siamense*, pertenecientes al complejo de especies *Colletotrichum gloeosporioides*, lo que proporciona información útil para entender la enfermedad de las bayas de la vid y poder diseñar estrategias de manejo. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Antracnosis; *Colletotrichum aenigma*; *C. siamense*; Vid; Vitaceae.

## Characterization of the causal agent of the deformation of the fruits of the grape (*Vitis vinifera* L.) var. Red Globe, in La Unión, Valle del Cauca, Colombia

### Abstract

In recent years, a disease characterized by the necrosis of the grape berries (*Vitis vinifera* L.) has appeared on the Red Globe variety cultivated in vineyards in the municipality of La Unión, Valle del Cauca, Colombia, resulting in loss of yield and quality. To identify the etiology of the disease, fruits showing the typical symptoms of discoloration and subsequent necrosis were collected and processed. With high frequency was found a fungus that was subjected to pathogenicity tests and morphological characterization by light and electron microscopy (ESEM). Koch's postulates were fulfilled by the inoculation of a conidial suspension of  $1 \times 10^6$  conidia per milliliter of water on healthy berries of the same variety. After a week, symptoms similar to those observed in the field began to be observed. The search for similarities with BLAST showed that the sequences of ITS had a 100% identity with *Colletotrichum aenigma* and *C. siamense* belonging to the complex of species of *Colletotrichum gloeosporioides*, which provides useful information to understand the disease of the grape berries and to design management strategies to control it. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Anthracnose; *Colletotrichum aenigma*; *C. siamense*; Grape; Vitaceae.

## Introducción

La vid es uno de los cultivos de frutales más importantes en el mundo, tanto para el consumo en fresco como para la producción de vino (Sung, et al., 2008). Las regiones productoras están localizadas en los hemisferios norte y sur, en donde se obtiene una cosecha anual (Hernández, et al., 2011). Se estima que la superficie cultivada de vid en el mundo es de 7,6 millones de hectáreas (ha) (Faz, et al.,

2013). En Colombia se cultiva en las zonas del Valle del Cauca y Boyacá; la producción nacional para el año 2016 fue de 30.000 ton en 2.500 ha, con un rendimiento promedio de 10,5 t por  $\text{ha}^{-1}$  (Agronet, 2018).

### \*Correspondencia:

Silvia Patricia López-Zapata; [silvia.821517448@ucaldas.edu.co](mailto:silvia.821517448@ucaldas.edu.co)

Recibido: 4 de marzo de 2019

Aceptado: 11 de mayo de 2019

Editor: Juan Díaz Merlano

Desde el 2016 se ha observado una nueva enfermedad caracterizada por la necrosis de las bayas de la uva (*Vitis vinifera* L.), en una plantación vitícola del municipio de La Unión, Valle del Cauca, específicamente en la variedad Red Globe. La enfermedad ocurre en focos a partir de los 40 días del inicio de la fructificación y la gravedad aumenta con la edad de los frutos; las plantas con racimos cuyas bayas están afectadas, no presentan alteraciones visibles en los tallos, las hojas, los zarcillos o en otras estructuras que puedan utilizarse como indicadores tempranos de la enfermedad.

Se han reportado síntomas similares a los observados en campo en diferentes variedades de vid (Kummuang, *et al.*, 1996; Peng, *et al.*, 2013; Yan, *et al.*, 2014; Zhang, *et al.*, 2015); el agente causante de la enfermedad se ha clasificado mediante caracteres morfológicos y moleculares entre las especies pertenecientes al género *Colletotrichum* (Chowdappa, *et al.*, 2009; Sawant, *et al.*, 2012; Peng, *et al.*, 2013).

En el mundo se han reportado pérdidas importantes en diferentes cultivos ocasionadas por especies de *Colletotrichum*, por ejemplo, en vides muscadinas la disminución varía entre 10 y 50 % (Kummuang, *et al.*, 1996), en tomate de árbol [*Solanum betacea* (Cav.) Sendt] puede ser mayor del 50 % (Afanador-Kafuri, *et al.*, 2013), en pimientos la pérdida puede llegar al 100 % (Lewis, *et al.*, 2004) y en pera (*Pyrus bretschneideri* Rehd.), entre 60 y 90 % (Jiang, *et al.*, 2014); dichas pérdidas representan más de 30 millones de kilogramos de fruta valorados en 30 millones de dólares anuales (Zhang, *et al.*, 2015).

En Colombia no existen reportes de las pérdidas que causa esta enfermedad en la variedad de vid Red Globe, y su impacto en la zona de estudio radica en que es una variedad de mesa que se consume en fresco y, por consiguiente, cada racimo pierde peso a medida que deben retirarse las uvas afectadas, reduciendo así los ingresos económicos de los agricultores.

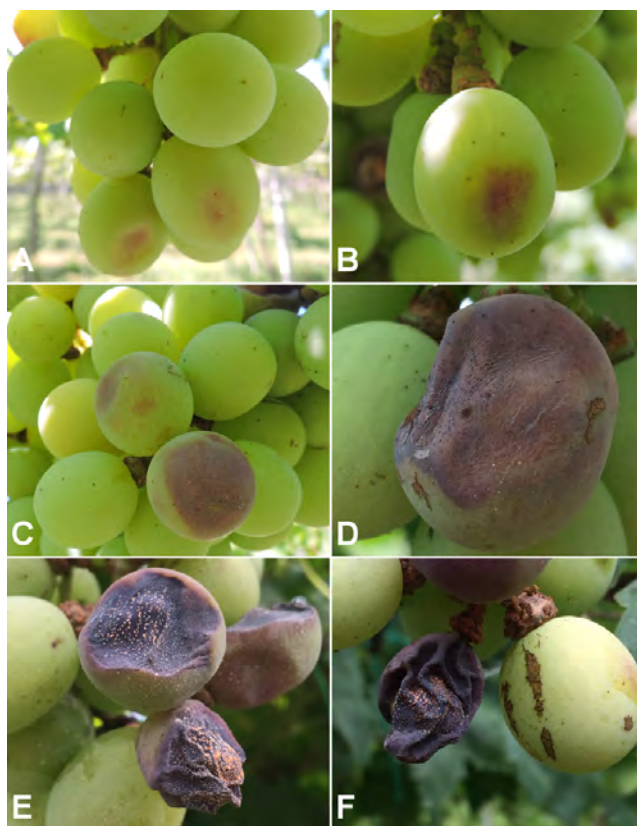
La caracterización morfológica y genética del agente causante de esta enfermedad proporcionará la información necesaria para establecer las medidas correctas de manejo, evitando el incremento en las pérdidas y su dispersión hacia otras plantaciones y variedades aún no afectadas.

## Materiales y métodos

**Descripción de los síntomas de la enfermedad en campo y recolección de muestras.** Inicialmente, los síntomas se manifiestan a través de una decoloración rojiza muy tenue (Figura 1A) que avanza gradualmente (Figura 1B, C) y se acompaña del hundimiento progresivo de la epidermis (Figura 1D) seguido de la deformación y la necrosis de los frutos (Figura 1E), los cuales adquieren forma de pasa (Figura 1F). El material afectado se recogió en el predio La Pista, del municipio de La Unión, Valle del Cauca, en un viñedo de 8 años en estado fisiológico 79 (Lorenz, *et al.*, 1994), sembrado con uva de mesa variedad Red Globe, del cual se tomaron bayas que presentaban los signos típicos de la enfermedad. Las bayas se cortaron con tijeras previamente desinfectadas

y se almacenaron en bolsas de plástico transparentes para, posteriormente, ser llevadas al Laboratorio de Fitopatología del Departamento de Producción Agropecuaria de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Caldas.

**Aislamiento del agente causante de la enfermedad.** Se siguió la metodología descrita por Agrios (2005): se cortaron secciones pequeñas de aproximadamente 5 mm<sup>2</sup> que incluían tejido afectado y aparentemente sano; luego se colocaron en el interior de una caja de Petri con hipoclorito de sodio al 1 % durante dos minutos y posteriormente se transfirieron a alcohol al 70 % y agua destilada estéril durante 50 segundos; después se pusieron sobre papel toalla estéril para remover el exceso de humedad y a continuación se colocaron cuatro trozos en cada caja de Petri con medio de cultivo de papa, dextrosa y agar (PDA, Merck®) (39 g por L<sup>-1</sup> de agua); las cajas se mantuvieron en incubación a 28 °C hasta observar algún crecimiento. Una vez se constató el desarrollo del micelio sobre y alrededor de los trozos de tejido previamente sembrados, se procedió a tomar un segmento del sitio de crecimiento activo y se transfirió a nuevas cajas de Petri con PDA, las cuales se sometieron al mismo proceso de incubación hasta obtener colonias puras,



**Figura 1.** Evolución de los síntomas de la enfermedad en campo. **A.** Síntomas iniciales de coloración rojiza. **B, C.** Avance gradual de la coloración. **D.** Hundimiento de la epidermis. **E.** Deformación de los frutos acompañada de necrosis. **F.** Estado final del fruto en forma de pasa.

uniformes y con esporulación suficiente para realizar las pruebas de patogenicidad y las caracterizaciones morfológicas y moleculares.

La morfología de la colonia y las características de los conidios se registraron después de 15 días de crecimiento a  $28 \pm 1$  °C teniendo en cuenta las características de margen de la colonia, la apariencia, el color de la superficie y el reverso, el patrón de esporulación, el color de la masa conidial y la forma y el tamaño de los conidios. La forma de los conidios se observó bajo un microscopio de luz (Leica DM500) y mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM). Con este último método se analizaron también segmentos de tejido de las bayas afectadas y las estructuras reproductivas producidas sobre el medio de cultivo, y las imágenes obtenidas se procesaron usando el programa ImageJ (Ferreira & Rasband, 2012), con el cual también se midió el ancho y el largo de 50 conidios para determinar su tamaño promedio en micras ( $\mu\text{m}$ ) (Yan, et al., 2014).

#### **Pruebas de patogenicidad según los postulados de Koch.**

La suspensión conidial se preparó usando la metodología descrita por Onesti (2014): se inundaron las cajas de Petri con agua destilada estéril, se desechó la superficie del agar, se pasó la solución resultante a través de una gasa doble y con un hemacitómetro se ajustó una concentración de  $1 \times 10^6$  conidios por  $\text{mL}^{-1}$  de agua.

La preparación de los frutos para inocular se efectuó siguiendo la metodología descrita por Riascos (2011), con algunas variaciones, en tres racimos sanos de uva de 330 g correspondientes al estado fisiológico 79 (Lorenz, et al., 1994), que presentaban un tamaño uniforme. Los racimos se lavaron con agua corriente y luego se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 1 % durante 5 minutos y posteriormente se lavaron tres veces con agua destilada estéril y se secaron con papel toalla estéril (Ruvishika, et al., 2015); después, los racimos se introdujeron en cajas de plástico con cierre hermético que contenían rejillas; en el fondo de cada caja había una servilleta de papel absorbente humedecido con agua destilada estéril para asegurar condiciones de humedad relativa de alrededor del 95 %.

La inoculación se hizo según el método de Cai, et al. (2009): sobre la zona ecuatorial de 35 bayas por racimo se hicieron tres heridas con una aguja estéril y sobre ellas se depositó una gota (6  $\mu\text{L}$ ) de la suspensión conidial ( $1 \times 10^6$  conidios por  $\text{mL}^{-1}$ ); para el tratamiento sin herida se obvió la punción con la aguja estéril y para el testigo la gota de agua destilada estéril se colocó sobre la misma zona empleada en los frutos inoculados.

Los frutos inoculados se mantuvieron en un cuarto de termoterapia a 28 °C y bajo observación periódica hasta visualizar los síntomas de la enfermedad y de la presencia del patógeno; el hongo se aisló de las bayas infectadas artificialmente usando la técnica descrita y los cultivos resultantes se examinaron con base en la morfología de la colonia y las esporas para confirmar el cumplimiento de los postulados de Koch. La observación del agente causante

de la enfermedad mediante microscopía de luz, se complementó con microscopía electrónica de barrido ambiental y, finalmente, el aislamiento se caracterizó molecularmente para determinar la especie del patógeno.

**Aislamiento y purificación del ADN fúngico.** Los aislamientos se cultivaron en matraces de 100 mL con 40 mL de medio Sabouraud durante 12 días a 26 °C. Después de este periodo, se recogió la biomasa y se almacenó a -70 °C. El ADN se extrajo utilizando el método basado en bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) (Weising, et al., 1991; Reader & Broda, 1985), con modificaciones menores (Saldarriaga, 2006), así: los micelios recolectados se maceraron con nitrógeno líquido hasta obtener una textura fina que fue sometida a una nueva suspensión en tubos Eppendorf de 1,5 mL con 700  $\mu\text{L}$  del tampón CTAB [100 mM Tris-HCl (pH 8,0), NaCl 1.4 M, 20 mM de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y CTAB al 2%] más 4  $\mu\text{L}$  de  $\beta$ -mercaptoetanol, los cuales se incubaron a 65 °C durante 60 minutos para luego ser sometidos a dos lavados de cloroformo y uno de cloroformo-álcohol isoamílico (24:1 v/v). Se recogió la fase acuosa y se precipitaron los ácidos nucleicos con un volumen de isopropanol. El sedimento se recogió por centrifugación a 14.000 g durante 20 minutos, luego se lavó con etanol al 75 % y se secó a temperatura ambiente. El ADN obtenido fue tratado con ARNasa durante 1 hora a 37 °C. Para determinar la calidad del ADN, este se analizó por electroforesis en geles de agarosa al 1 %. La concentración se estimó utilizando un espectrofotómetro ND-2000 UV-Vis (NanoDrop™ Technologies, USA). Para la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), el ADN se ajustó con tris EDTA (TE) a una concentración de 100 ng/ $\mu\text{L}$  en tampón TE (10 mM Tris – HCl, 1 mM EDTA; pH 8,0).

**Amplificación por PCR.** Para la identificación molecular se realizó la amplificación por PCR de la región del ITS. Se utilizaron los cebadores ITS1 (5' TCCGTAGGTGAACC TGCGG 3') e ITS4 (5' TCCTCCGCTTATTGATATGC 3') (White, et al., 1990). La PCR se realizó en un volumen total de 25  $\mu\text{L}$ , con 100 ng de ADN genómico, 1x de tampón de PCR (Thermo Scientific™), 1,5 nM de  $\text{MgCl}_2$ , 0,2 mM de dNTP, 2  $\mu\text{M}$  de cada cebador y 1,5 U de Taq polimerasa (Thermo Scientific™). Las reacciones se incubaron en un termociclador Thermal iCycler® (Bio-Rad Laboratories, Inc., CA, USA) con una temperatura inicial de 94 °C durante 1 minuto, seguido de 30 ciclos así: 94 °C durante 1 min, 50 °C durante 1 min y 72 °C durante 1 min. Por último, se hizo una extensión final de 5 minutos. Los productos amplificados fueron separados por electroforesis en gel de agarosa al 1 % utilizando GelRed (Biotium, California, USA) como colorante y visualizados con UV en un transiluminador Biometra (Bio-DocAnalyze de Analytik Jena AG, Jena, Alemania).

**Secuenciación de la región ITS del ADNr.** Los productos de PCR se purificaron con el Kit GE Healthcare iLLustra™ GFX™ (GE Healthcare, Chicago, USA) siguiendo las instrucciones del fabricante y se secuenciaron con el método de la terminación de la cadena (SANGER REF), servicio prestado por MacroGen Incorporated (Seúl, Corea).



**Análisis de las secuencias.** Las secuencias obtenidas se curaron utilizando el programa CLC Main Workbench 7.8 (QIAGEN Bioinformatics, Aarhus, Dinamarca) y se compararon con las bases de datos curadas del GenBank mediante el programa BLASTn.

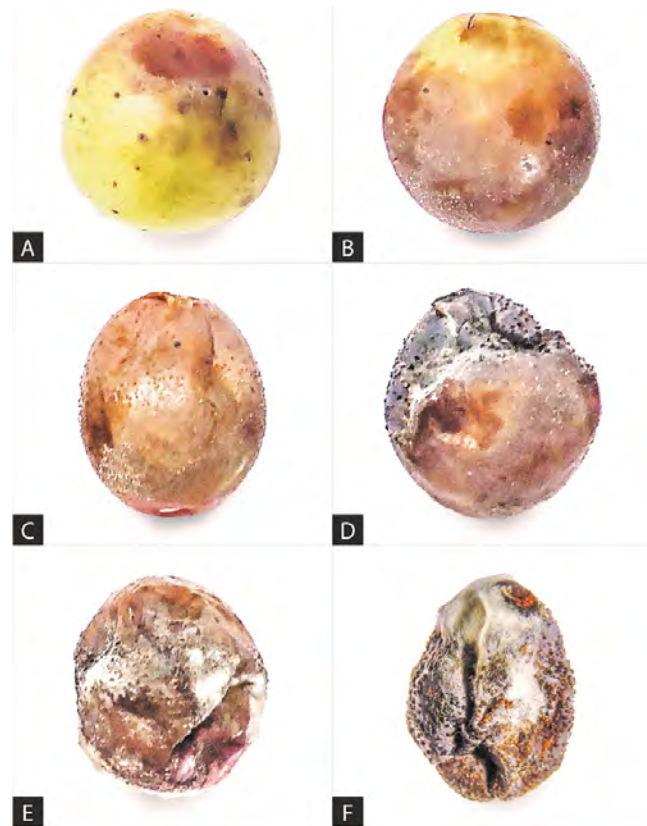
**Análisis filogenético.** Con el fin de tener una idea más clara de la identidad del aislamiento se hizo un análisis filogenético utilizando el programa MEGA V 6.0 (Tamura, et al., 2013) con el método de *neighbor-joining* (Saitou, & Nei, 1987) y *bootstrap* de 10.000 réplicas. La distancia evolutiva se calculó mediante el modelo matemático de dos parámetros de Kimura (Kimura, 1980) y la distribución gamma. En el análisis se incluyeron las siguientes 22 secuencias obtenidas del Genbank pertenecientes al complejo *C. gloeosporioides*: *Colletotrichum asianum* (JX010192.1), *Colletotrichum cordylinicola* (JX010226.1), *Colletotrichum fructicola* (JX010166.1), *Colletotrichum gloeosporioides* (JX010155.1), *Colletotrichum huri* (GQ329687), *Colletotrichum kahawae* subsp. *Kahawae* (JX010234.1), *Colletotrichum musae* (JX010143.1), *Colletotrichum nupharicola* (JX010189.1), *Colletotrichum psidii* (JX010219.1), *Colletotrichum siamense* (JX010250.1), *Colletotrichum tropicale* (JX010275.1), *Colletotrichum theobromicola* (JX010291.1), *Colletotrichum xanthorrhoeae* (JX010261.1), *Colletotrichum aenigma* (JX010244.1), *Colletotrichum aeschynomenes* (JX010176.1), *Colletotrichum alatae* (JX010190.1), *Colletotrichum alienum* (JX010217.1), *Colletotrichum aotearoa* (JX010220.1), *Colletotrichum clidemiae* (JX010274.1), *Colletotrichum kahawae* subsp. *ciggaro* (JX010230.1), *Colletotrichum salsae* (JX010242.1) y *Colletotrichum ti* (JX010267.1).

## Resultados y discusión

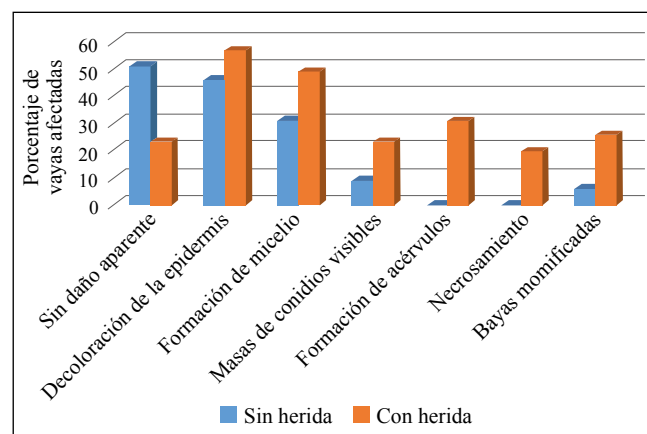
**Pruebas de patogenicidad.** El aislamiento inoculado sobre las bayas heridas produjo lesiones pequeñas de color rojizo después de 7 días (Figura 2A, B); en las bayas sin heridas los signos de la enfermedad se observaron 5 días después; las lesiones aumentaron gradualmente de tamaño tornándose oscuras, necrosadas y hundidas (Figura 2C, D); a los 21 de la inoculación todas las bayas se cubrieron con micelio, acérvulos y masas de esporas y, finalmente, terminaron convertidas en una estructura seca y con apariencia de uva pasa (Figura 2E, F); los frutos tratados con agua destilada estéril no desarrollaron signos de la enfermedad. Al aislar de nuevo el hongo de los frutos inoculados y enfermos, se demostró su patogenicidad y se identificó como *Colletotrichum* spp., cumpliéndose así con los postulados de Koch. El tiempo transcurrido desde la inoculación hasta la esporulación fue similar al reportado por Daykin & Milholland (1984b) para *Colletotrichum* sp. en la variedad de vid Carlos en Carolina del Norte (Estados Unidos), quienes observaron la esporulación de este patógeno entre los 21 y los 28 días de la inoculación.

Se demostró que las heridas en las bayas tienen un efecto determinante sobre el desarrollo de la enfermedad, siendo los signos más evidentes en estos frutos que en las bayas no

heridas (Figura 3), lo que concuerda con los resultados de Zhang, et al. (2015) y Prihastuti, et al. (2009) al inocular *Colletotrichum gloeosporioides* y *Colletotrichum* spp. en hojas de peral y cerezas de café, respectivamente. Además



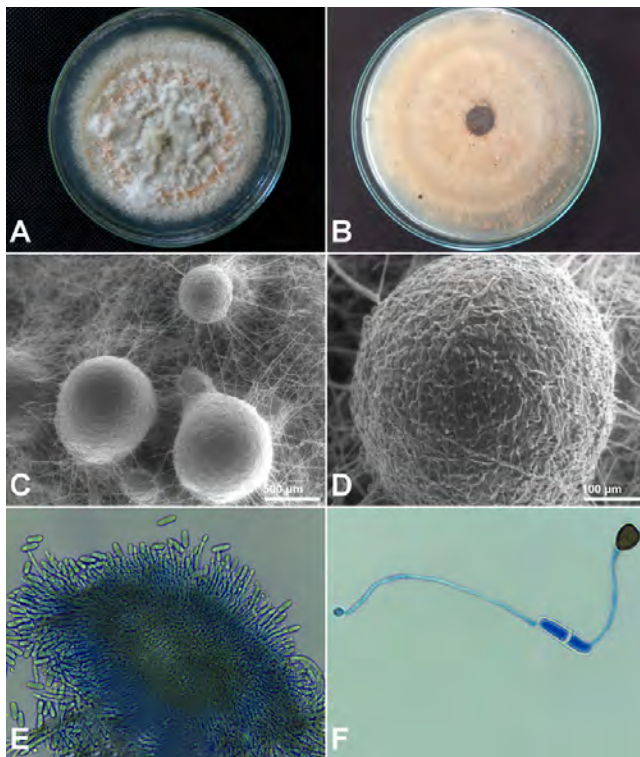
**Figura 2.** Desarrollo de los síntomas de la enfermedad inducidos mediante inoculación artificial de bayas de uva con conidios de *Colletotrichum* spp. aislados de frutos enfermos después de una semana (A, B), dos semanas (C, D) y tres semanas (E, F).



**Figura 3.** Efecto de las heridas en las bayas sobre el desarrollo de la enfermedad. Obsérvese como las heridas favorecen la expresión de los signos más rápidos, así como del hongo y la momificación de los frutos.

de corroborar el efecto de las heridas en los procesos infectivos de *Colletotrichum* spp., este resultado explicaría el por qué en campo la incidencia de la enfermedad se observa en mayor porcentaje después del primer raleo, momento en el que se retiran bayas del racimo, lo que, muy probablemente, causa daños imperceptibles en los frutos que posteriormente se constituyen en la vía de entrada para el patógeno; asimismo, la manipulación de los racimos en las plantas puede contribuir a la diseminación del hongo.

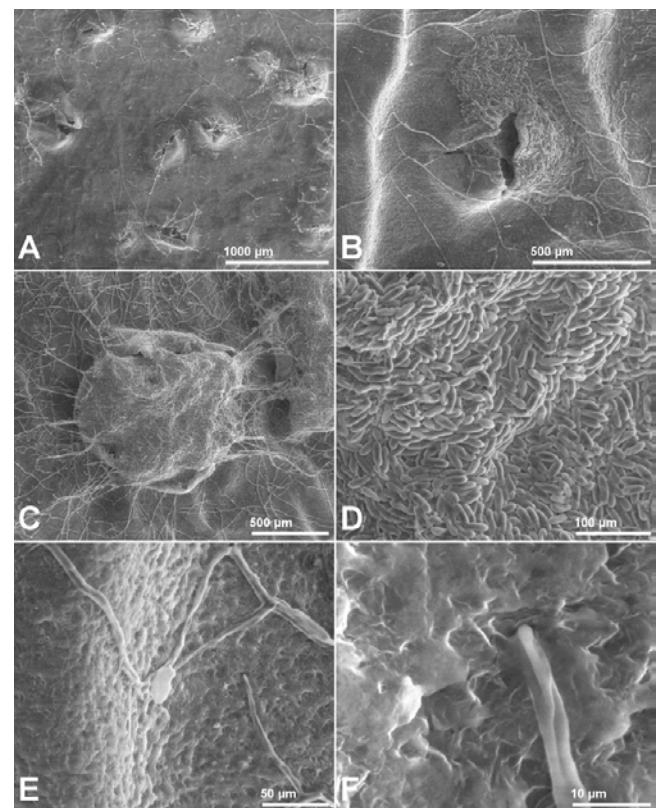
**Caracterización morfológica.** Los cultivos puros obtenidos en PDA presentaron de manera consistente una colonia con márgenes regulares, micelio blanco de aspecto algodonoso con uno o dos anillos concéntricos sutilmente marcados (Figura 4A); en el reverso de la colonia también se observó una apariencia color naranja-salmón, textura densa y anillos concéntricos (Figura 4B). Después de 15 días, las colonias se cubrieron de masas abundantes de conidios color naranja formando estructuras estromáticas redondas y oscuras observables en el fondo de la colonia (Figura 4C, D), cuyo interior siempre se encontró vacío, estructuras que según **Weir, et al. (2012)** corresponden a un tejido de hifas fuertemente unidas en lugar de células parenquimatosas, lo que las diferencia de peritecios que pueden producirse en el estado perfecto de algunos hongos. Los conidios se encontraron en abundancia sobre los conidióforos cortos (Figura 4E), individualmente fueron unicelulares, lisos,



**Figura 4.** Características del hongo aislado en PDA. **A.** Apariencia de la colonia en el anverso. **B.** en el reverso. **C, D.** Masas de conidios sobre el medio de cultivo. **E.** Acérvulo, 40X. **F.** Conidio germinado y apresorio, 100X

hialinos, con ambos extremos redondeados y una longitud que osciló entre los 11,08 y los 14,13  $\mu\text{m}$  y un ancho entre 4,04 y 5,70  $\mu\text{m}$ , características similares a las descritas para *Colletotrichum* spp. (**Freeman, et al., 1998; Greer, et al., 2011; Sawant, et al., 2012; Zhang, et al., 2015**). Cuando los conidios germinaron produjeron un tubo germinal hialino, largo a partir de uno de sus extremos, y un apresorio oval con borde liso, no lobulado, de color marrón (Figura 4F). La tasa de crecimiento del hongo fue, en promedio, de 7,5 mm por día, lo que coincide con el crecimiento reportado para otras especies de *Colletotrichum* en cítricos (**Huang, et al., 2016**) y en uva (**Whitelaw-Weckert, et al., 2007; Chowdappa, et al., 2009; Yan, et al., 2014**).

**Análisis del hongo mediante microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM).** Al observar el desarrollo del hongo sobre la superficie de los frutos afectados por la enfermedad, se corroboró la identificación del patógeno como *Colletotrichum* spp. por el desarrollo de las hifas y los acérvulos subepidérmicos, así como de los conidios expulsados en abundancia a través de la ruptura de acérvulos (Figura 5A-D). Además, se pudo observar la formación del apresorio (Figura 5E) y la penetración directa de la hifa responsable de la infección sobre la superficie de una baya (Figura 5F).



**Figura 5.** Observación del hongo mediante microscopía de barrido (ESEM) sobre una baya enferma. **A.** Formación de acérvulos. **B, C.** Ruptura de un acérvulo y liberación de conidios. **D.** Morfología de los conidios. **E.** Formación del apresorio. **F.** Detalle de una hifa de infección penetrando el tejido de la baya

Aunque estas observaciones y lo descrito en la literatura (Lewis, *et al.*, 2004; Whitelaw-Weckert, *et al.*, 2007; Peng, *et al.*, 2013) permitieron inferir que se trataba de *Colletotrichum* spp., con los métodos taxonómicos convencionales no es posible hacer una determinación de especies (Sung, *et al.*, 2008), razón por la cual se procedió a caracterizar el hongo molecularmente.

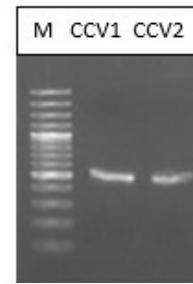
**Caracterización molecular.** El análisis del producto amplificado por PCR mostró una banda de aproximadamente 550 pb que corresponde al tamaño esperado para la región amplificada (Figura 6) (Hernández, *et al.*, 2013). Se secuenciaron exitosamente los fragmentos obtenidos de dos réplicas del aislamiento. Las búsquedas de similitud con la herramienta BLAST mostraron que las secuencias del ITS tuvieron un porcentaje de identidad del 100 % con *C. aenigma* y *C. siamense*, pertenecientes al complejo de especies *Colletotrichum gloeosporioides* (Rhaiem & Taylor, 2016).

**Análisis filogenético.** Con el fin de tener una idea más clara de la ubicación taxonómica del hongo, se hizo un análisis filogenético con 22 secuencias obtenidas de GeneBank. El árbol filogenético basado en el método de *neighbor-joining* y el modelo de los dos parámetros de Kimura evidenció que los dos aislamientos analizados eran más cercanos a las especies de *C. aenigma* y *C. siamense*, formaban un clado monofilético (Weir, *et al.*, 2012) (Figura 7) y coincidían con el análisis de BLAST.

La electroforesis se hizo en gel de agarosa al 1 % y las bandas se visualizaron con GelRed®. El dendograma se generó con el programa MEGA 6.0 utilizando las secuencias ITS1-5.8S-ITS2 obtenidas de GeneBank. Se utilizó el método de *neighbor-joining* con *bootstrap* de 10.000 réplicas. La distancia evolutiva se calculó mediante el modelo matemático de dos parámetros de Kimura y la distribución gamma. Las secuencias obtenidas se almacenaron en GeneBank bajo los códigos MK863412 y MK863413 para *C. aenigma* y *C. siamense*, respectivamente.

Como se deduce de estos análisis, el agente causante de la enfermedad es una especie perteneciente al complejo de *Colletotrichum gloeosporioides*, lo que concuerda con los hallazgos de Kummuang, *et al.* (1996) y Greer, *et al.* (2011), quienes reportan que las uvas infectadas por *Colletotrichum* spp. muestran una masa distintiva de esporas de color naranja, los frutos pierden la turgencia y luego se marchitan, y una vez que las bayas están cubiertas con acérvulos, se encogen y se momifican. Además, la secuencia mostró una identidad del 100 % con *C. aenigma* y *C. siamense* (pertenecientes al complejo de especies *C. gloeosporioides*) (Weir, *et al.*, 2012), por lo que no se puede diferenciar de cuál de las dos especies se trata a menos que se haga la secuenciación de otros genes adicionales.

Asimismo, los signos observados en la zona de estudio son similares a los reportados por Yan, *et al.* (2014) para *Colletotrichum* spp., quienes indican que las bayas enfermas desarrollan lesiones marrones, circulares, hundidas sobre la



**Figura 6.** Productos de PCR a partir de ADN total de los aislamientos. De izquierda a derecha se describe la posición de los pozos. M: marcador de peso molecular; C1: primera réplica del aislamiento; C2: segunda réplica del aislamiento

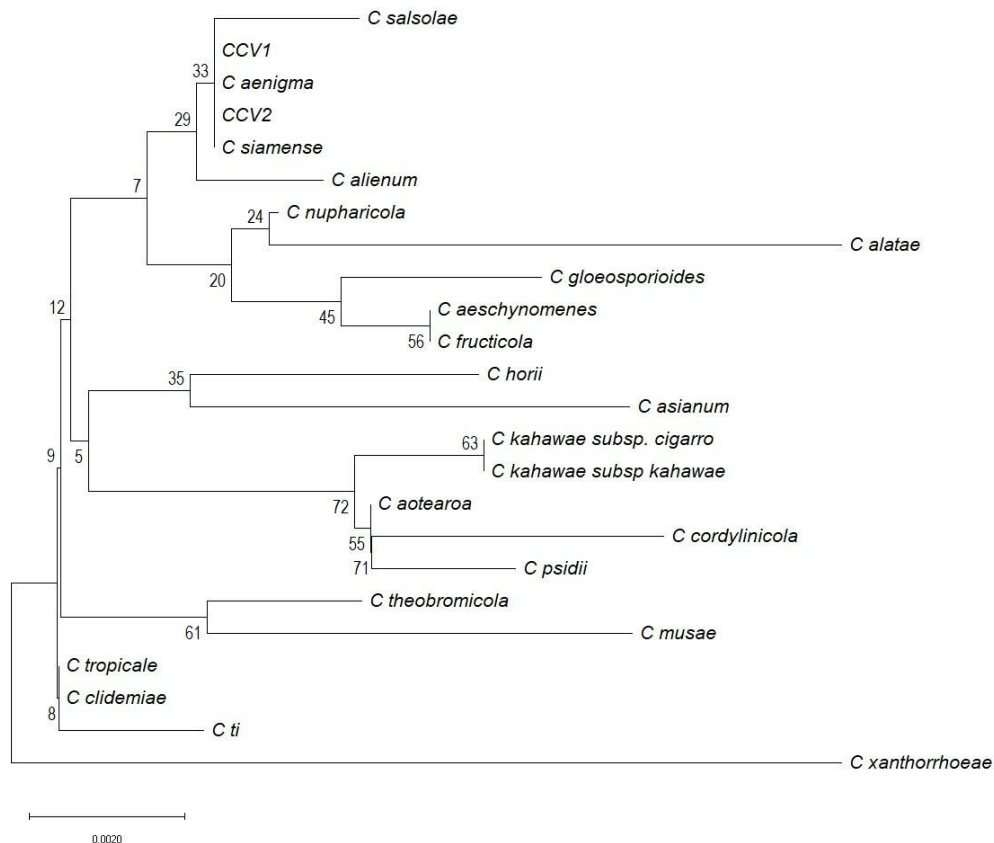
epidermis, las cuales aumentan de tamaño hasta cubrir completamente la baya y presentan masas de conidios de color rosado-salmón; la diferencia de estas observaciones con respecto a lo hallado en el presente estudio es que los signos aparecieron sobre frutos maduros, en tanto que en este, se observaron en frutos verdes; no obstante, Daykin & Milholland (1984b) y Freeman *et al.* (1998) mencionan que las bayas pueden ser susceptibles en cualquier estado de su desarrollo.

En el mismo sentido, las características de color marrón, rojizo o rosa sobre la epidermis, el hundimiento de la superficie de las bayas y las lesiones que se agrandan progresivamente y se cubren de masas de conidios pegajosos de color salmón, están descritas como signos típicos causados por *Colletotrichum gloeosporioides* y *Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds ex. J.H. Simmonds (Shiraishi, *et al.*, 2007); además, el secamiento y la momificación de los frutos también se cuentan entre los síntomas descritos por Sung, *et al.* (2008) para estas dos especies.

El cambio de coloración sobre la epidermis de los frutos está asociado con las respuestas de la planta a las hifas de penetración y varían desde una tinción ligeramente más oscura en el protoplasma hasta la necrosis de las células epidérmicas (Daykin & Milholland, 1984a; Prakash, *et al.*, 1996), tal como se observó en este caso.

*Colletotrichum* spp. es un patógeno que tiene un rango muy amplio de hospedantes y es posible encontrar diferentes especies en un solo hospedante o una misma especie en diferentes hospedantes (Freeman, *et al.*, 1998; Afanador-Kafuri, *et al.*, 2003); las enfermedades que causa pueden presentarse en la precosecha y en la poscosecha y, además de la producción, afectan el mercado y la posibilidad de exportación (Phoulivong, *et al.*, 2010); asimismo, en las regiones tropicales, subtropicales y templadas se ha observado también la enfermedad denominada antracnosis, la cual produce pérdidas más significativas cuando se presenta en los frutos (Freeman, *et al.*, 1998).

Los efectos de *Colletotrichum* spp. en estados diferentes a la etapa de maduración también se han reportado en otras especies, en el café (*Coffea arabica* L.) *C. kahawae* afecta los frutos en desarrollo (Gil, *et al.*, 2002), y en los perales (*Pyrus communis* L.) a frutos jóvenes (Jiang, *et al.*, 2014).



**Figura 7.** Árbol filogenético que muestra la posición de los dos aislamientos obtenidos de *Vitis vinifera* con respecto a otros aislamientos de *Colletotrichum gloeosporioides* obtenidos de GenBank

La antracnosis se ha reportado como una de las enfermedades más importantes del cultivo de la vid debido a las pérdidas económicas que ocasiona (Yan, *et al.*, 2014; Huang, *et al.*, 2016), ya que daña los frutos así como los brotes, las hojas, los zarcillos y las flores (Sawant, *et al.*, 2012).

Durante algún tiempo *C. gloeosporioides* se consideró el único agente causante de la enfermedad en los racimos de la uva (Whitelaw-Weckert, *et al.*, 2007). Sin embargo, otras especies como *C. fructicola*, *C. viniferum* (Peng, *et al.*, 2013), *C. aenigma*, *C. habeiensi* (Yan, *et al.*, 2014), *C. capsici* (Sawant, *et al.*, 2012), *C. acutatum* (Whitelaw-Weckert, *et al.*, 2007; Greer, *et al.*, 2011), *C. godetiae* (Baroncelli, *et al.*, 2014) y *C. siamense* (Santos, *et al.*, 2018) también se han reportado.

*Colletotrichum gloeosporioides* se ha encontrado formando un complejo con *C. acutatum* en diferentes especies de frutos, incluida la uva (Whitelaw-Weckert, *et al.*, 2007). En Australia se encontraron ambas especies en los cultivares Cabernet Sauvignon y Chardonnay (Greer, *et al.*, 2011); también han sido reportadas en China (Suzaki, 2011), Japón (Shiraishi, *et al.*, 2006), Corea (Sung, *et al.*, 2008), y en uvas muscadinas en Mississippi y Carolina del Norte en Estados Unidos (Kummuang, *et al.*, 1996), así como en India (Sawant, *et al.*, 2012).

Los síntomas de la enfermedad causada por *Colletotrichum* spp. pueden confundirse fácilmente con los de otras enfermedades que también inducen la antracnosis sobre los frutos, como *Elsinoe ampeliana*, pero difieren en que este último patógeno causa lesiones con centros de color gris y márgenes de color marrón rojizo a violeta-negro, mientras que *Colletotrichum* spp. causa lesiones necróticas (Yan, *et al.*, 2014), como se evidenció en este estudio.

Aunque se ha mencionado que la incidencia de la antracnosis es menor en uvas de mesa (Yan, *et al.*, 2014), la presencia de la enfermedad en la zona de estudio únicamente sobre las bayas de la variedad Red Globe quizás es una muestra de la susceptibilidad de esta variedad a *C. aenigma* y *C. siamense*. Algo similar se observó en China, en donde se encontró que *C. viniferum* y *C. habeiense* fueron las especies más virulentas (Yan, *et al.*, 2014).

No se produjeron setas en los acérvulos de los aislamientos, ni tampoco sobre el tejido de las bayas, estructura usada generalmente para diferenciar el género *Colletotrichum* de *Elsinoe ampeliana* (Sawant, *et al.*, 2012) y *Gloeosporium* (Agrios, 2005). Se ha demostrado que la presencia de setas no es una característica estable y depende de otros factores como el sustrato, por consiguiente, no debería considerarse como criterio de identificación (Sawant, *et al.*, 2012). Así

lo demostraron Greer, *et al.* (2011) al observar estas estructuras en *C. gloeosporioides* pero no en *C. acutatum*. Por otra parte, Chowdappa, *et al.* (2009) no observaron setas en aislamientos identificados molecularmente como *C. gloeosporioides* y *C. acutatum*.

La caracterización molecular del hongo como *C. aenigma* o *C. siamense*, pertenecientes al complejo de especies de *Colletotrichum gloeosporioides*, es extremadamente útil para entender el ciclo de la enfermedad y ayudar a desarrollar estrategias para su manejo adecuado.

## Conclusiones

Mediante pruebas moleculares y de patogenicidad se demostró que el agente causante de la deformación de los frutos de la uva cultivar Red Globe es causada por un complejo de especies de *C. gloeosporioides*. Mediante microscopía electrónica se confirmó que la presencia de setas en los acérvulos no es una característica que sirva para diferenciar el género *Colletotrichum* de *Gloeosporium*. Este es el primer reporte en Colombia de *C. gloeosporioides* como agente causante de infección en frutos de la vid.

## Agradecimientos

Al Laboratorio de Fitopatología de la Universidad de Caldas y a Vinos Casa Grajales de La Unión, Valle del Cauca.

## Contribución de los autores

Silvia Patricia López Zapata y Jairo Castaño Zapata: identificación de síntomas en campo, aislamiento y purificación, pruebas de patogenicidad y caracterización morfológica del hongo mediante microscopía de luz y electrónica. Rafael Arango Isaza y Dayana Andrea Vásquez: caracterización molecular. Todos los autores participaron en la redacción del documento.

## Conflicto de intereses

Los autores declararon no tener conflictos de intereses.

## Referencias

Afanador-Kafari, L., Minz, D., Maymon, M., Freeman, S. (2003). Characterization of *Colletotrichum* isolates from tamarillo, *Passiflora*, and mango in Colombia and identification of a unique species from the genus. *Phytopathology*. **93**(5):579-587. Doi.org/10.1094/PHYTO.2003.93.5.579

Agrios, G.N. (2005). *Plant pathology*, 5th ed. Academic, New York. 952 p.

Agronet. (2018). Estadísticas de la producción de uva en Colombia. Fecha de consulta: 26 de julio, 2018. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>

Baroncelli, R., Sreenivasaprasad S., Lane, C.R., Thon, M.R., Sukno, S.A. (2014). First report of *Colletotrichum acutatum sensu lato* (*Colletotrichum godetiae*) causing anthracnose on grapevine (*Vitis vinifera*) in the United Kingdom. *New Disease Reports*. **29**: 26. Doi: 10.5197/j.2044-0588.2014.029.026

Cai, L., Hyde, K.D., Taylor, P.W.J., Weir, B.S., Waller, J., Abang, M.M., Zhang, J.Z., Yang, Y.L., Phoulivong, S., Liu, Z.Y., Prihastuti, H., Shivas, R.G., McKenzie,

E.H.C., Johnston, P.R. (2009). A polyphasic approach for studying *Colletotrichum*. *Fungal Diversity*. **39**: 183-204.

Chowdappa, P., Reddy, G.S., Kumar, A., Rao, B.M., Rawal, R.D. (2009). Morphological and molecular characterization of *Colletotrichum* species causing anthracnose of grape in India. *The Asian and Australasian Journal of Plant Science and Biotechnology*. **3** (1): 71-77.

Daykin, M. E., Milholland, R. D. (1984a). Histopathology of ripe rot caused by *Colletotrichum gloeosporioides* on muscadine grape. *Phytopathology*. **74** (11): 1339-1341.

Daykin, M. E., Milholland, R. D. (1984b). Ripe rot of Muscadine grape caused by *Colletotrichum gloeosporioides* and its control. *Phytopathology*. **74**: 710-714. Doi: 10.1094/Phyto-74-710

Faz, R., Madero, E., Lagarda, A., Preciado, P., Ávila, C. (2013). Producción y calidad de la uva de mesa de la variedad Red Globe (*Vitis vinifera* L.) sobre diferentes porta injertos y densidades de población. *Agrofaz*. **13** (3):105-110. Disponible desde internet en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5530959>

Ferreira, T., Rasband, W. (2012). ImageJ user guide/IJ 1.46r. Bioimage Informatics. <http://rsb.info.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>

Freeman, S., Katan, T., Shabi, E. (1998). Characterization of *Colletotrichum* species responsible for Anthracnose diseases of various fruits. *Plant Disease*. **82** (6): 596-605.

Gil, L.F., Varzea, V.M., Do Ceu Silva, M. (2002). La enfermedad de las cerezas del café –CBD– causada por *Colletotrichum kahawae*. *Avances Técnicos* 298. Cenicafé. p. 8.

Greer, L.A., Harper, J.D.I., Savocchia, S., Samuelian, S.K., Steel, S.C. (2011). Ripe rot of South-eastern Australian wine grapes is caused by two species of *Colletotrichum*: *C. acutatum* and *C. gloeosporioides* with differences in infection and fungicide sensitivity. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. **17**: 123-128. Doi: 10.1111/j.1755-0238.2011.00143.x

Harp, T., Pernezny, K., Lewis, M., Miller, S., Kuhn, P., Datnoff, L. (2008). The etiology of recent pepper anthracnose outbreaks in Florida. *Crop Protection*. **27** (10):1380-1384. Doi: 10.1016/j.cropro.2008.05.006

Hernández, J., Trujillo, Y., Durán, D. (2011). Contenido fenólico e identificación de levaduras de importancia vínica de la uva Isabela (*Vitis labrusca*), procedente de Villa del Rosario (Norte de Santander). *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*. **18** (1): 17-25.

Huang, Y.Q., Zang, C.Q., Li, L.X., Liang, C.H., Bai, Y.J., Xie, J.H. (2016). Assessing the genetic diversity of grape ripe rot pathogen *Colletotrichum* using SRAP markers. *Mycosphere*. **7** (8): 1103-1110. Doi: 10.5943/mycosphere/si/2c/3

Jiang, J., Zhai, H., Li, H., Wang, Z., Chen, Y., Hong, N., Wang, G., Chofong, G.N., Xu, W. (2014). Identification and characterization of *Colletotrichum fructicola* causing black spots on young fruits related to bitter rot of pear (*Pyrus bretschneideri* Rehd.) in China. *Crop Protection*. **58**: 41-48. Doi: 10.1016/j.cropro.2014.01.003.

Kimura, M. (1980). A simple method for estimating evolutionary rates of base substitutions through comparative studies of nucleotide sequences. *J. Mol. Evol.* **16**: 111-120.

Kummuang, N., Diehl, S. V., Smith, B. J., Graves, C.H. Jr. (1996). Muscadine grape berry rot diseases in Mississippi: Disease epidemiology and crop reduction. *Plant Disease*. **80** (3): 244-247.

- Lewis, M. L., Nava, C., Miller, S. A. (2004). Identification and management of *Colletotrichum acutatum* on immature bell peppers. *Plant Disease*. **88** (11):1198-1204. Doi: 10.1094/PDIS.2004.88.11.1198
- Lorenz, D.H., Eichorn, K.W., Bleiholder, H., Klose, R., Meier U., Weber, E. (1994). Phänologische Entwicklungsstadien der Weinrebe (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*). Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala, *Vitic. Enol. Sci.* **49**: 66-70.
- Onesti, G. (2015). Studies on inoculum dynamics of *Guignardia bidwellii*, causal agent of grape black rot. Tesis doctoral. Università Cattolica del Sacro Cuore, Piacenza. Italia. P. 170.
- Peng, L. J., Sun, T., Yang, Y., Cai, L., Hyde, K. D., Bahkali, A. H., Liu, Z. Y. (2013). *Colletotrichum* species on grape in Guizhou and Yunnan provinces, China, *Mycoscience*. **54** (1): 29-41. Doi: 10.1016/j.myc.2012.07.006
- Peres, N., Timmer, L., Adaskaveg, J., Correl, J. (2005). Life-styles of *Colletotrichum acutatum*. *Plant Disease*. **89** (8): 784-796. Doi: 10.1094/PD-89-0784
- Phoulivong, S., Cai, L., Chen, H., McKenzie, E.H.C., Abdelsalam, K., Chukeatirote, E., Hyde, K. D. (2010). *Colletotrichum gloeosporioides* is not a common pathogen on tropical fruits. *Fungal Diversity*. **44** (1): 33-43. Doi: 10.1007/s13225-010-0046-0
- Prakash, O., Misra, A.K., Pandey, B.K. (1996). Anthracnose disease of tropical and subtropical fruits. *Disease Scenario in Crop Plants*. p. 1-27. En: Vol. 1. Fruits and Vegetables. V.P. Agnihotri, O. Prakash, R. Kishun and A.K. Misra. (Editores). International Books and Periodical Supplies Service. Pitampura, Delhi, India.
- Prihastuti, H., McKenzie, E.H.C., Hyde, K.D., Cai, L., Chen, H. (2009). Characterization of *Colletotrichum* species associated with coffee berries in northern Thailand. *Fungal Diversity*. **39**: 89-109.
- Riascos, R. (2011). Caracterización etiológica de la roña de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims.) en la región de Sumapaz, Cundinamarca. Tesis para optar el título de Magister en Ciencias Agrarias con énfasis en Fitopatología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia. p. 96.
- Reader, U., Broda, P. (1985). Rapid preparation of DNA from filamentous fungi. *Letters in Applied Microbiology*. **1**: 17-20.
- Rhaiem, A., Taylor, P. W. (2016). *Colletotrichum gloeosporioides* associated with anthracnose symptoms on citrus, a new report for Tunisia. *European Journal of Plant Pathology*. **146** (1): 219-224.
- Ruvishika, S. Jayawardena, Wei Zhang, Mei Liu, Sajeewa, S.N., Maharachchikumbura, Ying Zhou, JinBao Huang, Somrudee Nilthong, ZhongYue Wang, XingHong Li, JiYe Yan, Kevin D. Hyde. (2015). Identification and characterization of *Pestalotiopsis*-like fungi related to grapevine diseases in China. *Fungal Biology*. **119** (5): 348-361. Doi: 10.1016/j.funbio.2014.11.001
- Saitou, N., Nei, M. (1987). The neighbor-joining method: A new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*. **4** (4): 406-425.
- Saldarriaga, A. (2006). Caracterización del agente causante de la antracnosis en tomate de árbol, manzana y mora. Manizales. Tesis de Magister en Fitopatología. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Caldas. p. 191.
- Santos, R. F., Ciampi-Guillard, M., Amorim, L., Massola, N. S., Spósito, M. B. (2018). Aetiology of anthracnose on grapevine shoots in Brazil. *Plant Pathol.* **67**: 692-706. Doi: 10.1111/ppa.12756
- Sawant, I.S., Narkar, S.P., Shetty, D.S. Upadhyay, A., Sawant, S.D. (2012). Emergence of *Colletotrichum gloeosporioides* sensu lato as the dominant pathogen of anthracnose disease of grapes in India as evidenced by cultural, morphological and molecular data. *Australasian Plant Pathology*. **41** (5): 493-504. Doi: 10.1007/s13313-012-0143-5
- Shiraishi, M., Yamada, M., Mitani, N., Ueno, T., Nakaune, R., Nakano, M. (2006). Rapid screening assay for Ripe Rot resistance in grape cultivars. *Journal of Japanese Society for Horticultural Science*. **75** (3): 264-266. Doi: 10.2503/jjshs.75.264
- Shiraishi, M., Koide, M., Itamura, H., Yamada, M., Mitani, M., Ueno, T., Nakaune, R., Nakano, M. (2007). Screening for resistance to ripe rot caused by *Colletotrichum acutatum* in grape germ plasm. *Vitis*. **46** (4): 196-200.
- Sung, K.H., Wang, G.K., Hae, G.K., Kyung, J.C. (2008). Morphological variations, genetic diversity and pathogenicity of *Colletotrichum* species causing grape ripe rot in Korea. *The Plant Pathology Journal*. **24** (3): 269-278. Doi: 10.5423/PJ.2008.24.3.269
- Suzaki, K. (2011). Improved method to induce sporulation of *Colletotrichum gloeosporioides*, causal fungus of grape ripe rot. *General Plant Pathology*. **77** (2): 81-84. Doi: 10.1007/s10327-011-0296-z
- Tamura, K., Stecher, G., Peterson, D., Filipiński, A., Kumar, S. (2013). MEGA6: molecular evolutionary genetics analysis version 6.0. *Molecular Biology and Evolution*. **30** (12): 2725-2729.
- Weir, B.S., Johnston, P.R., Damm, U. (2012). The *Colletotrichum gloeosporioides* species complex. *Studies in Mycology*. **73** (1): 115-180. Doi: 10.3114/sim0011
- Weising, K., Beyermann, K., Ramser, J., Hahl, G. (1991). Plant DNA fingerprinting with radioactive and digoxigenated oligonucleotide probes complementary to simple repetitive DNA sequences. *Electrophoresis*. **12**: 159-169.
- White, T. J., Bruns, T., Lee, S. J. W. T., Taylor, J. W. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications*. **18** (1): 315-322.
- Whitelaw-Weckert, M. A., Curtin, S. J., Huang, R., Steel, C. C., Blanchard, C. L., Roffey, P. E. (2007). Phylogenetic relationships and pathogenicity of *Colletotrichum acutatum* isolates from grape in subtropical Australia. *Plant Pathology*. **56** (3): 448-463. Doi: 10.1111/j.1365-3059.2007.01569.x
- Yan, J.Y., Jayawardena, M.M.R.S., Goonasekara, I.D., Wang, Y. (2014). Diverse species of *Colletotrichum* associated with grapevine anthracnose in China. *Fungal Diversity*. **71** (1): 233-246. Doi: 10.1007/s13225-014-0310-9
- Zhang, P.F., Zhai, L.F., Zhang, X.K. Huang, X.Z., Hong, N., Xu, W.X., Wang, G.P. (2015). Characterization of *Colletotrichum fructicola*, a new causal agent of leaf black spot disease of sandy pear (*Pyrus pyrifolia*). *European Journal of Plant Pathology*. **143** (4): 651-662. Doi: 10.1007/s10658-015-0715-7

## Una nueva especie de *Miconia* (Melastomataceae) con anteras connadas de Colombia

✉ Humberto Mendoza-Cifuentes<sup>1</sup>, ✉ Mauricio Posada-H<sup>2</sup>, ✉ Heriberto David<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Alexander von Humboldt, Herbario FMB, Villa de Leiva, Boyacá, Colombia

<sup>2</sup> Herbario de la Universidad del Valle, CUVVC, Cali, Colombia

<sup>3</sup> Herbario de la Universidad de Antioquia, HUA, Medellín, Colombia

### Resumen

La tribu Miconieae comprende cerca de 1.900 especies neotropicales y en recientes trabajos se propone solo un género para la tribu, *Miconia*, que incluye la totalidad de los géneros considerados previamente, entre los que se incluye el *Tococa*. En el presente trabajo se describe e ilustra una nueva especie bajo el género *Miconia*, que presenta anteras lateralmente connadas, procedente del departamento del Chocó, Colombia, la cual se asocia con las especies de la tribu Miconieae con anteras coherentes tales como *Tococa symphyandra* y *Miconia croatii*. Este nuevo taxón se identifica por el indumento de las ramas de tricomas elongados y alveolados, haz foliar bullada, el cáliz cerrado en botones y con grandes dientes dorsales, los pétalos y el estilo más grandes que las anteriores especies, y el ápice del ovario truncado. Crece en áreas muy húmedas de bosque subandino en la región central de la cordillera Occidental y hasta ahora solo se conoce de la localidad tipo. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Bosque subandino; Chocó; Norte de los Andes; Taxonomía; *Tococa*.

### A new species of *Miconia* (Melastomataceae) with connate anthers from Colombia

### Abstract

The Miconieae tribe comprises about 1,900 Neotropical species and recent studies propose only one genus for the tribe, *Miconia*, which includes all of the genera previously considered including *Tococa*. Here we describe and illustrate a new species of the genus *Miconia* with lateral connate anthers from the department of Chocó, Colombia. This new taxon is associated with the species of the Miconieae tribe with laterally coherent anthers in a ring stamens such as *Tococa symphyandra* and *Miconia croatii*. This new taxon is characterized by the indument on branches with elongate and alveolate trichomes, bullate leaves, closed calyx in buds and with large dorsal teeth, bigger petals and style, and a truncated ovary apex. This new species grows in very humid areas of the sub-Andean forest in the central region of the Western Cordillera and at present, it is known only from the type locality. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Chocó; north of the Andes; Sub-Andean forest; Taxonomy; *Tococa*.

### Introducción

*Miconia* Ruiz & Pav. (1794:60), con cerca de 1.900 especies, es el género de plantas leñosas de las angiospermas más diverso con distribución restringida al Neotrópico (Goldenberg, *et al.*, 2008, 2013; Michelangeli, *et al.*, 2016, 2018). Colombia es el país con el mayor número de especies del género, ya que alberga el 36 % de sus taxones, con alrededor de 380 especies (Almeda, *et al.*, 2016).

En su definición tradicional, *Miconia* se circunscribe como el grupo de especies de la tribu Miconieae que desarrollan inflorescencias terminales y flores con pétalos apicalmente redondeados (Goldenberg, *et al.*, 2013). Este conjunto de caracteres también se presenta en el género *Tococa* Aublet, que se diferencia de *Miconia* principalmente por la presencia de mirmecodomacios en ambas hojas y los

pétalos emarginados apicalmente (Michelangeli, 2005). Sin embargo, y con base en filogenias moleculares, se reconoce que *Miconia* es un grupo parafilético, al igual que la mayoría de los géneros más diversos de la tribu (Michelangeli, *et al.*, 2004, 2008; Goldenberg, *et al.*, 2008), razón por la cual se ha propuesto incluir a *Tococa*, así como a la mayoría de los géneros de Miconiaeeae, dentro de *Miconia* (ver Michelangeli y Meier, 2013; Gamba y Almeda, 2014; Michelangeli, *et al.*, 2016, 2018).

#### \*Correspondencia:

Humberto Mendoza Cifuentes; [hmendoza@humboldt.org.co](mailto:hmendoza@humboldt.org.co)

Recibido: 4 de marzo de 2019

Aceptado: 7 de junio de 2019

Editor: Elizabeth Castañeda

La presente novedad taxonómica se asocia con dos especies del género *Tococa*, *T. symphyandra* (Triana) Cogn. y *T. croatii* Almeda, esta última recientemente transferida a *Miconia croatii* (Almeda) Michelang. & Almeda (Michelangeli, *et al.*, 2018), ya que comparten el carácter de anteras connadas. Dentro de la tribu Miconieae, las anteras connadas que forman un anillo solo se conocen para estos tres taxones (Almeda, 1989; Michelangeli, 2005). En consecuencia, esta nueva especie se describe bajo el género *Miconia*, pero relacionándola con una especie ya transferida a este género y con una del género *Tococa* que aún no ha sido restituida oficialmente al género *Miconia*.

### Materiales y métodos

Se recolectaron en campo individuos de la familia Melastomataceae en zonas inexploradas del departamento de Chocó, ubicadas en el centro de la cordillera Occidental de Colombia, en busca de novedades taxonómicas. Se revisó la literatura pertinente a los géneros *Miconia* y *Tococa*, la base de datos del herbario COL (<http://www.biovirtual.unal.edu.co/es/colecciones/search/plants/>), el catálogo de Melastomataceae de Colombia (Almeda, *et al.*, 2016) y la flora mesoamericana (Almeda, 2009). Una vez identificada la novedad taxonómica, se procedió a confrontar directamente las colecciones del presente hallazgo con colecciones de los herbarios Nacional Colombiano (COL), de la Universidad de Antioquia (HUA), la Universidad del Valle (CUVC) y el Federico Meden Bogotá (FMB). Además, se consultaron las imágenes tipo de la totalidad de las especies de *Miconia* y *Tococa* de Colombia en la base de datos de Global Plants JSTOR (<http://plants.jstor.org/search?plant>).

Una vez definido este taxón como una nueva especie, se la describió e ilustró y se establecieron sus límites morfológicos con respecto a las especies más afines dentro de los géneros *Miconia* y *Tococa*. Para la descripción se midieron las partes vegetativas y de la inflorescencia en material seco de herbario utilizando un calibrador digital de 0,01 mm de precisión (Mitutoyo Serie 500). Las medidas de las partes florales se basaron en flores frescas preservadas en etanol al 70 % y se establecieron utilizando un microscopio Leica S8AP0. Los tricomas se fotografiaron con una cámara MC190 HD a partir de material seco para las estructuras vegetativas y de material fresco conservado en etanol para las partes florales; posteriormente, se clasificaron con base en el atlas de tricomas de Melastomataceae de Wurdack (1986).

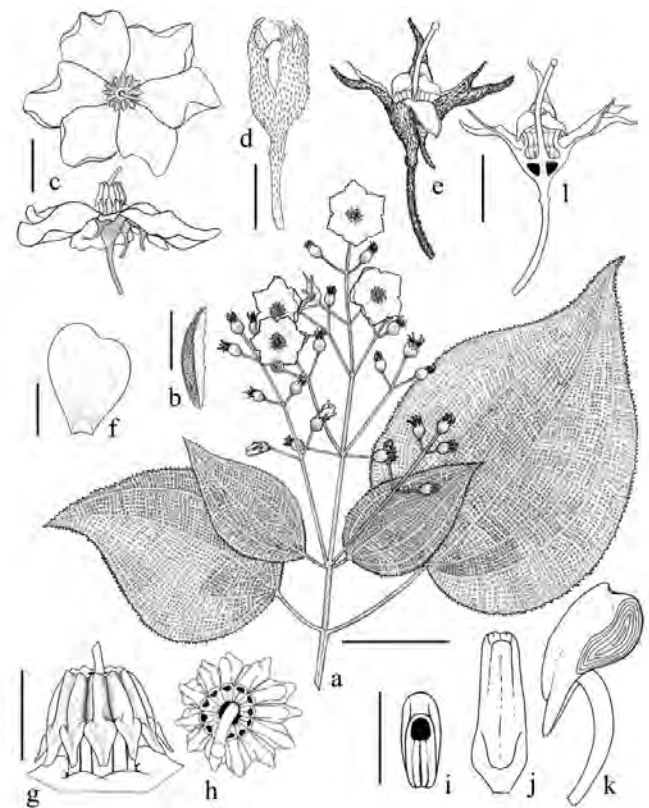
### Resultados

*Miconia cornifera* Humberto Mend., Posada-Herrera & Heriberto David, sp. nov. (Figuras 1, 2).

**TIPO:** COLOMBIA. **Chocó:** San José del Palmar, escuela antigua de Galápagos, trocha que conduce de la escuela a las cascadas, 1.300-1.600 m, 4°50'1"N, 76°11'33"O, 26-31 may 2008 (fl), *H. Mendoza 17327* (Holotipo: FMB; Isótipos: COL, FMB, HUA, CUVC).

**Diagnosis.** The new species resembles *Tococa symphyandra* and *Miconia croatii* but differ from them by the indumentum on branchlets and petioles densely lanose with brownish elongated alveolate trichomes, upper leaf blade bullate-setulose, closed calyx in buds with long dorsal teeth, petals 15.9-18.8 mm long, style 13.4-14.3 mm long, and truncate ovary apex.

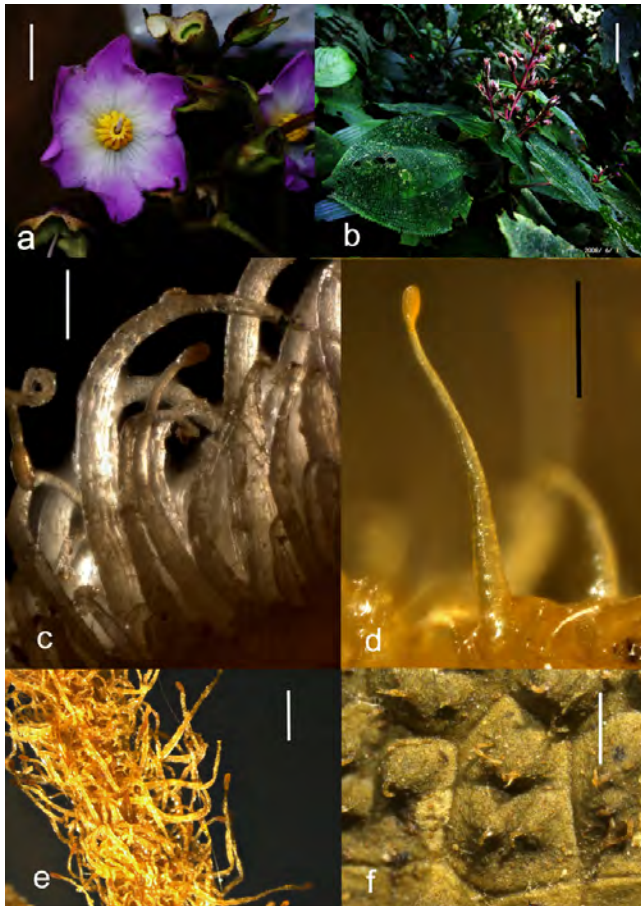
**Arbusto** de 1,5 a 2,0 m de altura. **Ramas distales** subcuadrangulares, entrenudos de 2 a 3 cm de largo. **Indumento** sobre ramas y peciolo densamente lanoso compuesto de tricomas elongado-alveolados curvos o retorcidos en muestras secas (tipo 12 de Wurdack, 1986) de color marrón y de 0,5 a 1 mm de largo; ejes de la inflorescencia con indumento denso de tricomas elongado-alveolados (tipo 12) y, además, tricomas glandulares estipitados (tipo 1) de 0,7 a 1,3 mm de largo; hipanto-cáliz con indumento denso de tricomas glandulares estipitados (tipo 1) y tricomas elongado-alveolados curvos (tipo 12) de 0,8 a 1,2 mm de largo. **Hojas** de un mismo nudo de tamaño similar o levemente desiguales, sin mirmecodomacios. **Peciolo**s de 2,5 a 10,0



**Figura 1.** *Miconia cornifera*. **a.** Rama florífera. **b.** Bráctea. **c.** Flor en vista superior y lateral. **d.** Botón floral. **e.** Hipanto-cáliz en vista lateral. **f.** Pétalo. **g.** Estambres connados en vista superior. **h.** Estambres connados en vista lateral. **i.** Ápice de la antera. **j.** Antera en vista dorsal. **k.** Estambre individual extraído y en vista lateral. **l.** Corte longitudinal del hipanto-ovario y del estilo. Escalas: 5 cm en **a**; 5 mm en **b**, **g**, **h**; 10 mm en **c**, **d**, **e**, **f**; 2 mm en **i**, **j**, **k**. Ilustración: Angélica Ramírez Mendoza



cm de largo, teretes hacia la base y ligeramente canaliculados hacia el ápice. **Lámina foliar** de 11,5 a 21,0 × 9,0–15,5 cm, anchamente ovada, delgada y membranácea; margen dentada; base cordada; ápice acuminado; haz densamente bullado-setulosa, tricomas (tipo 15) de 0,4 a 0,6 mm de largo; envés con indumento lanoso denso a laxo sobre los nervios, tricomas elongado-alveolados (tipo 12) de 0,4 a 0,6 mm de largo. **Nervadura** con 3 a 4 pares de venas secundarias basales acompañando la vena media. **Inflorescencia** terminal, paniculada, de 20 a 24 cm de largo, sésil o con un pedúnculo de 2,5 a 4,5 cm de largo, con 25 a 40 flores pediceladas; eje central cuadrangular, con 5 a 6 nudos de ramificación; paraclados basales de 10 a 12 cm de largo con un nivel de ramificación; ápices de las ramas trifloros; brácteas semejantes a hojas pequeñas en los nudos basales, ovadas, de 6,7 a 10,0 × 3,9 a 4,5 cm, con un pequeño pecíolo de 0,4 a 2,0 cm de largo; bracteolas elípticas a estrechamente elípticas, de 5,8 a 9,9 × 2,0 a 2,2 mm, tempranamente



**Figura 2.** Imágenes de campo y tricomas de *Miconia cornifera*. **a.** Vista de flores. **b.** Rama florífera. **c.** Tricomas del eje de la inflorescencia (a partir de muestras frescas almacenadas en etanol). **d.** Tricoma glandular del eje de la inflorescencia (a partir de muestras frescas almacenadas en etanol). **e.** Tricomas del eje de la inflorescencia (a partir de material seco). **f.** Tricomas del haz foliar. Escalas: 10 mm en **a**; 5 cm en **b**; 0,2 mm en **c**; 0,5 mm en **d**, **e**, **f**.

caducas, abaxialmente glabras, adaxialmente con indumento denso de tricomas similares a los de las ramas. **Flores** de 5 a 6 meras, diplostemonas; pedicelos de 6,5 a 25,2 mm de largo, con indumento denso similar al de la inflorescencia. **Hipanto** en la antesis en forma de copa, de 3,9 a 6,3 × 6,9 a 7,4 mm; parte libre del ovario de 1,0 a 1,7 mm de largo; internamente glabro. **Cáliz** cerrado en botones y coronado por un apículo de 3,5 a 4,0 mm de largo, que se abre irregularmente en 2 a 5 lóbulos triangulares de 5,5 a 7,5 mm de largo, estos lóbulos son caducos en frutos inmaduros; dientes dorsales subulados de 4,0 a 7,2 mm de largo, apicalmente curvos, excediendo la longitud de los lóbulos. **Corolas** patentes; pétalos de 15,9 a 18,8 × 12,8 a 15,3 mm, anchamente obovados, apicalmente sigmoideo-emarginados, glabros, color violeta claro y blancuzcos hacia la base en la superficie abaxial, con la margen entera. **Estambres** isomorfos, con las anteras lateralmente connadas que forman un anillo radialmente simétrico alrededor del estilo de color amarillo; filamentos glabros, aplanados, de 3 a 4 × 0,8 a 0,9 mm; anteras oblongas, lateralmente aplanadas, de 2,2 a 3,2 × 1,8 a 2,2 mm y 1,0 a 1,9 mm de grosor, ápice truncado-emarginado, con un poro apical de 0,4 a 0,5 × 0,3 a 0,4 mm; conectivo engrosado dorsalmente, prolongado en la base dorsal en una estructura triangular o romboide de 1,3 a 2,8 × 1,4 a 1,9 mm. **Ovario** ínfero, 5-locular, de 2,8 a 3,7 mm de largo; ápice truncado, con algunos tricomas glandular-estipitados rodeando la base del estilo de 0,8 mm de largo; placentas ca. de 1,5 × 0,8 mm, oblongas, con rudimentos seminales en todas las superficies. **Estilo** recto o levemente curvo, de 13,4 a 14,3 × 0,6 a 0,9 mm, diminutamente papilado en su mitad superior, que sobresale conspicuamente del anillo de estambres; **estigma** levemente expandido, de 0,8 a 1,3 mm de diámetro. **Frutos** maduros y **semillas** no vistos.

**Etimología.** El epíteto específico significa “*Miconia* con cuernos” y alude a los grandes dientes dorsales del cáliz.

**Distribución y hábitat.** Conocida solo de la localidad tipo en la vertiente occidental que drena hacia la planicie del Pacífico de la cordillera Occidental. Crece en bosque subandino bajo condiciones de sombra y al lado de caídas de cascadas. La vegetación en el sitio de recolección corresponde a bosques entresacados donde se ha extraído la mayoría de los árboles maderables. El clima de la localidad tipo en el cerro Galápagos se clasifica como frío y muy húmedo, con temperatura promedio de 14° C, una precipitación anual de más de 4.000 mm y una humedad relativa que oscila entre 60 y 70 % (Urrutia, 2017).

**Fenología.** La especie fue recolectada con flores en mayo.

## Discusión

Esta especie se reconoce por el indumento denso en ramas con tricomas elongados y alveolados, haz foliar bullado-setulosa, el cáliz cerrado en botones con grandes dientes dorsales, los pétalos de 15,9 a 18,8 mm de largo, estambres connados por las anteras formando un anillo, el estilo de 13,4 a 14,3 mm de largo, y el ápice del ovario truncado.

**Tabla 1.** Comparación de caracteres de *Miconia cornifera*, *M. croatii* y *Tococa symphyandra*. Los tipos de tricomas se basan en **Wurdack** (1986).

Carácter	Especie		
	<i>Miconia cornifera</i>	<i>Miconia croatii</i>	<i>Tococa symphyandra</i>
Indumento y tricomas de las ramas	Denso, tricomas curvos o retorcidos de tipo 12 de 0,5-1,0 mm de largo	Laxo a semidenso, tricomas erectos de tipo 11 de 1,0-2,0 mm de largo	Laxo, tricomas erectos de tipos 1 y 11 de 5,0-15,0 mm de largo
Indumento y tricomas del haz foliar	Denso, tricomas de tipo 15 de 0,4-0,6 mm de largo	Laxo, tricomas tipo 11 de 0,5-2,0 mm de largo	Laxo, tricomas de tipo 11 de 0,5-2,0 mm de largo
Indumento y tricomas del hipanto	Denso, tricomas curvos de tipo 1 y 12 de 0,8-1,2 mm de largo	Denso, tricomas erectos tipo 1 ca. 0,5 mm de largo y tricomas tipo 4 (sésiles)	Glabro o pubérulo, tricomas erectos de tipo 1 ca. 1,5 mm de largo
Longitud del hipanto (mm)	3,9-6,2	2,0-2,5	2,5-3,5
Tipo de cáliz	Cerrado en botones	Cerrado en botones 6,0-9,0	Lobulado
Longitud dientes dorsales del cáliz (mm)	4,7-7,2	0,25-0,50	0,25-0,50
Longitud de los pétalos (mm)	15,9-18,8	5,0-6,0	6,0-9,0
Longitud del filamento (mm)	3,0-4,0	2,5-3,5	3,5
Longitud de las tecas (mm)	2,2-3,2	1,5-2,1	2,0-2,5
Longitud del apéndice conectival basal-dorsal (mm)	1,3-2,8	1,0-1,5	1,0-1,5
Ápice del ovario	Truncado	Redondeado	Redondeado
Longitud del estilo (mm)	13,4-14,3	5,0-8,5	6,0-9,5

Las especies más cercanas, *Tococa symphyandra* y *Miconia croatii*, tienen ramas con indumentos laxos de tricomas erectos, las hojas no son ampollado-bulladas por el haz, las flores son mucho más pequeñas, al igual que los dientes dorsales de cáliz (ver comparación y medidas en la Tabla 1). Además, se diferencia de *T. symphyandra* por la ausencia de mirmecodomacios.

*Miconia cornifera* conforma un grupo con las dos anteriores especies, único por sus anteras unidas formando un anillo, carácter no presente en otras especies de la tribu Miconieae. La disección de las anteras en *M. cornifera* indica que hay tejidos que las conectan lateralmente, es decir son soldadas, por lo que el término más apropiado para esta condición es connado. *T. symphyandra* y *M. croatii* tienen la misma condición de las anteras de *M. cornifera*.

Vegetativamente, estos tres taxones se parecen a especies con hábito herbáceo y hojas membranáceas tales como *Miconia cordifolia* Wurdack, *M. acalephoides* Naudin y *M. subalpina* Gleason, no obstante, estas últimas especies no presentan anteras connadas.

La reciente propuesta de **Michelangeli, et al.** (2018) en la cual transfieren la mayoría de las especies dentro de la tribu Miconieae al género *Miconia*, incluidas las especies de *Tococa*, ha generado controversia debido al gran número de cambios de nomenclatura propuestos, pero, especialmente, por las evidencias en las que se sustentan los autores

de la propuesta. Actualmente no existe un estudio integral morfológico y molecular de toda la tribu y las hipótesis filogenéticas publicadas se basan en pocos marcadores moleculares y no consideran la totalidad de las especies tipos de los géneros involucrados, incluido el de *Miconia*. Es posible que aparezcan nuevas hipótesis basadas en muestras más grandes y mayor número de marcadores moleculares que seguramente variarán notoriamente de las ya publicadas y establecerán nuevas configuraciones internas en la tribu, permitiendo otras posibilidades para establecer grupos naturales.

El grupo que involucra a *M. cornifera* se asocia más a la circunscripción clásica de *Miconia* que a la de *Tococa*, aspecto que fue documentado por **Michelangeli** (2005) al establecer que *T. croatii* y *T. symphyandra* no conforman el grupo de *Tococa* sensu stricto. Por esta razón, este grupo de tres especies queda mejor ubicado dentro de *Miconia*, aunque debe subrayarse que los autores no se adhieren completamente a las nuevas propuestas de nomenclatura en la tribu Miconieae.

### Agradecimientos

Expresamos nuestros sinceros agradecimientos al Instituto Alexander von Humboldt por el apoyo en el uso de equipos y laboratorios en la sede de Villa de Leyva, a la administración de los herbarios COL, HUA y FMB y a los revisores anónimos por sus aportes al texto.

## Contribución de los autores

Humberto Mendoza-Cifuentes: autor principal y receptor de correspondencia, compilación de la información, recolecciones, y escritura general del artículo; Mauricio Posada: escritura general del artículo; Heriberto David: escritura general del artículo, revisión de colecciones

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

## Referencias

- Almeda, F.** (1989). Five new berry-fruited species of tropical American Melastomataceae. *Proc. Calif. Acad. Sci.* **46** (5): 137-150.
- Almeda, F.** (2009). Melastomataceae. En G. Davidse, M. Sousa-Sánchez, S. Knapp, F. Chiang (Editores), Cucurbitaceae a Polemoniaceae. *Fl. Mesoamer.* **4** (1): 164-338.
- Almeda, F., Alvear, M., Mendoza-C., H., Penneys, D.S., Michelangeli, F.** (2016). Melastomataceae. En R. Bernal, S.R. Gradstein, M. Celis (Editores), Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. p. 1585-1664. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia. <http://catalogoplantadescolombia.unal.edu.co/es/resultados/familia/Melastomataceae/>
- Gamba, D., Almeda, F.** (2014). Systematics of the Octopleura Clade of *Miconia* (Melastomataceae: Miconieae) in Tropical America. *Phytotaxa.* **179** (1): 1-174. Doi: 10.11646/phytotaxa.179.1.1
- Goldenberg, R., Penneys, D.S., Almeda, F., Judd, W.S., Michelangeli, F.A.** (2008). Phylogeny of *Miconia* (Melastomataceae): Patterns of stamen diversification in a megadiverse Neotropical genus. *Int. J. Plant Sci.* **169** (7): 963-979. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/589697>
- Goldenberg, R., Almeda, F., Caddah, M.K., Martins, A.B., Meirelles, J., Michelangeli, F.A., Weiss, M.** (2013). Nomenclator botanicus for the neotropical genus *Miconia* (Melastomataceae: Miconieae). *Phytotaxa.* **106**: 1-171. Doi: 10.11646/phytotaxa.106.1.1
- Michelangeli, F.A.** (2005). *Tococa* (Melastomataceae). *Flora Neotrop.* **98**: 1-114.
- Michelangeli, F.A. & Meier, W.** (2013). A new anisophyllous species of *Miconia* (Melastomataceae: Miconieae) from the Coastal Cordillera in northern Venezuela. *Phytotaxa.* **79** (1): 37-44. Doi: 10.11646/phytotaxa.163.3.3
- Michelangeli, F.A., Penneys, D.S., Giza, J., Soltis, D., Hils, M.H., Skean, J.D.** (2004). A preliminary phylogeny of the tribe Miconieae (Melastomataceae) based on nrITS sequence data and its implications on inflorescence position. *Taxon.* **53**: 279-290. Doi: 10.2307/4135608
- Michelangeli, F.A., Judd, W.S., Penneys, D.S., Skean, J.D., Bécquer-Granados, E.R., Goldenberg, R., Martin, C.V.** (2008). Multiple events of dispersal and radiation of the tribe Miconieae (Melastomataceae) in the Caribbean. *Botanical Review.* **74**: 53-77. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12229-008-9004-x>
- Michelangeli, F.A., Almeda, F., Alvear, M., Bécquer, E.R., Burke, J., Caddah, M.K., Goldenberg, R., Ionta, G.M., Judd, W.S., Majure, L.C., Meirelles, J., Nicolas, A.N., Ocampo, G., Penneys, D.S., Dan Skean Jr., J., Ulloa-Ulloa, C.** (2016). (2462) Proposal to conserve *Miconia*, nom. cons. against the additional names *Maieta* and *Tococa* (Melastomataceae: Miconieae). *Taxon.* **65** (4): 892-893.
- Michelangeli, F.A., Goldenberg, R., Almeda, F., Judd, W.S., Bécquer, E.R., Ocampo, G., Ionta, G.M., Dan Skean Jr., J., Majure, L.C., Penneys, D.S.** (2018). Nomenclatural novelties in *Miconia* (Melastomataceae: Miconieae). *Brittonia.* First online: 1-40. Doi: 10.1007/s12228-018-9546-0
- Urrutia, N.S.** (2017). Herpetofauna del Alto Galápagos, San José del Palmar, Chocó. Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico John Von Neumann (IIAP). Dataset. Fecha de consulta: 9 de diciembre, 2017. Disponible en: <http://doi.org/10.15472/ijpswu>
- Wurdack, J.J.** (1986). Atlas of hairs for Neotropical Melastomataceae. *Smithson. Contrib. Bot.* **63**: 1-80.

# Un manuscrito de finales del siglo XVII: primera manifestación de un estudio astronómico y cronológico autóctono en territorio neogranadino

J. Gregorio Portilla<sup>1</sup> & Freddy Moreno<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias, Sede Bogotá, Universidad Nacional de Colombia

<sup>2</sup> Centro de Estudios Astrofísicos, colegio Gimnasio Campestre

## Resumen

La existencia de un manuscrito que versa sobre astronomía y cronología redactado a finales del siglo XVII por Antonio Sánchez de Cozar, un humilde sacerdote de ascendencia indígena, ha pasado desapercibida para los historiadores de la ciencia en el país, aun cuando ya a mediados del siglo XIX había sido dado a conocer como pieza literaria. En este trabajo se presenta una síntesis del contenido de ese manuscrito, así como un análisis de algunos aspectos relevantes que muestran un pensamiento original e independiente del autor, tales como su propuesta dinámica del movimiento de los cielos, la introducción de un cielo entre Mercurio y la Luna y la propuesta de reforma al calendario gregoriano. El manuscrito también contiene las primeras efemérides astronómicas realizadas en territorio neogranadino, consistentes en fases lunares y eclipses cuyos tiempos de ocurrencia están referidos a la hora local de una población del Nuevo Mundo: el municipio de Vélez. ©2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** modelo geocéntrico; calendario; cronología; efemérides; eclipses.

**A manuscript of the late seventeenth century: first manifestation of an astronomical and chronological autochthonous study in the Nueva Granada**

## Abstract

The existence of a manuscript that deals with astronomy and chronology written in the late seventeenth century by Antonio Sánchez de Cozar, a humble priest of indigenous descent, has gone unnoticed by historians of science in the country even though in the mid-nineteenth century it had been given to know as a literary work. In this paper a synthesis of the content of this manuscript is presented, as well as an analysis of some relevant aspects that show an original and independent thought of the author, such as his cinematic proposal of the movement of the heavens, the introduction of a sky between Mercury and the Moon and the proposed reform of the Gregorian calendar. The manuscript also contains the first astronomical ephemerides made in Neo-Granadian territory consisting of lunar phases and eclipses whose times of occurrence are referred to the local time of a town of the New World: the municipality of Vélez. ©2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Geocentric model; calendar; chronology; ephemerides; eclipses.

## Introducción

Es poco lo que se conoce sobre la realización de estudios astronómicos en el periodo colonial español en lo que es ahora territorio colombiano. Sin embargo, varios trabajos relativamente recientes han permitido mostrar que en Santafé de Bogotá, específicamente en el Colegio San Bartolomé, se impartieron lecciones en las que se llegaron a exponer temas de naturaleza astronómica. Es así como, a finales del siglo XVII, se redactó un documento titulado “Breve tratado del cielo y de los astros”, el cual es un complemento a un manuscrito de nombre “Tratado de Física” cuyo autor es el

sacerdote jesuita Mateo Mimbela (1663-1736) (Del Rey & Marquínez, 2004). Así mismo, medio siglo después, en 1755, otro sacerdote jesuita, Francisco Javier Trías (1721-¿?), redactó un documento que lleva por título “Física especial y curiosa” (Marquínez & Del Rey, 2005).

### Correspondencia:

J. Gregorio Portilla, [jgportillab@unal.edu.co](mailto:jgportillab@unal.edu.co)

**Recibido:** 1 de mayo de 2019

**Aceptado:** 8 de junio de 2019

**Editora:** Elizabeth Castañeda

Los dos documentos tienen varios aspectos en común: fueron redactados en latín, sus autores son sacerdotes nacidos en España y no pasan de ser apuntes de clase destinados a una de las cátedras que se impartieron en el colegio San Bartolomé. El objeto de estos manuscritos es simplemente la transmisión de conocimiento y no se advierte en ellos ni originalidad ni algún fruto proveniente de un proceso investigativo. El primer documento desglosa la teoría geocéntrica del universo dentro de un contexto claramente escolástico; se cita a Copérnico, Brahe y Galilei, aunque sea para oponerse al modelo heliocéntrico, y se evidencia que su autor está al tanto de los primeros descubrimientos obtenidos a través del telescopio. El segundo documento, evidentemente más moderno, expone los tres sistemas del mundo (el de Ptolomeo, el de Copérnico y de Brahe) y se muestra contrario al sistema geocéntrico. Esto último indica que ya se había ofrecido al menos una cátedra en el virreinato de la Nueva Granada en la que se dio a conocer el heliocentrismo antes de las célebres conferencias ofrecidas por José Celestino Mutis en el Colegio del Rosario, es decir, antes de 1762.

No obstante, existe otro documento que hasta ahora ha pasado desapercibido para los historiadores de la ciencia y, en particular, de la astronomía en nuestro país lo que implica que al menos existió un criollo estudioso de temas astronómicos que no temió realizar modificaciones al modelo del universo imperante, construir las primeras efemérides astronómicas (fases lunares y eclipses) con tiempos referidos a una ciudad neogranadina y proponer una rectificación al calendario. El propósito de esta comunicación es exponer, con la debida perspectiva y análisis, el contenido de ese manuscrito.

Una aclaración con relación a la numeración para facilitar la localización de la información al interior del manuscrito. Este en la actualidad posee dos numeraciones en la parte superior derecha de cada folio que no son coincidentes: la de más arriba está escrita en tinta y es evidente que fue la que le dio el mismo autor; sin embargo, cada uno de los números está ligeramente tachado con lápiz, suponemos que por el mismo responsable de la segunda numeración, realizada en un tiempo posterior algo difícil de fijar pero, a juzgar por el folio que marcó con el número 1, con propósitos de catalogación; esta segunda numeración, realizada con lápiz, está ubicada inmediatamente abajo de la anterior (salvo en los últimos folios del manuscrito). El autor comenzó a enumerar los folios desde el inicio del tratado primero, por lo que los prólogos no están enumerados, a diferencia de la numeración a lápiz que sí los incluye y de ahí la diferencia. Aquí adoptaremos la numeración hecha en lápiz, pues permite hacer alusión a los prólogos; además, puesto que la numeración se realizó sobre la cara frontal de cada folio, esto es, del recto, y dado que el autor escribió en ambas caras del folio, para referirnos a la parte trasera correspondiente del folio (verso), marcaremos simplemente el número del folio seguido con la letra v.

También aclaramos que las frases textuales del

manuscrito se escribirán con la ortografía moderna para facilidad en la lectura.

## El manuscrito

En la actualidad el documento reposa en la Biblioteca Nacional de Colombia; una versión digital completa de él puede conseguirse en la página web de la misma (<http://catalogoenlinea.bibliotecanacional.gov.co/client/es-ES/search/asset/107409/0>, consultado el 9 de abril de 2019). Está redactado en castellano y aunque algunos folios evidencian el paso del tiempo, en su mayoría están en buen estado de conservación. Tiene unas dimensiones de 20.5 × 13.5 cm y en su estado actual está constituido por 122 folios. Infortunadamente, a lo largo de los años fue perdiendo parte de su contenido. Eso se puede evidenciar por la ausencia de varios folios tanto al interior como al final del mismo.



**Figura 1:** Una parte del inicio de manuscrito, el cual corresponde al prólogo dirigido al Rey

Podemos segmentar el contenido del manuscrito en las siguientes cinco partes.

1. Inicio dirigido al Rey y que lleva por título “CYRM [Católica y Real Majestad] *Aumentador, conservador y defensor de NSFC* [Nuestra Santa Fe Católica]”, (pág. 2 a 6v), (fig. 1).

2. “*Carta y prólogo al sensor*”, (pág. 7 a 9v).

3. “*Prólogo al lector*”, (pág. 10 a 12v).

4. “*Tratado primero de astronomía y de la reformación del tiempo. Primera parte*”. Está conformado por trece capítulos; (pág. 13 a 44v). Están ausentes tres folios, por lo que el segundo y el cuarto capítulos están incompletos y el tercero está ausente en su totalidad.

5. “*Tratado segundo de astronomía y de la reformación del tiempo. Segunda parte*”. Está conformado por diecisiete capítulos; (pág. 45 a 77v).

6. “*Tratado tercero de astronomía y de la reformación del tiempo. Tercera parte*”. Está conformado por ocho

capítulos; (pág. 78 a 123v). El octavo capítulo está incompleto.

Sabemos que en el tratado tercero había al menos un capítulo adicional (un noveno, ver pág. 15 y 57), hoy en día perdido, por lo que no se descarta que en su redacción original existieran otros capítulos adicionales e incluso al menos una cuarta parte. Sin embargo, esto último es poco probable, pues en las tres partes se cubrió la totalidad de los temas mencionados en los prólogos.

Por un comentario existente en la pág. 7 y otro más en la pág. 66 se puede colegir que el manuscrito se constituye en una quinta versión extendida de cuatro anteriores que previamente había remitido “por diversas manos” al rey español. Se ignora el paradero de esas versiones y si llegaron en algún punto a alcanzar las manos de su destinatario; una indagación elevada al Archivo General de Indias de Sevilla permitió verificar la ausencia de documentación al respecto.

El manuscrito es de difícil y ardua lectura. La obvia existencia de arcaísmos, un manejo algo arbitrario de los signos de puntuación y la letra del autor obstaculizan para el lector moderno una lectura ágil del escrito que permita de forma eficiente asimilar su contenido. Aunado a lo anterior está el hecho de que el autor carecía del don de la claridad y de la estructuración, de modo que el lector se expone, a lo largo del contenido, a no pocas repeticiones, ideas fuera de contexto y descripciones difíciles de digerir o de entender.

No es claro cómo llegó a sobrevivir el documento en los primeros 150 años después de su redacción. En la última línea de la página 33v se encuentran las palabras “Libro De Leonidas Cardenas” (sic) en una caligrafía distinta a la del autor, por lo que es de suponer que esta persona fue su dueño en algún momento del siglo XVIII o XIX. Posteriormente, a mediados del siglo XIX, y a través de un regalo del Señor Elías Prieto, quien vivía en la población de Soatá (Boyacá), llegó a las manos del literato José María Vergara y Vergara quien no dudó en incluirlo en su libro dedicado a la historia de la literatura en Nueva Granada (**Vergara & Vergara**, 1867). Vergara & Vergara enfatizó la “erudición del autor en conocimientos astronómicos” y la intención de este en corregir el cómputo cronológico y ofrecer una nueva fecha de la edad del mundo. Agregó que el libro “tiene tesis muy altas hasta cuestiones muy ridículas” pero reconoció que expuso “verdades revolucionarias en aquel tiempo”. También mencionó que el manuscrito contiene tablas de eclipses, fases lunares y cómputos eclesiásticos y una tabla de la situación de algunas poblaciones del Nuevo Reino, aunque erróneamente señaló que estas estaban referidas a Madrid. También incluyó un pequeño extracto —con una extensión de unas treinta líneas— del prólogo dirigido al Rey.

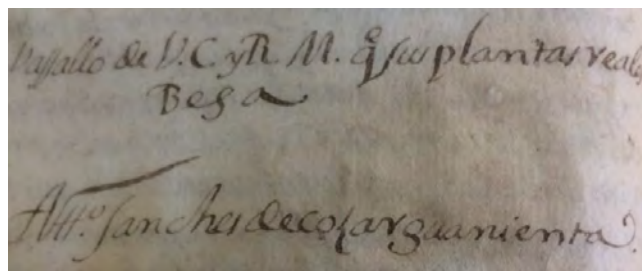
Pocas décadas después, en su cuaderno de apuntes No. 13, el cubano José Martí hizo una alusión al libro de Sánchez de Cozar, ignoramos si con base en la información que halló en la obra de Vergara & Vergara o de otra fuente. Martí, después de resumir escuetamente las aportaciones del libro,

anotó: “Su estilo no es en ninguna manera literario; —sino revuelto, y cargado de indisculpables repeticiones, y muy pobre” (**Martí**, 1991).

**Pinzón** (1993) reprodujo las tres primeras partes en que hemos dividido el manuscrito (*i. e.*, los prólogos). Agregó que estaba en curso un proyecto para publicar el resto del documento una vez terminado su estudio pero, al parecer, y si es que tal tarea fue llevada a cabo, esta nunca salió a la luz. Un análisis general y preliminar del manuscrito fue publicado recientemente (**Moreno, Portilla, Zitzmann**, 2018) en el que se dieron a conocer varios aspectos de su contenido.

## El autor

El autor del manuscrito fue un sacerdote de nombre Antonio Sánchez de Cozar Gómez, aunque, en el prólogo al sensor, en la parte final, colocó en lugar de Gómez el apellido Guanienta con el propósito de mostrarse como descendiente directo del cacique indígena de ese nombre (Figura 2). Lo muy poco que sabemos sobre su vida quedó consignado por él mismo en lo que redactó al inicio del manuscrito. Dice haber nacido en el sitio de Mochuelo “en que se ha fundado por los míos y otros la nueva Villa de Santa Cruz de San Gil” (pág. 4), hoy San Gil (Santander); sin embargo, su sitio de residencia, al momento de redactar el manuscrito, era la población de Vélez. También afirmó poseer el cargo de “comisario particular subdelegado de la santa cruzada” (pág. 6), título que ostentaban numerosos curas y vicarios de poblaciones bajo el dominio español. Su padre fue Martín Sánchez de Cozar, nacido en la población española de Villa Nueva de los Infantes; su madre, de nombre Isabel Gómez Pabón, era descendiente directa del poderoso cacique Guanienta y aun vivía al momento de la redacción final del manuscrito; menciona que tenía hermanos, uno de los cuales se llamaba Martín (pág. 5v).



**Figura 2:** Parte final del prólogo dirigido al Rey en el que se consigna el nombre de su autor

Aparte de la anterior información, desconocemos prácticamente todo sobre su vida, incluidos el intervalo de tiempo en el que vivió, la orden a la que pertenecía y la formación académica que recibió, si es que la tuvo. Muy posiblemente dominaba a cabalidad el latín si hemos de basarnos en varias frases que redactó en ese idioma —y que

las diferenció subrayándolas— a lo largo del manuscrito. Dejando a un lado sus conocimientos básicos astronómicos y de cronología, los que ciertamente no eran desdeñables, es claro también que dominaba la aritmética con cierta fluidez, la que le fue útil, entre otras cosas, para confeccionar las tablas de futuras fases lunares y eclipses, aunque ello no impidió que incurriera en errores de cálculo con cierta frecuencia. Tal y como ya se mencionó, Sánchez de Cozar no registró aspectos que aludan a que alguna vez recibió algún grado de formación normativa que, de haber sido relevante, muy seguramente hubiera anotado, por lo que suponemos que la mayor parte de sus conocimientos fueron adquiridos de forma autodidacta.

También se evidencia un afán de proyectar para sí una imagen de importancia habida cuenta de ser descendiente directo de un aguerrido cacique indígena (pág. 5v), lo que no parece entrar en contradicción con la manifiesta condición de pobreza en la que vivían él y su familia (pág. 6).

Una pesquisa realizada por uno de los autores (Moreno) en las parroquias de las poblaciones de Vélez y de El Socorro, con el propósito de recoger algún indicio adicional sobre su vida, no arrojó ningún resultado. Es dudoso, entonces, que haya sido párroco de la iglesia de Vélez y en su lugar lo haya sido de una parroquia cercana a esta población o de San Gil. En al menos dos partes (pág. 6 y 7) Sánchez de Cozar dejó consignado que invirtió veinte años en la redacción completa del manuscrito, cuya finalización probablemente ocurrió en el año de 1696, ya que al final de la “Carta y el prólogo al lector” colocó por fecha el 25 de diciembre de ese año (pág. 9v). Del mismo modo, en las páginas 71v y 72 manifiesta que lo que está redactando lo hace en ese año.

Es evidente que Sánchez de Cozar debió tener acceso a un número importante de libros si hemos de juzgar por el abanico de autores que menciona a lo largo del manuscrito. De lo que se colige que debió tener la facilidad de consultar una nutrida biblioteca, probablemente de naturaleza monacal. Es incuestionable que el libro “Cronología y reportorio de la razón de los tiempos” de Rodrigo Zamorano (Zamorano, 1594) cuya primera edición data de 1594, influyó decididamente en Sánchez de Cozar, si tenemos en cuenta no solo las numerosas líneas que adaptó de ese libro sino también la imitación de su estructura y la forma de presentación de ciertas tablas.

De acuerdo con lo que anotó en uno de los prólogos, su intención en un comienzo era escribir solo para sí (pág. 3). Pero luego fue animado por otras personas a que comunicara sus ideas y visibilizara sus escritos. Al principio estuvo renuente a ello pues se sentía intimidado frente al amplio número de investigadores que hubo antes que él trabajando en esos temas. Pero después reconsideró su postura, le dedicó el libro al Rey y le solicitó a éste que corriera con los gastos de la impresión y, debido a la importancia que su autor valoraba sobre su contenido, un ejemplar debía ser mandado a Roma para ser examinado por el Papa. Todo parece indicar que ese anhelo nunca fue satisfecho.

Como ya se dijo, al sacerdote le tomó cerca de dos décadas redactar su obra, lo cual no es de extrañar si se tiene en cuenta que escribió (al menos hasta 1696) cinco versiones de la misma, junto con la elaboración de efemérides astronómicas, consistentes, como veremos, en fases lunares y eclipses por un número sustancial de años, así como la redacción de tablas perpetuas para calcular el número áureo—este concepto se examinará más adelante y tiene que ver con el ciclo de Metón y no debe confundirse con la proporción áurea— y las epactas (la edad de la Luna contada en días, el primero de enero, a partir de la última Luna nueva) dentro de la reforma al calendario que él propone.

Antes de entrar a la descripción formal de los capítulos que conforman cada uno de los tres tratados, es preciso dejar en claro que si bien la redacción del manuscrito ocurrió a finales del siglo XVII, esto es, para un tiempo en el que Copérnico, Kepler y Galileo ya habían fenecido y en el que los escritos físico matemáticos de Newton llevaban poco tiempo de ser redactados y publicados, la astronomía de Sánchez de Cozar es enteramente ptolemaica e inmersa aún en un fuerte escolasticismo, aunque, como examinaremos más adelante, pincelada con toques de originalidad. Desconocemos si el autor estaba al tanto de la existencia de la teoría heliocéntrica aunque, si ese hubiese sido el caso, lo más probable es que la hubiera descartado de entrada dado su firme convencimiento de no aceptar todo aquello que fuera en contra de las sagradas escrituras.

La relevancia de nuestro autor, como se verá más adelante, no reside en haber propuesto o defendido un nuevo modelo cosmológico. Consiste más bien en que él ofreció, libremente y sin ir en contra del canon establecido, varias ideas que le parecieron más plausibles acerca del movimiento y conformación de lo que se consideraba en ese entonces como universo. Su libertad residió en que sus amplias lecturas le mostraron que no fueron pocos los autores a lo largo de las centurias que se atrevieron a especular sobre aspectos que la Biblia y otros libros de doctores de la iglesia no dejaron en claro. Sánchez de Cozar juzgó que, a pesar de ser un aislado habitante de una oscura colonia española, nada en principio le prohibía ofrecer hipótesis plausibles sobre el conocimiento del cosmos imperante sin entrar en contradicción con los dogmas fundamentales de la iglesia. E incluso, como veremos, estaba convencido que el calendario gregoriano adolecía de varias deficiencias y que él, con base en una atenta lectura de las sagradas escrituras, podía ofrecer unas reglas alternativas que solucionaban para siempre el problema de la determinación de la Pascua de resurrección que celebran los católicos.

Lo que viene a continuación es una descripción resumida de cada tratado, lo cual permite hacernos una idea de los distintos temas que Sánchez de Cozar abordó y, al mismo tiempo constituya en una guía conveniente al interesado para facilitar la localización de la información.

## El “Tratado primero”

El propósito esencial del primer tratado es describir varios conceptos fundamentales de la astronomía de posición aunado a una descripción cosmológica y dinámica de los objetos que lo integran. Sin embargo, no está exento de exponer algunos aspectos de naturaleza astrológica. Es de particular interés la forma como el autor atribuye el movimiento a las esferas que contienen los planetas, junto con su propuesta de incluir un nuevo cielo entre la Luna y Mercurio. En tanto que no entren en contradicción con el texto bíblico y la opinión de varios doctores de la iglesia, el autor no teme consignar su opinión con relación a la forma y el tamaño de la Tierra, así como la ubicación a la que están situadas las estrellas.

En el primer capítulo expone varios aspectos básicos astronómicos comenzando con una descripción general de lo que es el universo. La visión es geocéntrica con claros rasgos aristotélicos. Los cielos “son unos cascos huecos de materia cristalina incorruptible, de figura redonda esferal discontinuos unos de otros, y continuos en sus partes [...] unos entre otros desde el Empíreo hasta el de la Luna en cuyo centro están los 4 elementos”. Y a continuación esboza una característica que le otorga a tales cielos, pues cada uno (salvo el Empíreo) “tiene un ñudo en forma piramidal hacia la Tierra”, el cual es responsable de que cada uno de esos cielos haya perdido estabilidad y esté dotado del movimiento que los caracteriza de oriente a occidente (pág. 13). Tanto el Empíreo (el más externo de los cielos, lugar de residencia del Dios cristiano, sus ángeles y los bienaventurados) como la Tierra son fijos e inamovibles. Define a continuación el punto céntrico de la gravedad al que otorga una gran importancia, pues a él le atribuye la forma circular de los cielos, así como su movimiento (pág. 13v).

A lo largo de este primer capítulo aparecen las definiciones de zodiaco, constelación, signo zodiacal, planeta (el cual define como un cuerpo redondo, hueco, lleno de una materia umbrosa y encajado en cada pirámide de su cielo correspondiente (pág. 15)), equinoccios, solsticios (estos dos definidos como círculos), declinación (que define como el movimiento oblicuo que hacen del ecuador a los trópicos cuya distancia es de  $23,5^\circ$ ), spira, polos, cenit, almicanarat, la igualdad entre la altura de los polos con la latitud, paralelos, coluros mayores y menores y la eclíptica. No es raro que en las primeras definiciones existan comentarios sobre las “influencias buenas y malas” de los planetas y las estrellas. También introduce el “cielo incógnito” el que ubica entre Mercurio y la Luna (pág. 15 y 15v); adicionalmente, explica el funcionamiento de los eclipses tanto de Luna como de Sol (lo que acompaña con varias “demostraciones” (figuras)) y define la Vía Láctea denominándola “línea láctea” y aventura una explicación sobre su extraña coloración. Remata el capítulo definiendo los conceptos de auge y opuesto de auge y del crepúsculo matutino y el vespertino.

En el segundo capítulo describe la división del mundo en tres partes: invisible (el Empíreo), celeste (desde el cielo

de las estrellas fijas hasta la Luna) y elemental (la Tierra). Menciona que el mundo está compuesto de 14 cuerpos circulares de los cuales nueve son los cielos “agentes” (el cielo estrellado, Saturno, Júpiter, Marte, Sol, Venus, Mercurio, el incógnito y la Luna) y los cuatro cuerpos restantes los identifica con los cuatro elementos aristotélicos. Por la ausencia de varias folios, ignoramos el contenido de lo que resta de ese capítulo, al igual que el contenido total del tercero. Del cuarto capítulo conocemos el contenido de menos de una hoja en el que se observa su insistencia en que, para su movimiento, los cielos no requieren de “inteligencias angélicas”. En una línea escribe la palabra “epiciclo” pero en un contexto confuso.

En el capítulo 5 Sánchez de Cozar explica con más detalle la forma geométrica que deben tener cada uno de los cielos. Como se explicará más adelante en la sección de análisis, para el autor tanto la “grosesa” (grosor) que ha de tener cada cielo como el peso de cada planeta y el ñudo que lo envuelve son fundamentales para efectos de que hayan perdido la estabilidad y cada uno posea una velocidad distinta de su movimiento. También introduce un auto reparo, en el que explica el porqué de su atrevimiento de sugerir que los cielos se mueven sin necesidad de requerir “inteligencias angélicas”.



**Figura 3:** Imagen de la pág. 30 en la que muestra el cielo de la Luna, el cielo incógnito y el cielo del planeta Mercurio interactuando mutuamente a través de sus puntas piramidales

A lo largo del capítulo 6 ofrece más detalles sobre la concepción dinámica del movimiento de los cielos. Aquí exhibe



una gran intuición física y el uso de un experimento mental para defender sus explicaciones acerca de los cielos dotados de movimiento circular alrededor del punto céntrico de la gravedad que está ubicado en el interior de la Tierra. Reitera su introducción de un cielo no contemplado antes, ubicado entre la Luna y Mercurio y que, como ya comentamos, denominó “el incógnito”, motivado por la aparición de dos cometas que surcaron los cielos en 1681 y 1682. Expone tres preguntas que los conocedores de sus ideas le habrán hecho e incluye sus correspondientes respuestas. Al responder esas preguntas ofrece más detalles de su concepción mecánica del movimiento de los cielos (Figura 2), aunque no está exento de introducir elementos muy simplistas para explicar la propensión de los cuerpos planetas a mantenerse dentro de la cinta del zodiaco.

El capítulo 7 está reservado para explicar el procedimiento por el cual, en el fin de los tiempos, caerán las estrellas del cielo y los cielos que contienen los planetas dejarán de moverse, en consonancia con lo descrito en el evangelio de Mateo (24, 29). De manera que el autor, de conformidad con su explicación dinámica del movimiento de los cielos, vislumbra un escenario en el que el ñudo de las estrellas fijas caerá sobre el ñudo de Saturno, de tal suerte que todo el sistema tendrá una estabilidad perfecta con respecto al punto céntrico de la gravedad y, por lo tanto, a partir de ahí todo el sistema estará estático por siempre.

Sánchez de Cozar dedica el capítulo 8 a describir el tiempo que le toma al cielo estrellado dar una revolución completa con respecto al Empíreo, al igual que los tiempos que les toman a los planetas hacer una revolución completa con relación al cielo estrellado. Con base en tales tiempos calcula la tasa angular diaria de cada uno de ellos. Para el primer caso asume que al punto vernal, que estaba en el cenit del campo damaceno (i.e., lugar que la Biblia fija como aquel en el que Dios creó a Adán) en el momento de la creación del mundo, le toma cerca de 7.000 años volver a pasar por el mismo sitio con respecto al Empíreo; lamentablemente, no explica la razón de asumir que dicho periodo es exactamente de 2.555.000 días, 15<sup>m</sup> y 6<sup>s</sup>. Luego calcula la tasa diaria de ese desplazamiento, que el autor se toma el trabajo en calcular en:  $0^{\circ}0'0''30'''26^{iv}3^{v}59^{vi}31^{vii}49^{viii}11^{ix}52^x$ . Como aclaración: la nomenclatura que usamos aquí para las medidas angulares es la siguiente: <sup>o</sup> grado, <sup>'</sup> minuto, <sup>''</sup> segundo, <sup>'''</sup> tercero, <sup>iv</sup> cuarto, <sup>v</sup> quinto, <sup>vi</sup> sexto, <sup>vii</sup> séptimo, <sup>viii</sup> octavo, <sup>ix</sup> noveno y <sup>x</sup> décimo. Segundo, como se sabe, es la sesentava parte del minuto; luego tercero es la sesentava parte del segundo; cuarto es la sesenta ava parte de tercero y así sucesivamente. Con relación a las medidas de tiempo, tenemos que la notación es: <sup>d</sup> día, <sup>h</sup> hora, <sup>m</sup> minuto, <sup>s</sup> segundo, <sup>t</sup> tercero, <sup>c</sup> cuarto, <sup>q</sup> quinto, <sup>sx</sup> sexto, <sup>sp</sup> séptimo, <sup>oc</sup> octavo, <sup>no</sup> noveno y <sup>de</sup> décimo.

Así mismo, el autor toma para los planetas los siguientes tiempos de revolución junto con sus correspondientes tasas diurnas de movimiento, que aquí escribimos con una notación más conveniente pero con los valores que el autor es-

cribió y calculó: Saturno ( $10767^d 8^m 32^s, 0^{\circ}2'0''22'''4^{iv}2^v$ ), Júpiter ( $4330^d 11^m 48^s, 0^{\circ}4'59''18'''25^{iv}46^v$ ), Marte ( $686^d 22^m 57^s, 0^{\circ}31'29''12'''$ ), Sol, Venus y Mercurio —nótese que toma los tres objetos con los mismos valores— ( $365^d 5^h 50^m, 0^{\circ}59'8''14'''$ ), incógnito ( $300^d, 1^{\circ}12'$ ) y la Luna ( $27^d 7^h 43^m 48^t, 13^{\circ}10'56''$ ). Adviértase que, curiosamente, en varios casos, al dar los periodos, el autor omitió los valores correspondientes a las horas. También incluyó el ángulo que cada planeta describe en el periodo con un número entero de días y la tasa horaria de desplazamiento que no hemos aquí reproducido. Al parecer, para la determinación de estos valores el autor tomó como modelo los datos contenidos en la tabla de la pág. 56 del libro de Juan de Pineda (**De Pineda**, 1589) y, por las sutiles diferencias que existen al comparar los valores, se puede inferir que Sánchez de Cozar no se conformó con simplemente copiarlos de ese libro.

Datos sobre el número de estrellas, así como su división en términos de su brillo (y con esto, de su tamaño), al igual que el tamaño de los planetas con relación al diámetro de la Tierra están contenidos en varias tablas del capítulo 9. Además, en forma también de tabla, incluye las distancias de los planetas a la Tierra, así como la “grosesa de los cantos” de cada uno de ellos, Manifiesta que los valores que presenta son tomados tanto de Ptolomeo como de Alfagano (Al-Farghani) e incluye también los datos de distancia los planetas de la obra de Juan de Pineda.

El capítulo 10 es dedicado a un análisis sobre el brillo y las distancias a las que han de estar situadas las estrellas. Sánchez de Cozar cuestiona los valores de distancias que han ofrecido los autores que ha consultado basándose en suponer cómo sería el brillo del Sol si estuviese a tales distancias, llegando a la conclusión de que este no se llegaría a observar. De modo que tiene dos opciones: o las estrellas son “mucho mayores que el Sol” o, en su defecto, están más cerca de lo que se ha asumido. El autor desecha la primera hipótesis (“siendo como son algo menores”) y aunque adopta los valores de las distancias de los cuatro primeros objetos más cercanos a la Tierra (la Luna hasta el Sol) que ofrece Juan de Pineda, reduce significativamente los valores de las distancias a los planetas Júpiter y Saturno y, de forma notoria, reduce a una sexta parte la distancia a la que está situada la superficie “convexa” del cielo estrellado.

La discusión sobre la forma y el tamaño de la Tierra la reserva para el capítulo 11. Frente a los distintos valores que diferentes autores han propuesto para la longitud de la circunferencia de la Tierra (6.300, 7.500, 8.912, en unidades de leguas) Sánchez de Cozar llega a una conclusión sorprendente: todos esos autores están en lo correcto. Y la razón es que la Tierra, estrictamente hablando, no es una circunferencia perfecta: hay unas regiones que están significativamente más elevadas que otras. El autor, con base en una descripción que un viajero hizo en las tierras del “Perú y Lima” en donde apreció que “avanza por allí el Sol en una hora 370 leguas y más un tercio de otra por la razón de ser como son esas tierras las más elevadas hacia la región media

que las demás”, infiere, con razonamientos algo confusos, que la longitud de la circunferencia en tal lugar de la Tierra es de  $370.33 \times 24 \approx 8888$  para lo cual le da un radio terrestre en esa zona igual a  $8.888/6,283 \approx 1.414$  leguas. No queda de más señalar que hay una amplia incertidumbre en establecer una equivalencia de esta longitud en unidades de longitud modernas, ya que la legua no solo variaba de forma notable entre los diferentes reinos españoles, sino que recibió a lo largo del tiempo distintas redefiniciones. Suponiendo que Sánchez de Cozar se refiriera a la legua castellana, que equivalía a unos 4,19 km, tenemos que el radio terrestre para él era de unos 5.925 km.

Los dos capítulos restantes, el 12 y el 13, son de muy escaso interés astronómico. El capítulo 12 está dedicado a exponer relaciones de carácter eminentemente astrológico; es así como expone varias configuraciones planetarias (conjunción, sextil, cuadrado, trino, oposito), pero tales conceptos no solo operan entre planetas sino algunos de ellos se dan entre las mismas constelaciones zodiacales reforzando o anulando las “cualidades” que poseen e influyendo “las cosas de acá abajo”. En el mismo sentido netamente astrológico explica los conceptos de “casas” y “haces” de los planetas. Agrega: “en alguna manera nos vienen los astros y planetas con que al tiempo de nacer nos cogen estas posiciones ascendiendo ellos por el oriente que en cuando influyen sus virtudes” (pág. 44). El capítulo 13 trata sobre los años “climáticos” y tiene que ver con aspectos de naturaleza numerológica ya que, según tradiciones antiguas, existían ciertos años particulares a lo largo de la vida de un ser humano que eran determinantes o para la vida o para la muerte. El número 63, por ejemplo, se consideraba particularmente aciago para un hombre que cumpliera tal edad.

## El “Tratado segundo”

El tema central del tratado segundo es el tiempo. Inicia el capítulo 1 con una definición del concepto de eternidad citando a san Agustín. Sin mayores preámbulos pasa al capítulo 2 donde define el evo como la duración de las cosas eviternas (aquellas que tienen un principio pero no un final, como los espíritus, ángeles, cielo Empíreo) y lo diferencia del concepto “tiempo”, el que tendrá fin al momento en que los cielos dejen de poseer movimiento.

En el capítulo 3 especifica que el tiempo es la duración del evo y lo liga al concepto del movimiento de los cielos. Menciona que las “divisiones naturales” del tiempo son solo tres y corresponden al movimiento de los “dos luminares magnos”, esto es, el Sol y la Luna. Estas tres divisiones son: 1) el día solar, que él define como el tiempo que tarda el Sol en dar una vuelta de oriente a occidente partiendo de cualquier cenit hasta volver otra vez al mismo. Su duración es de  $24^h 57^s 32^t 3^c 17^q 15^{sx} 37^{sp}$ ; 2) el año, entendido como el tiempo en que tarda el Sol en dos pasos consecutivos por el punto vernal, aunque afirma que es un movimiento de “oriente en poniente”. A su vez este movimiento lo hace de cuatro maneras: i) el año natural propiamente dicho (con

duración de  $365^d 5^h 50^m$ ); ii) el ciclo de 19 años, que es claramente el ciclo de Metón (aunque no lo menciona con este nombre); iii) un ciclo de 62 años, y iv) un ciclo de 144 años que denomina “circulación magna del Sol”, que es significativo para el autor puesto en él descansa parte de su propuesta de reforma del calendario. Como acabamos de ver, el autor adopta como valor de la duración verdadera del año, o más estrictamente del año trópico a  $365^d 5^h 50^m$ , que es con el que realiza, como veremos, su modificación al calendario. A lo largo del manuscrito lo escribirá siempre de ese modo, sin especificar los segundos, pero es claro que tomó  $365^d 5^h 50^m 0^s$ . Finalmente, el 3) corresponde al mes, y lo divide en dos: i) el mes sideral, con duración de  $27^d 7^h 43^m 5^s 48^t$  y el mes sinódico, con una duración de  $29^d 12^h 42^m 3^s 12^t$ , aunque no utiliza propiamente esos nombres.

Una explicación más detallada del “día natural” está contenida en el capítulo 4. Repite su duración tal y como lo anotó en el párrafo precedente ( $24^h 57^s 32^t 3^c 17^q 15^{sx} 37^{sp}$ ). Tal parece que lo que Sánchez de Cozar quiso anotar aquí es la duración del día solar con respecto al día sideral (que es de unas  $\sim 24^h 3^m 57^s$ ). La omisión de los minutos (o de las horas), curiosamente, es algo que no es raro en el autor, tal y como se anotó en el capítulo 8 del primer tratado. También define aquí el día natural como el tiempo que tarda el Sol “partiéndose de un cualquier punto del zodiaco y volviendo otra vez al mismo”, es decir, parece confundirlo con la definición de año. Más adelante comenta que hay dos maneras de medir el inicio del día: o bien desde el mediodía (“el más perfecto modo de medir todo lo que es tiempo”) y “al contrario: esto es, de media noche a media noche”. Luego define el día artificial como aquel tiempo en que “el Sol nos alumbra desde que nace hasta que se pone” y comenta la diferencia de la duración de este tiempo que hay en el ecuador (donde hay igualdad de duración entre el día y la noche) con la que surge si un observador se va desplazando hacia los polos, en cuyos puntos es mayor la diferencia entre el día artificial y la noche.

El capítulo 5 está reservado a explicar las dos divisiones del día natural. La primera es la natural planetaria (o temporal desigual). La razón del nombre radica en que asigna a cada planeta (desde Saturno hasta la Luna) un efecto para cada hora a lo largo del día. El autor tiene especial preocupación por especificar el momento de la creación del mundo, e incluso fijar el meridiano (utiliza la palabra cenit) del lugar en el que el Sol culminaba al momento de la creación de este astro, esto es, el “campo damaceno” o campo de Damasco que, como ya se dijo, es comúnmente considerado el lugar donde fue creado Adán y presumiblemente ubicado en algún punto del Levante mediterráneo. Esto, para contar desde ahí las horas en que cada planeta “reina” exactamente sobre cada hora del día; como son siete planetas hay algunos de ellos que alcanzan a reinar hasta cuatro veces a lo largo de un día. Habiendo fijado las reglas en que cada planeta predomina en

el meridiano de referencia (esto es, en el campo damaceno) a partir de la primera hora de tiempo local indica qué debe hacerse para determinar las horas de las entradas de cada planeta correspondiente a cualquier otro observador ubicado en la superficie del planeta. De ahí que remita al lector al capítulo 7 del tercer tratado donde, en varias tablas, están las longitudes en unidades de tiempo (así como latitudes) de numerosas ciudades tanto de España como de sus colonias. Al final de este capítulo comenta la otra manera de dividir el día natural: en horas artificiales (equinocciales) que, de acuerdo con la explicación ofrecida, está basada en un Sol que se desplaza por el ecuador celeste, esto es, una especie de día solar medio y que hace que las horas posean igual duración.

Varias formas de dividir la duración del día, segmentado en horas equinocciales, se explican en el capítulo 6. La primera es semejante a como la usamos hoy: cada hora segmentada en 60 partes llamadas minutos; cada minuto segmentado en 60 partes llamados segundos, cada segundo segmentado en sesenta partes denominados “terceros”, y así sucesivamente. De hecho, describe esta forma en dos ocasiones y en lugares distintos del capítulo, en la segunda ocasión llega en ese proceso de fragmentación a subdividir hasta los “décimos”. La segunda forma consiste en dividir cada hora en cuatro cuartos (1 cuarto = 15 minutos); cada cuarto a su vez es dividido en diez partes llamadas momentos (1 momento = 1,5 minutos); cada momento es dividido en 12 partes denominadas uncías (1 uncía = 7,5 segundos) y cada uncía es dividida en 44 partes llamadas átomos (1 átomo = 0,17045 segundos). También menciona que en lugar de dividir la hora en cuatro cuartos, algunos la dividieron en cinco quintos (1 quinto = 12 minutos). Esto último, al parecer, tiene que ver con el esfuerzo que hicieron algunos en relacionar el día artificial con el “día lunar”, este último definido como el tiempo entre dos salidas consecutivas de la Luna por el horizonte oriental, que el autor estima más largo con relación al día artificial en 4/5 de hora. En el capítulo 7 describe otra formas de fraccionar la duración del día consistente en dividirlo en cuatro segmentos de seis horas cada día, en consonancia con las cuatro épocas del año, las cuatro edades del hombre, etc. Complementa con una nueva propuesta de cómo pueden ser los intervalos de hora que han de tener esas cuatro fases y las relaciona con las edades del hombre (Figura 4).

El capítulo 8 contiene una discusión sobre las fechas exactas en que, según el autor, han de sucederse tanto los equinoccios como los solsticios. Sánchez de Cozar no comparte el que algunos cronólogos hayan fijado el equinoccio de primavera el 21 de marzo y el equinoccio de otoño el 23 de septiembre, lo que implica que el Sol se tarda más de tres días en ir hacia el trópico de Cáncer que hacia el trópico de Capricornio. Esto es inadmisibles para el autor, pues, según él, “el movimiento del Sol es el más perfecto que el de los demás planetas” y no es concebible que el astro dador de luz se le “hubiese dado la imperfección de ser más tardo hacia el uno que hacia el otro”. El autor establece el equinoccio en

términos de la fecha de creación del mundo (que él fija, a lo largo del manuscrito, en un 20 de marzo) por lo que acomoda el equinoccio entre el 20 y el 21. Aunque, de acuerdo con el Génesis, Dios creó el Sol (y la Luna) solo hasta el tercer día, justifica su elección dando mayor peso a la luz que se creó desde el primer día. Además, comenta que tanto el solsticio de junio como el solsticio de diciembre están relacionados con la fecha de concepción y de nacimiento de Juan el Bautista. Establece que las fechas tanto de equinoccios como de solsticios son: 21 de marzo, 20 de septiembre, 21 de junio y 21 de diciembre y que de ahí no se deben salir. Discute también algunos aspectos de la modificación del calendario juliano y gregoriano. A manera de aclaración es conveniente señalar que, en realidad, los equinoccios y los solsticios no caen exactamente en los mismos días del año; así mismo, se verifica que, en promedio, el Sol sí invierte cerca de 90 días en ir del solsticio de diciembre hasta el equinoccio de marzo mientras que gasta 93 días en desplazarse entre el solsticio de junio al equinoccio de septiembre. Esto se debe a la velocidad variable de la Tierra alrededor del Sol, la que es mayor al inicio del año.



Figura 4: Tabla de las cuatro cualidades, según se explica en el capítulo 7 del segundo tratado, pág 53

Una amplia exposición de carácter numerológico se puede encontrar en el capítulo 9. Comienza por definir el concepto de semana como el “tiempo en que Dios creó al mundo”; procede a continuación a narrar lo que Dios fue creando del universo en términos de 6 días (con uno adicional de descanso), ajustado, como es de esperarse, a la narración del Génesis. El número 7 adquiere, por lo tanto, un importante significado, por lo que el autor narra diversos eventos bíblicos en los que está involucrado dicho número, aunque también cita algunos en los que aparece el número 14 (“de

siete en siete”) y el número 70. Esta exaltación del número siete constituye en un preámbulo para exponer las “tablas perpetuas” (ver pág. 59v), las cuales están conformadas por siete columnas con el propósito de encontrar, para un año determinado, la “letra dominical” (cualquiera de las siguientes siete letras: A, B, C, D, E, F, G, con una ligera modificación en los años bisiestos) y el “ciclo solar” (de ahí que la tabla esté constituida por 28 líneas). Estos dos conceptos sirven de instrumento en la cronología cristiana para la determinación de la fecha de la Pascua de resurrección.

Sin embargo, la tabla en referencia no es muy clara en su uso, y las explicaciones anexas de la misma no permiten ofrecer con claridad su uso correcto. Agravando el asunto está el hecho de que la misma contiene ya “su reformación”, esto es, la modificación que él propone al calendario, la que solo explica con detalle varios capítulos después. Al final del capítulo hay una tabla (pág. 60v) en la que se exhiben el número áureo, la letra dominical y la epacta para varios años a intervalos de 144 con dos secuencias de conteo: a la izquierda el conteo es desde el año de la creación del mundo (año 1) hasta el año 3.744 después de esa creación; a la derecha, con los años contados en la era cristiana, también a intervalos de 144 años a partir del año 1.

Una explicación más detallada de la tabla de la pág. 60v se nos ofrece en el capítulo 10. El autor utiliza el concepto de epacta para años anteriores a 1582 de modo que calcula un valor de ésta igual a 11 para el año primero de la creación del mundo, lo que es consistente con la fecha de creación de la luz un 20 de marzo y de la creación de la Luna y el Sol tres días después; esto a la vez es consistente con una conjunción que ha debido ocurrir el día 18 de marzo (lo que está de acuerdo con una posición de la Luna unos  $65^{\circ}54'40''$  (pág. 55) al oriente del Sol en el momento en que Dios creó ambos astros). Un amplio espacio de este capítulo está dedicado a justificar por qué asignó determinados valores de epacta a ciertos años. Al final se consignan dos tablas en las que aparecen los valores de las epactas “desmesadas”, una correspondiente para el año 1 hasta el 3744 (pág. 63v) y otra a partir del año 68 d. C.

La discusión sobre las siete edades del mundo está contenida en el capítulo 11. El autor divide la historia en seis segmentos dejando el séptimo para el “descanso de la eternidad” después del fin del mundo. El devenir histórico está, por supuesto, enmarcado por los sucesos relatados en la Biblia, de modo que el inicio y el final de cada época está definido por eventos que el autor juzga decisivos, tales como el diluvio universal, la destrucción de Jerusalén y el nacimiento de Cristo. Pero, para efectos de fijar lo más exactamente posible los intervalos de cada edad, Sánchez de Cozar juzga imprescindible determinar el año exacto del nacimiento de Cristo, labor complicada habida cuenta de las varias dificultades que se interponen para alcanzar el éxito en la tarea. Entre ellas están la amplia diversidad de fechas que se han propuesto para tal evento, la pérdida de información fiable a causa de las convulsiones históricas y el uso reite-

rado del mismo nombre para bautizar a distintos reyes a lo largo de la historia. Aquí nos enteramos de que el autor ha abordado el tema de la fecha del nacimiento de Cristo en cuatro anteriores cuadernos, pero reconoce que en ellos incurrió también en error como muchos otros computistas (ver pág. 66). Fija entonces como fecha de nacimiento de Cristo al año 3821 después de la creación del mundo y a continuación establece lo que a su juicio son los intervalos correctos de las edades del mundo. A lo largo de las siguientes cuatro páginas otorga, de acuerdo con lo anterior, las fechas en que ocurrieron, a partir de la creación del mundo, cerca de 30 distintos eventos narrados en la Biblia.

En el capítulo 12 explica la definición del número áureo ( $NA$ ) y su fundamento (la casi igualdad de 19 años solares trópicos con 235 meses sinódicos), y la manera como ha de calcularse para un año determinado, para lo cual utiliza una fórmula que aquí bien podemos escribir como:

$$NA = \left( \frac{A + 1}{19} \right)_r,$$

donde  $A$  representa el año y el subíndice  $r$  representa el resto (“sobra”) de la división; en el caso en que con la fórmula anterior no se obtenga resto (i.e., en el caso en que  $A + 1$  sea exactamente divisible por 19) entonces el valor de  $NA$  es igual a 19. Y muestra varios ejemplos de su aplicación. Insiste en su determinación de fijar el año del nacimiento de Cristo en el año 3821 después de la creación del mundo, en el que ha de corresponder a un número áureo igual a 2 y una exposición del porqué no es posible asignar otra fecha para ese evento (de las 10 que diversos autores habían propuesto antes que él).

Los conceptos de mes solar y de mes lunar son explicados en el capítulo 13. El mes solar que, como su nombre indica, está basado en el movimiento del Sol, lo divide en dos: i) el aparente y el ii) igual. El primero es el tiempo que gasta el Sol en atravesar los 30 grados que comprende cada signo del zodiaco; el segundo es aquel tiempo de igual duración en que haría lo mismo con una duración de  $30^d 10^h 29^m 10^s$ . El mes lunar sí está basado en el movimiento de la Luna; lo divide en tres: i) el peragratorio, que es lo que comúnmente se denomina mes sideral, con una duración de  $27^d 7^h 43^m 2^s 48^t$  (en el capítulo 3 colocó  $5^s$  en lugar de  $2^s$ ); ii) el aparente, que es el tiempo transcurrido entre dos observaciones consecutivas de la Luna después del novilunio y que, por obvias razones, es desigual, y ofrece cuatro razones del porqué de esa desigualdad. Finalmente, explica el mes iii) consecutivo, que es el mes sinódico, con una duración de  $29^d 12^h 44^m 3^s 12^t$  (en el capítulo 3 colocó  $42^m$  en lugar de  $44^m$ ) y describe los tiempos entre el cuarto menguante y el creciente, así como el tiempo transcurrido entre cada cuarto.

En el capítulo 14 se ocupa de examinar el concepto del año trópico y, de forma extensiva, de su duración. Refiere distintas duraciones del año trópico, como las que ofrecieron Calipo, Aristarco y Arquímedes ( $365^d 6^h$ ), Hiparco y Ptolomeo ( $365^d 5^h 55^m 12^s$ ) y Albategni —i. e.,

Al-Battani— ( $365^d 5^h 46^m 24^s$ ). Al comentar sobre avances posteriores, en particular para el tiempo de la “reformación” gregoriana, menciona a Nicolás Copérnico, pero escribió Copernio. Este dato es significativo pues, al parecer, fue de la edición del libro de Zamorano de 1594 —o una reedición posterior— de la que Sánchez de Cozar extrajo esa información (pág. 103 de esa edición), pues la narración es parecida aunque no idéntica, y allí aparece escrita la palabra “Copernio”; es claro que se trata de un error de imprenta, ya que varias hojas más adelante aparece correctamente la palabra “Copernico” (sic). En la edición de 1621 se subsanó ese error. La citación de Copérnico, tanto para Zamorano como para Sánchez de Cozar, tiene que ver con el dato de la duración del año trópico y no con la teoría heliocéntrica.

Después de la alusión a Copérnico, Sánchez de Cozar menciona también las tablas pruténicas (tablas prusianas elaboradas por Erasmus Reinhold en 1551) a las que parece confundir con las tablas alfonsíes (que datan de mediados del siglo XIII), las que adoptaron un año con una duración de  $365^d 5^h 49^m 16^s$ . La narración no es clara en este punto, pero parece señalar que fue este el valor que adoptaron los astrónomos que asesoraron a Gregorio XIII para efectos de establecer la reforma gregoriana, porque a continuación comenta la estrategia para evitar que cada 400 años el año civil se adelanta tres días con relación al trópico. Como se sabe, la reforma gregoriana estableció la eliminación de 10 días del mes de octubre de 1582 haciendo que del día 4 se pasara al 15 (para efectos de que el equinoccio cayera otra vez el 21 de marzo, pues se verificaba en esos tiempos el día 11 de ese mes); además, se fijó que aquellas centurias tales como 1700, 1800 y 1900, que no son exactamente divisibles por 400, no fueran años bisiestos, de modo que con esa estrategia se busca que el año civil no exceda al año trópico por tres días, que era lo que sucedía con la utilización del calendario juliano.

Sin embargo, Sánchez de Cozar, un siglo después de la reforma gregoriana, considera que hay aspectos de las fases de la Luna que no concuerdan, por lo que llegó a la conclusión que la duración del año trópico ha de ser 44 segundos más larga (i.e.,  $365^d 5^h 50^m 0^s$ ), lo que probablemente acogió basado en un error de cálculo. Veamos: el autor procedió a determinar qué tanto se aparta el Sol del punto vernal al cabo de cuatro años. Así que realiza el cálculo de la tasa de desplazamiento diaria del Sol; obtiene  $360^\circ / 365^d 5^h 50^m 0^s = 0^\circ 59' 8'' 14'''$ ; luego, al cabo de 365 días civiles, el Sol habrá recorrido  $359^\circ 45' 37''$ , pero Sánchez de Cozar comete un error, pues obtuvo  $359^\circ 45' 05''$  (i.e.,  $32''$  menos); por lo tanto, lo que se atrasa el Sol anualmente con respecto al punto vernal es  $0^\circ 14' 23''$  (Sánchez de Cozar obtiene  $0^\circ 14' 55''$ ); luego cada cuatro años el Sol se habrá atrasado con respecto al punto vernal  $0^\circ 57' 32''$ ; pero Sánchez de Cozar, con el error que lleva, obtiene  $0^\circ 59' 39''$ , esto es, una diferencia significativa de  $2' 07''$ . El sacerdote advierte que  $0^\circ 59' 39''$  no es igual a  $0^\circ 59' 8''$ , por lo que, en poco más de una centuria ese acumulado hará que sea nece-

saria la aplicación de una “simulación” del bisiesto, esto es, establecer que, aunque sea divisible exactamente por cuatro un año no se considerará bisiesto y volver con ello a hacer coincidir el Sol con el punto vernal. Sin embargo, aquí no hace el cálculo de cada cuánto hay que hacerlo (lo que hizo, como veremos, en el primer capítulo del tercer tratado, pero de otra forma); si lo hubiese hecho, hubiera advertido el error. Finalmente, el autor señala que el calendario gregoriano ha continuado perpetuando la costumbre de no celebrar el día de la Pascua en la fecha en que de verdad corresponde, y menciona que ello se debe a no haber “simulado” 11 días y 11 letras en el año de 1582, y agrega taxativamente “no basta decir que el año tiene tanta cantidad y que las simulaciones del bisiesto se deben hacer cada cierto tiempo sino se comprueba con traerlas sin discordancia alguna desde la creación del mundo hasta el tiempo presente”.

La definición de año lunar está contenida en el capítulo 15. Lo diferencia en dos: el común y el embolismal. El común corresponde a la duración de 12 conjunciones de la Luna con el Sol, que equivale a  $354^d 8^h 48^m 32^s 24^t$ . Escuetamente Sánchez de Cozar anota que el embolismal corresponde a la duración de 13 conjunciones y que posee una duración de 384 días. Aunque el autor no lo menciona, ambos conceptos son de importancia en los calendarios lunisulares tales como el judío.

Lo relacionado con los periodos realizados “por las demás estrellas”, es decir, por los planetas, el autor en el capítulo 16 menciona que tales periodos para cada planeta se definen de dos maneras: la primera es el tiempo que tardan en volver a pasar por el mismo punto de forma consecutiva por la esfera celeste; y la otra, de igual duración, es de clara connotación astrológica, pues está relacionada con el tiempo que dura el efecto que cada planeta en el que predomina y otorga sus influencias como causas segundas (la causa primera es Dios) sobre “los imperios, ciudades o cosas semejantes”. Con relación a su duración refiere al capítulo 8 del primer tratado.

Finalmente, el capítulo 17 versa primeramente sobre la entrada de los cuatro tiempos del año, esto es, las estaciones. Comenta que tales tiempos de entrada de cada estación no son los mismos en las zonas templadas (en los que claramente se diferencian entre sí y tienen una continuidad de tres meses) que en regiones de baja latitud, en las que en la práctica no se dan con marcada diferencia y operan más las temporadas de lluvia y de sequía. Describe los intervalos de épocas de lluvia o de verano de la región que habita y los contrasta con los que se observan en España. Añade a esto una explicación de las celebraciones de tipo litúrgico que se efectúan a lo largo del año conocidas como las cuatro temporadas: desviación, renovación, reconciliación y peregrinación. Su origen lo atribuye al papa Calisto para efectos de paliar la alteración de los “cuatro humores” de los seres humanos y por ello ayunar en cada una de ellas por espacio de tres días.

## El “Tratado tercero”

El tema del tratado tercero continua siendo el tiempo, pero con énfasis en la explicación de la reformatión del autor, así como en la presentación de varias tablas de efemérides consistentes en los tiempos de las fases de la Luna (nueva y llena) y eclipses lunisolares a lo largo de un periodo que comprende 62 años. También llaman la atención las tablas de latitudes y longitudes, en particular las que corresponden a poblaciones del territorio del Nuevo Reino de Granada.

Ya visto con algo más de detalle, el capítulo 1 inicia con el recuento de la manera como la iglesia católica estableció la fecha de la Pascua, la cual ha de celebrarse el domingo siguiente a la luna llena después del equinoccio vernal (que se debe verificar el 21 de marzo). El autor escoge, como ya hemos visto, la duración del año trópico de  $365^d 5^h 50^m 0^s$  y muestra que es posible establecer un acoplamiento con el calendario civil algo diferente al que se definió con la reforma gregoriana, de modo tal que cada 144 años sea necesario fijar una “simulación” del bisiesto (es decir, que pudiendo ser tal año divisible por cuatro y en cuyo caso conformado por 366 días, sea un año común de 365 días) para efectos de cuadrar de nuevo el Sol con el punto vernal. El razonamiento de Sánchez de Cozar es este: puesto que la duración del año es de  $365^d 5^h 50^m 0^s = 365,24305555$ , cada cuatro años se acumulan  $0,2430555 \times 4 = 0,972222$  días. Pero eso implica que se va adelantando el año civil del trópico en un valor de  $1 - 0,972222 = 0,02778$ , días, o sea, 40 minutos, cada cuatro años. Ello implica que al cabo de:  $4/0,02778 \approx 144$  años se habrá acumulado un día.

En particular, propone que el año 68 d. C. y a partir de ahí, con intervalos de 144 años, serán años normales de 365 días. De ese modo resultan años con esa misma característica, y antes del año de la corrección (1582), los años: 68, 212, 356, 500, 644, 788, 932, 1076, 1220, 1364, 1508 (ver parte derecha de la tabla de la pág. 60v). Ello hace que existan 11 de esos días. De ahí que el autor insista que en el año de la corrección no se debieron eliminar 10 días con sus letras; en lugar de ese número debieron haberse eliminado 11.

Más adelante el autor contrasta su propuesta con la del calendario gregoriano (y calcula para éste las sobras que se presentan a lo largo de cada cuatro años) y advierte que en ciertos años particulares sea difícil establecer la fecha de la Pascua, dado que el plenilunio de marzo puede ocurrir unas horas antes del 21 de marzo. En particular, muestra el caso para los años de 1704 y 1761. Sánchez de Cozar atribuye esta serie de desfases a la manera como se estableció el calendario gregoriano e insiste en que estas pueden ser superadas si se adopta la duración del año propuesta por él; el hacer “simulación” del bisiesto cada 144 años y fijar la fecha del nacimiento de Cristo en el año 3821 de la creación del mundo.

El propósito del capítulo 2 es explicar con más de detalle el concepto de las epactas, así como dar más argumentos en

favor de su reformatión del calendario. Inicia con una explicación de la diferencia de 11 días existente entre un año solar y doce meses sinódicos y el modo en que era posible conocer la edad de la Luna en el primer día del año con base en el número áureo. Aun cuando el uso exclusivo de este número conlleva a un error en el tiempo para determinar la edad de la Luna, expone la utilidad de ese concepto, bien para haber fijado, según él, el año de nacimiento de Cristo, así como para servir de punto de partida en la determinación de la epacta (con base en el procedimiento de los números radicales que describe Zamorano). Luego comenta la forma de calcular la epacta en el año de la muerte de Cristo (que según Sánchez de Cozar corresponde al año 35 d. C.) y lo mismo hace en cada uno de los cuatro años siguientes a ese.

A continuación pasa a describir una serie de tablas (pág. 87, 87v y 88) que permiten determinar la epacta ajustada a la reformatión del autor (esto es, no considerar bisiestos cada ciertos años separados por 144 años) y las cuales permiten, con el conocimiento del número áureo de un cierto año y los números radicales dados por el pulgar correspondiente, determinar directamente la epacta de ese año. Llama la atención, entonces, que Sánchez de Cozar elabore un número no despreciable de pulgares de la mano izquierda con distintos números radicales, los que hace necesarios para tener en cuenta aquellos años en los que opera la “simulación del bisiesto”.

Posteriormente, y frente a la crítica de “cierto sujeto con presunciones de grande astrólogo” —que debió objetar de cómo un humilde cura en una aislada colonia española llegó a encontrar una solución al problema del calendario, superior a la que llegaron varios sabios europeos en 1582— defiende su posición de dos maneras: la una, señalando la voluntad de Dios de decidir a quién reparte los descubrimientos e invenciones particulares en los “tiempos que ha visto que ha convenido”; la otra forma es continuar con su crítica a la reforma gregoriana señalando lo que a su juicio fueron las omisiones de tales reformadores y reiterando que la duración del año no puede ser otra que  $365^d 5^h 50^m 0^s$ , así como asignar años bisiestos “simulados” cada 144 años a partir del 68 d. C.

El capítulo 3 explica algunos detalles simples de cómo calcular los tiempos de la ocurrencia, tanto la luna nueva como la luna llena que el autor utilizó para construir las tablas de efemérides que están contenidas en el capítulo 5. Presenta dos ejemplos de cómo proceder para el cálculo de la luna nueva: para marzo (el cual él, siguiendo a Zamorano, considera aquí como el primer mes del año) y diciembre de 1681 (un año después de 1680, que fue bisiesto); la luna llena la calcula simplemente contando 15 días después de verificada la fase nueva.

La forma de determinar el ciclo solar, la letra dominical y la indicción para un año en particular se explica en el capítulo 4. Para las dos primeras lo hace con base en el uso de las tablas “perpetuas” contenidas en el capítulo 9 del segundo tratado (ver pág. 59v), una de cuyas columnas (la quinta) reproduce al inicio del capítulo (ver pág. 91v). Ex-

plica el uso de tales columnas con base en el año en el que se desea calcular el ciclo solar y la letra dominical e incluye un ejemplo de su uso. Finiquita el capítulo explicando el ciclo de la indicción, que está conformado por 15 años, y comenta cómo ha de determinarse.

El capítulo 5 contiene una explicación detallada de las tablas de fases lunares —conjunción (luna nueva) y oposición (luna llena)— consignadas de mes a mes y que se muestran al final de dicho capítulo. Las tablas se inician desde el año 1675 y se extienden hasta el año 1736 (ver pág. 96 a 111), en total 62 años. Para cada año se especifica el mes, la fase, el día, la hora y el minuto en que ocurre el fenómeno (en tiempo contado desde el medio día) así como el número de grados de la constelación zodiacal correspondiente y el nombre de esta en el que se verifica el fenómeno (Figura 5).

Año 1697						
Month	Phase	D	h	m	Sign	
Jan	Luna	6	16	25	16	Cancer
Jan	Conj	22	4	53	2	Aquario
	Luna	5	9	53	16	Leo
Feb	Conj	20	14	51	2	Pisces
	Luna	1	3	53	16	Virgo
Mar	Conj	22	4	45	2	Aries
	Luna	5	21	18	16	Libra
Nov	Conj	20	9	34	1	Taurus

**Figura 5:** Parte de la tabla izquierda de la pág. 101v en la que se muestran los instantes (en día, hora y minuto) de las conjunciones y oposiciones de la Luna calculados para la hora local de Vélez así como su posición (en grados) dentro del signo zodiacal en que se verifica el fenómeno. Específicamente se muestran los primeros cuatro meses del año 1697

En la parte inferior de cada tabla anual, se especifican el número áureo, la epacta, el ciclo solar, la indicción, la letra dominical y la fecha de la Pascua de resurrección. Explica la utilización de los datos con un ejemplo (marzo de 1675) y de cómo se ha de proceder para determinar los tiempos contados de medianoche a medianoche, “que es el uso ordinario de la iglesia”. Más adelante explica “el modo de perpetuar dichas 62 tablas siguientes de 62 en 62 años”, de manera que con la información contenida en esas tablas se puedan predecir las demás fechas de esas fases lunares para años posteriores a 1736. Así que establece una serie de modificaciones,

dependiendo de si los años que siguen al cabo del ciclo de 62 son bisiestos, o siguen a un año, o dos o tres de un bisiesto, para fijar los días y los tiempos correctos de tales fases.

El capítulo siguiente, el 6, no es más que una simple extensión del anterior, ya que lo que contempla es hacer explícita las indicaciones ya vistas de cómo realizar una serie de modificaciones para extender el uso de las 62 tablas (de los años 1675 a 1736) y aplicarlas a los años inmediatamente siguientes y con ello hacerlas “perpetuas”. De modo que incluye cuatro tablas adicionales con el mismo formato de las tablas del capítulo 5 pero correspondientes a los años 1737 a 1740.

En el capítulo 7 el lector se entera de que los tiempos de las conjunciones y oposiciones que se hallan contenidos en los dos capítulos previos están referidos al meridiano de referencia de la ciudad de Vélez (municipio del actual departamento de Santander). Así que en el caso de que alguien, ubicado en otro lugar geográfico, desee conocer los tiempos en que ocurren tales fenómenos ha de remitirse a las tablas que el autor consigna al final de ese capítulo en el que se muestran las longitudes en unidades de tiempo (horas y minutos) con la indicación de si el lugar está al este del meridiano de referencia (en cuyo caso utiliza la letra a, que significa añadir ese valor a la hora dada en la tabla) o al oeste (utilizando la letra e, que significa restar). El autor adjunta dos ejemplos que contemplan ambos casos, tanto para un observador situado en Lima (Perú) como en Madrid (España).

Estas tablas (que comprenden las páginas 114 a 115v) presentan los nombres de las ciudades y, frente a ellas, en la primera columna, la respectiva latitud en grados (que el autor denomina “grados de altura de los polos”); la segunda y tercera columnas contienen la longitud en horas y en minutos y la cuarta columna la indicación ya vista de si está ubicada al este o al oeste del meridiano de Vélez. La tabla divide en varios sectores las respectivas ciudades, de manera que diferencia 35 ciudades correspondientes al Nuevo Reino de Granada y tierra firme, aunque Cartagena, Santa Marta y otros accidentes geográficos de la actual Colombia están en el sector correspondiente a “puertos de tierra firme”. El autor consigna un número importante de poblaciones pertenecientes al dominio español, desde México hasta el Perú, incluyendo islas del mar Caribe, de Canarias y numerosas poblaciones de España.

De forma interesante, el capítulo 8 está redactado con una letra un poco más estilizada y adornada, la escritura es nivelada y es evidente que la pluma con que se hizo la escritura es un tanto más fina; a pesar de estos cambios, es indudable que su redactor continúa siendo Sánchez de Cozar. Es posible, como explicación, que este capítulo haya sido redactado en un tiempo significativamente distinto al del resto del documento. Sea como haya sido, el autor explica inicialmente cómo los eclipses se repiten cada 18 años y diez u 11 días, esto es, el ciclo de Saros (aunque no lo menciona con ese nombre). Da una serie de pautas para calcular la fecha de los eclipses, explica el concepto de magnitud de un eclipse

(qué tanto de la superficie de la Luna o del Sol se ven eclipsados) en términos del concepto de dígitos.

Ofrece un ejemplo de cómo se va repitiendo un eclipse de Luna a lo largo de los años: el 11 de enero de 1675, luego el 21 de enero de 1693 y luego el del 2 de febrero de 1711. Alude a 62 tablas de eclipses, con lo que quiere decir que presentará los eclipses a lo largo de 62 años comprendidos entre 1675 a 1736 (el mismo intervalo de tiempo con que presentó las conjunciones y oposiciones de la Luna en el capítulo 7). También ofrece una serie de indicaciones “para que con toda facilidad se puedan ir anotando perpetuamente los eclipses de 62 en 62 años”. Al final de la explicación presenta, iniciando a partir del año 1675, los eclipses de Luna y de Sol (ver pág. 118). En cada caso menciona el día y la hora (tiempo de Vélez), el tipo de eclipse, su magnitud, su duración y a cuántos grados de la constelación zodiacal se presenta el fenómeno. Infortunadamente, el documento en la actualidad finaliza en la pág. 123v, en la que alcanza a incluir los eclipses hasta el año 1700. Puesto que el autor mencionó que incluiría los eclipses hasta el año 1736, se desprende que un buen número de hojas correspondientes a este capítulo se perdieron. Como se recordará, el autor alude a un noveno capítulo en este tratado, el cual, por supuesto, también se perdió.

## Análisis

Varios son los elementos que hay que destacar del contenido del manuscrito y que revelan aspectos de la naturaleza y los conocimientos que llegó a tener Sánchez de Cozar sobre astronomía y cronología. Para el caso probable de que el escrito se constituya en una medida apropiada de la extensión de sus conocimientos, hay que señalar que su erudición astronómica, aunque no era desdeñable, tampoco era profunda. Conocía aspectos fundamentales del modelo geocéntrico, diferenciaba los diferentes movimientos del Sol y de la Luna, y muy posiblemente identificaba los planetas y diferenciaba las constelaciones. Pero hay sutiles anotaciones y omisiones dentro del manuscrito que nos indican que no era propiamente un astrónomo avezado (y él mismo lo reconocía, pág. 25): era más del tipo de la comprensión teórica que de hacer las observaciones nocturnas correspondientes; no existe el registro de un solo nombre de una estrella (a excepción de la polar); tampoco hay algún registro o comentario de que sus predicciones sobre el novilunio y el plenilunio eran correctas o no; y lo mismo puede decirse sobre sus predicciones de los eclipses.

Al parecer los únicos registros observacionales son sus observaciones de los cometas de 1681 y de 1682, de los cuales hablaremos en breve. Al parecer, las limitaciones que tuvo en adquirir un conocimiento más amplio de la astronomía de su tiempo se debió a la carencia de bibliografía más técnica al respecto, ya que sus libros de cabecera no ampliaban lo suficiente en esa materia. En ningún lado se hace alusión a que conociera la existencia del telescopio o algún otro instrumento astronómico salvo al astrolabio (pág. 89)

del que atribuye su invención a Ptolomeo y lo describe como “maravilla poco entendida de muchos”. No puede descartarse que poseyera uno de tales aparatos e incluso, que lo haya utilizado para determinar la latitud geográfica.

En lo que respecta a cronología, Sánchez de Cozar demuestra conocimientos no despreciables. Por un lado, dominaba la problemática surgida al querer acoplar los periodos tanto del año trópico como del mes sinódico conducentes a satisfacer los requerimientos para la determinación de la Pascua de resurrección. También dominaba con fluidez los distintos ciclos que permiten la determinación de dicha fiesta y era muy consciente de la dificultad que entraña establecer las fechas en que ocurrieron ciertos eventos a lo largo de la historia. Se nota que le dedicó grandes esfuerzos a su comprensión y, lo que es más importante, juzgó, aunque equivocadamente, que tenía mucho que aportar en la búsqueda de un correcto calendario para las necesidades de carácter religioso.

Pasamos a continuación a describir varios aspectos notables que, a nuestro juicio, merecen destacarse del contenido del manuscrito.

Primero. Una concepción dinámica de los cielos, enmarcada dentro del modelo geocéntrico, que lo diferencia de los filósofos, teólogos y astrónomos escolásticos que lo han precedido, en el sentido de que ofrece una explicación del movimiento de los cielos de naturaleza sorprendentemente física. Hasta donde se ha podido indagar, la concepción de tal modelo parece ser original de Sánchez de Cozar. El autor no requiere de “inteligencias angélicas” para dotar de movimiento a los cielos ni tampoco del “primer motor” aristotélico (pág. 35). En su lugar propone la existencia del punto céntrico de la gravedad (PCG), el cual es un “punto estable indivisible fundamento de la estabilidad de todo peso igual” el cual se halla “en el medio y semidiámetro de los dos cuerpos tierra y agua el cual es el fundamento de ser la fábrica del mundo redonda y el fundamento del movimiento circular de las esferas” (pág. 13v).

Esto quiere decir que el PCG no solo es responsable del movimiento circular de los cielos si no que también hay que atribuirle la forma circular de los mismos. Una de las razones por las que el Empíreo permanece inmóvil es que toda su estructura está “unidamente de peso natural al punto céntrico de la gravedad”, lo que puede interpretarse como que la esfera que constituye el Empíreo es perfectamente simétrica y que al ser atraída en todas sus partes por el PCG no puede existir mayor atracción en un punto que en otro (pues están a igual distancia) y de ahí su inmovilidad perfecta. En contraste, los planetas, y el cielo estrellado son asimétricos en el sentido de que constan de un nudo en el que está encajado el planeta propiamente dicho (y en el caso del cielo estrellado, el punto de Aries) y, en consecuencia, están “desquiciados”, es decir, se encuentran en una situación de desequilibrio permanente, cada uno con distinta velocidad, debido a la atracción del PCG.

El movimiento de estos planetas es de occidente a orien-



te con respecto al cielo estrellado, esto es, contrario al movimiento de “raptó” (es decir, el movimiento aparente de los cuerpos celestes de oriente a occidente y que es debido a la rotación de la Tierra de occidente a oriente, denominado en el presente como movimiento diurno). Además, el autor propone que las pirámides de los cielos rozan en ocasiones con los cielos inmediatamente anexos (como lo hace el “ñudo” de Aries con el cielo de Saturno), lo que permite una interacción entre ellos que explica por qué ciertos planetas parecen detenerse o retrogradar en su movimiento de occidente a oriente con relación al cielo estrellado; añade un comentario interesante sobre la dinámica relativa entre los cielos: “el pararse de los cielos [...] no es otra cosa que caminar a la par con el estrellado; y el retroceder no es otra cosa que caminar más veloz que [...] al movimiento del raptó” (pág. 29v).

El caso de la justificación de la inmovilidad de la Tierra es más complicado. Sánchez de Cozar admite que la Tierra no es una esfera perfecta, pues frente a la diversidad de valores del radio propuesto por varios autores manifiesta que “todos dicen verdad” y secunda la hipótesis de Juan Pérez de Moya de que la “Tierra está más elevada hacia la región media que por otra”; la consecuencia lógica de esto es que el centro de la Tierra difiere del punto céntrico de la gravedad (pág. 39v). Pero, para no incurrir en contradicciones, sus argumentos para asignar a la Tierra completa inmovilidad son fundamentalmente de autoridad, para lo cual cita dos salmos de David.

La concepción del movimiento de los cielos que propone Sánchez de Cozar sorprende por su originalidad y por estar dotada de cierto tinte de naturaleza física. Aun cuando existe un enorme abismo entre esta concepción y la forma como Isaac Newton construyó la física tal y como la conocemos, no puede uno dejar de preguntarse si el neogranadino llegó a conocer, así fuera de oídas, ciertos aspectos del pensamiento newtoniano. La posibilidad, aunque excesivamente remota, existe, pues la primera edición de los Principios Matemáticos de Filosofía Natural es de 1686, esto es, una década antes de la redacción del documento que nos ocupa.

Segundo. La creación de un nuevo cielo existente entre Mercurio y la Luna (pág. 7v, 15 y 15v). Sánchez de Cozar fue sensiblemente impactado por la aparición del gran cometa de 1680 (el que observó a inicios de 1681), a lo que siguió la aparición de otro “pequeño” en el año de 1682, para los cuales interpretó como augurios en favor del cristianismo ante su lucha contra el Islam. Puesto que se trata del primer registro de la aparición de cometas realizado por un criollo en la Nueva Granada, ampliaremos la información sobre estas observaciones. El impacto de la aparición del primero —“aquel tan espantoso como nunca visto cometa”— fue tan mayúsculo que el sacerdote propuso la existencia de un nuevo cielo al que denominó el incógnito “por no haber sido conocido hasta aquí” (pág. 24v).

El cometa que observó a inicios de 1681 fue el cometa

Kirch, denominado también gran cometa de 1680, cometa de Newton y, modernamente, como C/1660 V1. Este cometa, que fue el primero que se descubrió por telescopio, fue extensamente observado en Europa por renombrados astrónomos y es considerado uno de los más brillantes y notorios de todos cuanto se vieron durante el siglo XVII. Sus elementos orbitales pueden observarse en la tabla 1.

El cometa Kirch, desde su descubrimiento a mediados de noviembre y hasta mediados del mes siguiente, fue observado en la madrugada; al pasar por el perihelio comenzó a observarse al anochecer, es decir, después de ocultarse el Sol. Si bien es cierto que el cometa ya era fácilmente observable hacia el horizonte occidental desde los últimos días de diciembre de 1680, Sánchez de Cozar solo comenzó a observarlo pocos días después: “desde 4 de enero en que se apareció hasta 15 de febrero en que feneció” (pág. 25). Aunque el sacerdote no lo menciona, durante ese tiempo el cometa fue visto atravesando las constelaciones de Pegaso, Andrómeda, Piscis, Triángulo y Perseo.

**Tabla 1.** Elementos orbitales del cometa C/1660 V1 tomados de **Kronk** (1999), pág. 373. Las coordenadas angulares están referidas al equinoccio medio y eclíptica del 2000.0.

Elemento	Valor
Distancia pericéntrica ( $q$ )	0.006222 (u.a.)
Excentricidad ( $e$ )	0.999986
Inclinación ( $i$ )	60.6784°
Longitud del nodo ascendente ( $\Omega$ )	276.6339°
Argumento de lat. del per. ( $\omega$ )	350.6128°
Tiempo del paso por el per. ( $t_0$ )	18.4876 dic. 1680

Sánchez de Cozar, como ya dijimos, y con base en la observación de este cometa, propone la existencia de un cielo adicional entre Mercurio y la Luna. Dos son las razones para llegar a esa conclusión: la primera es que vio “pasar la Luna por debajo de él, por dos veces (precediéndole Mercurio)” y la segunda, por su velocidad con respecto a las estrellas, la cual estimó, como veremos más adelante. En relación con la primera razón, e independiente del raciocinio que le condujo a pensar que la Luna cruzó por debajo de la cola del cometa, una simulación del cielo para esas fechas (realizada con el programa Voyager 4 de la empresa Carina Software) permite establecer que, si vio la Luna cruzar por la cola del cometa, debió ser unos pocos días en que la Luna se ubicaba más al este que el mismo cometa, lo cual es factible, dado los reportes que asignaron una extensión de la cola comprendida entre unos 60-70° de longitud (**Kronk** (1999)); si ese fue el caso, solo pudo observar el cruce en una ocasión, lo cual posiblemente ocurrió a finales del mes de enero. Es de advertir que para el tiempo que observó el cometa, éste se desplazó paralelamente a la eclíptica y en la dirección en que se desplazan los planetas: de occidente a oriente.

Resulta interesante que Sánchez de Cozar estimó la tasa diaria de desplazamiento del cometa:  $1^\circ 12'$ . Con eso parece no advertir que el movimiento del cometa a través del cielo no es constante: en los primeros días de enero era cercano a los  $4^\circ$ ; solo hasta finales de ese mes cayó a los niveles que él anotó. Con esa estimación calcula el periodo asumiendo que el objeto es periódico y obtiene:  $360^\circ / 1^\circ 12' = 300$  días. Este es, pues, el valor que asigna como periodo al cielo “incógnito” (pág. 36). Nótese que tal valor es intermedio al del Sol y el de la Luna, pues recuérdese que para Sánchez de Cozar (como para Zamorano) el periodo de Mercurio es igual al del Sol.

El cometa “pequeño” que Sánchez de Cozar dice haber observado en el año de 1682 fue el cometa Halley (1P/1682 Q1). Su aparición en esa ocasión no fue tan notoria, pues apenas le dedicó un fugaz comentario: “se nos apareció [...] en forma de cetro en el signo de Acuario del estrellado” (pág. 25). Los elementos orbitales correspondientes a ese paso del Halley están contenidos en la tabla 2.

**Tabla 2.** Elementos orbitales del cometa 1P/1682 Q1(Halley) tomados de Yeomans (1977). Las coordenadas angulares están referidas al equinoccio medio y eclíptica de 1950.0.

Elemento	Valor
Distancia pericéntrica ( $q$ )	0.582608 (u.a.)
Excentricidad ( $e$ )	0.967923
Inclinación ( $i$ )	$162.2657^\circ$
Longitud del nodo ascendente ( $\Omega$ )	$54.8522^\circ$
Argumento de lat. del per. ( $\omega$ )	$109.2054^\circ$
Tiempo del paso por el per. ( $t_0$ )	15.2807 sep. 1682

Una simulación de la aparición del cometa Halley en ese año permite verificar que comenzó a ser visto a finales del mes de agosto en horas de la madrugada, lo que es coherente con lo consignado por Kronk (1999). En esos días el cometa se desplazó a través de las constelaciones del Lince y Leo Menor; a principios de septiembre ya era visible al atardecer y se movió a través de las constelaciones de Cabellera de Berenice, Virgo y Libra, donde desapareció a finales de la tercera semana de septiembre. En esta visita la visibilidad de este célebre cometa periódico fue muy discreta. Pero no se entiende por qué Sánchez de Cozar escribió que lo vio en Acuario, a menos que lo haya confundido con el cometa de Kirck que, en los primeros días de enero, como ya dijimos, se desplazó por Pegaso, que está próximo a Acuario. La memoria pudo haberle jugado una mala pasada, pues al momento de redactar esas líneas ya habían pasado unos tres lustros desde la aparición de tales cometas.

Debido a la pérdida de varias hojas al final del tercer tratado, en el cual Sánchez de Cozar incluyó un capítulo sobre los cometas, no nos es posible tener un conocimiento más acertado de lo que él opinaba sobre estos fenómenos

celestes. Pero es evidente que, a diferencia de la postura escolástica, los ubicaba más allá del cielo de la Luna, esto es, como planetas propiamente dichos; pero no es claro si él era consciente de la variabilidad no solo del brillo sino de la longitud o dirección de la cola de los cometas. Sin embargo, hay que reconocer que si bien adjudica a los cielos la propiedad de “incorruptibilidad”, la palabra “inmutabilidad” o alguno de sus sinónimos no aparece explícitamente en el escrito, por lo que es factible que admitiera algún tipo de cambio en los cielos. De hecho, implícitamente lo asume, pues afirmó que “y es sin duda haber sido nunca visto este cometa del cielo incógnito, pues juzgo no se hallará autor de esta ciencia por antiguo que sea que dé razón de haber sido visto”, de lo que se infiere que necesariamente debe asumir la existencia del cambio de los cielos, esta vez, con la aparición de un objeto nunca antes observado que está entre Mercurio y la Luna.

Es apenas evidente que la introducción del cielo “incógnito” no es muy coherente y genera toda una serie de preguntas sobre la consistencia de la propuesta: ¿Es el incógnito un repositorio de cometas o lugar de uno solo? Si es lo segundo, ¿por qué no surge el cometa aproximadamente cada 300 días? Como es evidente que ello no ocurre, ¿qué mecanismo propone para que el incógnito solo se manifieste en determinadas circunstancias? Al margen de los vacíos e incoherencias de la propuesta, lo meritorio del autor es arriesgarse a proponer una hipótesis. Si los antiguos aventuraron la existencia de toda una serie de cielos, algunos de los cuales él considera innecesarios, ¿qué impide que él proponga uno de su propia factura?

Tercero. Cronología y reforma del calendario. Un aspecto llamativo del autor consiste en asegurar que el calendario gregoriano adolece de deficiencias y que es susceptible de mejorarse, no solo para satisfacer efectivamente lo establecido por el concilio de Nicea, para efectos de celebrar en la fecha precisa la Pascua de resurrección, sino además lograr una debida coherencia cronológica con los sucesos relatados en la Biblia. En particular, y a lo largo del manuscrito (pág. 11, 55, 62, 62v, 68v, 72, 79v, 84 y 84v), hace énfasis en el evento “milagroso” ocurrido al momento de la muerte de Cristo cuando, de acuerdo con lo relatado por el evangelista Lucas (23: 44-45), se verificó un oscurecimiento del Sol que duró tres horas sobre toda la Tierra. Esto comúnmente se ha interpretado como la observación de un eclipse de Sol. Sánchez de Cozar también cita a Dionisio el Aeropagita, quien en su libro “De los nombres divinos”, en la epístola VII, asegura haber sido testigo de ese eclipse.

Sánchez de Cozar considera verdad inamovible el suceso de tal eclipse, aunque es uno ciertamente anormal, pues sabe bien que un eclipse total de Sol no puede tener una duración tan elevada ni que se pueda verificar a lo largo y ancho del planeta. En todo caso, tal tipo de eclipse solo puede presentarse, como es apenas evidente, en la conjunción de la Luna con el Sol. Pero aquí hay un problema, pues si Cristo murió al día siguiente de conmemorarse la Pascua judía, la que se supone se verifica en luna llena, esto es, en plenilu-

nio, la Luna no pudo ser ocultada por el Sol al momento de la muerte de Cristo, a menos que haya habido una intervención divina que haya desplazado la Luna casi ciento setenta grados de su posición. Por supuesto, Sánchez de Cozar no duda de que haya sido así, por lo que considera que es indispensable tener en cuenta en los cálculos cronológicos ese desplazamiento milagroso de la Luna, pues ciclos como el del número áureo y la epacta lógicamente han de ser modificados a partir de tal evento.

De modo que el sacerdote debió escoger como fecha de muerte de Cristo el año 3855 después de la creación del mundo porque la epacta de tal año es igual a 4, lo que permite tener para el 25 de marzo (es decir, en la muerte de Cristo) luna nueva y la letra dominical corresponde a la letra B. Fijado esto, y como la tradición cristiana sostiene que Cristo vivió 33 años, determina como fecha de nacimiento de este el año 3821 después de la creación del mundo (que en la escala de tiempo que operamos corresponde, por supuesto, al año 1 d. C.), año cuya letra dominical es la letra B, por lo que el 25 de diciembre cae en domingo.

De igual forma, Sánchez de Cozar, por razones que no son del todo claras, fija como duración del año medio unos 44 segundos más largo que la duración del año adoptada por los asesores de Gregorio XIII. Recordemos que el valor del año trópico es de  $365^d05^h48^m45.19^s$  (Seidelmann, 1992), esto es, 31 segundos más corto que la duración del año que adoptó Gregorio XIII y 75 segundos más corto que el que adoptó Sánchez de Cozar. No hay nada que sugiera que el mismo sacerdote haya medido dicha duración; más bien lo hace con el propósito de asegurar cierta coherencia cronológica de lo relatado en la Biblia. La adopción de esa duración, como vimos, ocasiona que el calendario civil adelante en un día al año trópico cada 144 años, lo que explica su propuesta de hacer que cada vez que se llegue a este número de años se establezca un año normal de 365 días aunque sea divisible por 4 (“simular un bisiesto”).

El propósito del sacerdote es asegurar la coherencia de los datos cronológicos referidos en la Biblia, fijar de una vez por todas la fecha de nacimiento de Cristo y, de paso, establecer unas normas que permitan fijar de forma correcta la fecha de la Pascua cristiana tal y como se estableció en el concilio de Nicea. Sánchez de Cozar critica la reforma gregoriana en el sentido de eliminar 3 días cada 400 años para que el calendario civil no se adelante en ese tiempo con respecto al año trópico; en su lugar propone, como ya hemos visto varias veces, que cada 144 años se establezcan años comunes de 365 días aunque sean divisibles por 4; algunos de esos años son, a partir del siglo XVIII y con respecto a la era cristiana: 1796, 1940, 2084, 2228, etc. También critica que la reforma gregoriana haya eliminado 10 días del mes de octubre de 1582; el sacerdote considera que debieron haberse eliminado 11 días, y no en el mes de octubre sino en el mes de marzo (ver pág. 79v). Juzga entonces que al año de 1582 debió asignársele por letra dominical D y no C (antes de la reforma le correspondía la G). Esto explica por qué las letras

dominicales que se muestran, por ejemplo, en la tabla de la pág. 60v y las que existen en la parte inferior de las tablas de fases lunares, no sean iguales a las que se utilizan formalmente, lo que implica que en su reforma al calendario, por poner por caso, el 1 de enero de 1696, que cayó en domingo, para Sánchez de Cozar cayó un viernes.

Cuarto. Predicción de fases lunares y eclipses. Hasta donde sabemos, Sánchez de Cozar, es la primera persona existente en el Nuevo Reino de Granada que calculó efemérides astronómicas. Y no solo eso: lo hizo con relación a la hora local de una población del nuevo mundo (Vélez). El manuscrito contiene predicciones de los tiempos en que ocurren la luna llena y la luna nueva entre los años comprendidos entre 1675 y 1740; así mismo, establece en qué punto de la esfera celeste ocurre el fenómeno, pues indica el signo zodiacal y el número de grados dentro de él.

Otro tanto se puede decir con relación a las predicciones de eclipses de Luna y de Sol. También calculó los tiempos locales de los eclipses comprendidos entre 1675 y 1736 aunque, como ya se dijo, en la actualidad el manuscrito solo contiene los eclipses hasta el año de 1700.

Si bien es cierto que la forma empleada por Sánchez de Cozar para mostrar los tiempos de las fases lunares así como los eclipses lunisolares tienen virtualmente idéntica presentación y descripción a como aparecen en el libro de Zamorano, el primero no pudo copiarlas del segundo por una sencilla razón: la edición de 1594 que, presumiblemente, fue la que consultó el sacerdote, contiene las fases de la Luna entre 1594 y 1654 y eclipses lunares entre 1584 y 1606. Igualmente, la edición de 1621 del libro de Zamorano contiene las fases de la Luna comprendidas solo entre 1620 y 1654 y eclipses lunares entre 1620 y 1630. La consecuencia de esto es que Sánchez de Cozar debió calcular los plenilunios, novilunios y eclipses lunisolares y, por supuesto, debió constituirse en una tarea que le demandó bastante tiempo y esfuerzo.

Quinto. Geografía neogranadina. Como ya se dijo, en el capítulo 7 del Tercer Tratado Sánchez de Cozar presenta varias tablas con valores de latitudes y longitudes (en tiempo) de numerosas poblaciones de España y sus colonias. Al comparar estos valores con los existentes en el capítulo 63 del libro de Zamorano (Zamorano, 1594) se evidencia que el sacerdote, en su gran mayoría, los tomó de allí, advirtiendo que los valores de longitud están referidos a la población de Vélez y no a Sevilla, que es como lo referencia el español. Sin embargo, hay diferencias. La principal es que Sánchez de Cozar construye una tabla adicional titulada “Nuevo Reino de Granada y Tierra Firme” inexistente en el libro de Zamorano (Figura 6). La tabla que elabora el sacerdote muestra la latitud y longitud de 35 poblaciones y lugares geográficos del interior del Virreinato de la Nueva Granada (las ciudades costeras colombianas como Cartagena y Santa Marta están en otra tabla que tituló “Puertos de Tierra Firme”, tal y como lo hizo Zamorano).

En la obra de este último, las poblaciones de Bogotá,

Cali, Panamá, Popayán, San Juan, Timaná y Villaviciosa aparecen haciendo parte de una tabla que lleva por título “Pueblos de la mar del Sur y del Piru”. En la tabla de Sánchez de Cozar sobre las poblaciones del Nuevo Reino de Granada incluye, aparte de las siete que incluye Zamorano, otras 28; la mayoría son poblaciones de fácil identificación, tales como (por citar algunas): Vélez, Buga, Muzo, Mariquita, Mérida, Pamplona, Anserma, Girón, Sogamoso, Tocaima, Villa de Leiva y San Gil; otras, por el contrario, no lo son tanto como Palma, San Francisco de la Concha y Trujillo.

	Gr	h	m
Belén →	6	0	0
Bogotá	3	0	5
Buga	4	0	5
Cali	4	0	4
Caloto	6	0	18
Guata	5	0	10
Gibraltar	2	0	39
Muzo	6	0	5
Moncora	8	0	4
Mariquita	3	0	13

Figura 6: Parte de la tabla izquierda de la pág. 114, en la que consigna la posición geográfica de varias poblaciones del Nuevo Reino de Granada.

Sánchez de Cozar, como Zamorano, expresa las latitudes solo en grados (en número entero) y la longitud en unidades de tiempo (en horas y minutos). Para determinar las longitudes de las poblaciones respecto a Vélez ( $\lambda$ ) con base en la longitud dada por Zamorano ( $\lambda_Z$ ) utilizó la expresión:  $\lambda = \lambda_Z - 4^h47^m$ , donde este último valor representa la longitud de Vélez con respecto a Sevilla (el valor correcto es  $4^h31^m$  hacia el oeste). Si  $\lambda > 0$ , la longitud es hacia el oeste de Vélez, que Sánchez de Cozar especifica con la letra e; si  $\lambda < 0$ , la longitud es hacia el este, lo que especifica con la letra a.

Si bien es cierto que la mayoría de los valores que Sánchez de Cozar registró son idénticos (o pueden inferirse directamente, como las longitudes) a los que aparecen en el libro de Zamorano hay, sin embargo, algunas diferencias. Puede verse que modificó en una unidad (bien arriba o hacia abajo) las latitudes de Bogotá, Popayán y Cartagena; de igual forma aparecen algunas diferencias en las longitudes de Popayán y Villaviciosa. Casi todos esos cambios apuntan hacia los valores correctos; sin embargo, no se conoce la fuente que Sánchez de Cozar utilizó para modificar algunos de los valores de las coordenadas y, más significativo aun, aquellos valores de latitudes y longitudes de las restantes 28 poblaciones que no aparecen en el libro de Zamorano. No se descarta que haya utilizado distintas fuentes y alternativas para hacerlo, como, por ejemplo, haber interpolado las coordenadas a partir de un mapa. Una posibilidad, algo remota, es que él mismo haya derivado varias, en particular las cercanas a su lugar de residencia, tales como Girón, San Gil, Villa de Leyva, Valle del Santo Ecce Homo y Tunja, las que pudo determinar o bien astronómicamente o con base en el conocimiento algo aproximado de la distancia topográfica entre ellas.

Dejando a un lado los errores en los que Sánchez de Cozar incurrió en la asignación de esas coordenadas, ciertamente excusables, hasta donde sabemos la tabla en referencia se constituye en la más antigua información relacionada del conocimiento geográfico de la nación realizado por un criollo; que los haya derivado de un mapa o los haya obtenido de la observación astronómica es algo que está por verse. Pero su intención de establecer una ciudad neogranadina como referencia para las longitudes de las demás poblaciones del planeta, aunado a su deseo de que el libro fuera publicado por el Rey de España y, en consecuencia, conocido por el mundo, manifiesta un anhelo de empoderamiento y posicionamiento de la nación en la que vive, intención que antecede por más de un siglo a la que hizo Francisco José de Caldas en su adecuación y elaboración de mapas con referencia o bien a Cartagena de Indias o a Santafé de Bogotá (Portilla (2019)).

Sexto. Descripción del clima en la zona que habita. Como se vio en el capítulo 17 del segundo tratado, Sánchez de Cozar contrasta los intervalos en los que se verifican las épocas de lluvia y de verano aquí en el trópico con lo que sucede en España. El sacerdote escribe: “porque el tiempo que en toda España se dice verano por caliente y húmedo [...] (comenzando desde 21 de marzo) le decimos nosotros invierno por muy lluvioso, cual nos comienza desde 22 de febrero con los mismos efectos de reverdecir las plantas”. Con relación al verano (estío) y el otoño, señala: “casi no difieren en sus efectos aunque difieren en sus entradas: pues entrando el estío en España a 21 de junio y el otoño a 21 de septiembre, entran en estas partes a 24 de mayo ya 24 de agosto. Y el invierno que en España entra a 21 de diciembre difiere en el temperamento y en la entrada más no en los efectos: porque si en España pela y deshoja las plantas por

frío y húmedo y de muchas aguas, acá hace lo mismo por caliente y seco y de muchos soles, desde 23 de noviembre hasta 21 de febrero”. Sin embargo, advierte que tales intervalos no se siguen estrictamente, “pues en unos años se anticipan y en otros se posponen y en otros no hay más de un verano y un invierno”. Esta descripción del clima a lo largo del año es la primera, hasta donde sabemos, que hace un criollo de una región específica de la Nueva Granada.

## Conclusiones

El tratado de astronomía del sacerdote Sánchez de Cozar se constituye en un documento de extrema valía, cuya importancia en la historia del pensamiento en el país no se corresponde con la casi total indiferencia de la que ha sido objeto por parte de historiadores y astrónomos colombianos a partir de mediados del siglo XIX, cuando fue rescatado del olvido y dado a conocer fundamentalmente como obra literaria. La simple iniciativa de un habitante de Soatá, junto con el patriotismo de Vergara & Vergara, que aseguró la conservación del manuscrito —y de documentos de otros autores— se constituyeron en algunos de los eventos que impidieron que el extenuante trabajo de un desconocido y humilde sacerdote descendiente de indígenas pasara al olvido. Por supuesto, el hecho de que Sánchez de Cozar hubiese redactado varias versiones de su manuscrito (ignoramos si realizó otras con posterioridad a 1696) aumentó la posibilidad de que alguna de ellas se conservara, lo que no ocurrió con numerosos otros escritos del periodo de la conquista y la colonia que el mismo Vergara & Vergara refiere y que atribuye al “total desamor por los estudios históricos de la patria”, dando a entender que casi fuera política de estado ejercer hostilidad hacia el “estudio y fomento de nuestra historia” (Vergara & Vergara (1867), pág. xviii).

Aparte del hecho fortuito de que la obra de Sánchez de Cozar haya sobrevivido hasta nosotros y permitido, a través de ella, saber de la existencia de este sacerdote amante del saber, inquieto, persistente, dispuesto a proponer ideas distintas a las de otras corrientes más conformistas, es apenas justo afirmar que éste merece ser etiquetado como el primer pensador original que surgió en el Nuevo Reino de Granada y se adelantó en más de un siglo a Caldas en la redacción de las primeras efemérides astronómicas referidas a una población local. De hecho, la originalidad de pensamiento de Sánchez de Cozar —dejando a un lado su geocentrismo y escolasticismo— al proponer una explicación dinámica de los cielos, un nuevo cielo entre la Luna y Mercurio y una propuesta alternativa de reforma al calendario, señalan a alguien mucho más arriesgado en la innovación y la propuesta y más concentrado en la continuidad de su trabajo de lo que alguna vez llegó a ser el abogado payanés, para quien la astronomía no pasó de ser una mera herramienta subsidiaria de la geografía.

El manuscrito en cuestión es, pues, una muestra del trabajo y pensamiento independiente de un sacerdote neogranadino quien, en medio de las privaciones y obliga-

ciones propias de su cargo, estaba convencido de su capacidad y originalidad de pensamiento, seguro de que podía ofrecer ideas alternativas al mundo, pues juzgaba su obra lo suficientemente coherente y original como para ser mandada a imprimir por el Rey de España y leída por el Papa. Jamás sobremos cuánto tiempo esperó una respuesta o si murió ansiosamente esperándola. Pero confiemos que la región geográfica en la que nació sepa por fin reconocer sus dotes y esfuerzos para que su obra “no padezca las cavernas del olvido” (pág. 8v).

## Agradecimientos

Los autores agradecen a las parroquias de las poblaciones de Vélez y El Socorro (Santander) por facilitar la búsqueda de información en sus respectivos archivos para la elaboración de este trabajo. Igualmente, agradecen a varios funcionarios de la Biblioteca Nacional que permitieron el acceso para consultar en físico el manuscrito en cuestión. Por último, agradecen los comentarios del profesor Eduardo Brieva y de un árbitro anónimo que permitieron mejorar la redacción del artículo.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias

- De Pineda J.** (1589). Primera parte de los treinta y cinco diálogos familiares de la agricultura cristiana, Imprenta de la casa de Pedro de Adursa y Diego López, Salamanca.
- Del Rey J., Marquínez G.** (2004). Breve tratado del cielo y los astros del M. Javeriano Mateo Mimbela (1663-1736), Pontificia Universidad Javeriana, Archivo Histórico Javeriano, Bogotá.
- Kronk G.** (1999). *Cometography: A Catalog of Comets* (Vol. 1: ancient-1799), Cambridge University Press, Cambridge.
- Marquínez G., Del Rey J.** (2005). Física especial y curiosa del maestro javeriano Francisco Javier Trías (1755), Pontificia Universidad Javeriana, Archivo Histórico Javeriano, Bogotá.
- Marti J.** (1991). Obras completas, volumen 21, cuadernos de apuntes, Editorial de ciencias sociales, La Habana.
- Moreno F., Portilla J. G. & Zitzmann E.** (2018). El Astrolabio. **17:** 60-74.
- Pinzón R.** (1993). Cuadernos de filosofía latinoamericana, **54-55:** 155-167.
- Portilla J. G.** (2019). La astronomía en Francisco José de Caldas, en impresión.
- Seidelmann K.** (1992). Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac, University Science Books, Mill Valley.
- Vergara y Vergara J. M.** (1867). Historia de la literatura en Nueva Granada, Imprenta de Echavarría hermanos, Bogotá.
- Yeomans D. K.** (1977). The Astronomical Journal, **82:** 435-440.
- Zamorano R.** (1594). Cronología y repertorio de la razón de los tiempos, Imprenta de Rodrigo Cabrera, Sevilla.

# Electronic and electrochemical properties of a grid-like structure of Zn(II)

Juan D. Villada, Juliana Loaiza, Manuel N. Chaur\*

Grupo SIMERQO, Departamento de Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia

## Abstract

A novel and highly soluble bis(hydrazone) was synthesized and characterized by different spectroscopic means. This compound was used as a ditopic ligand for the self-assembly of a grid-like complex using  $Zn^{2+}$  as metal cation. The structure of this compound was fully confirmed by NMR (1D and 2D). The electronic and electrochemical properties were studied using cyclic voltammetry, Osteryoung square wave voltammetry, and UV-Vis spectroscopy. The present work highlights the use of NMR spectroscopy as a tool to describe and analyse the formation of grid-like complexes based on the rotation of the phenyl group attached to the pyrimidine ring. Furthermore, the electrochemical results showed that the bis(hydrazone) 3 exhibits several different redox processes that are affected by the interaction with the metal cation as observed for the grid-like complex. Although the electrochemical processes are all irreversible, this article aims to be an initial study in the search for supramolecular complexes that can be used as electrochemical switches. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Bis(hydrazones); Metallogrids; Supramolecular chemistry; Coordination chemistry.

## Propiedades electrónicas y electroquímicas de una estructura del tipo de Zn(II)

### Resumen

Una nueva bis(hidrazona), altamente soluble en solventes orgánicos comunes, se sintetizó y caracterizó mediante diversas técnicas espectroscópicas. El compuesto se utilizó como ligando ditópico en la construcción de estructuras supramoleculares de tipo rejilla (rejillas supramoleculares o complejos metálicos de tipo rejilla) utilizando  $Zn^{2+}$  como catión metálico. El complejo supramolecular se confirmó mediante resonancia magnética nuclear RMN- $^1H$  y bidimensional. El arreglo de tipo rejilla se determinó mediante las señales de RMN- $^1H$  del anillo fenilo del ligando orgánico que cambia su velocidad de rotación y, por ende, su ambiente químico al coordinarse en dicho arreglo. Por último, se realizaron estudios de UV-Vis y voltamperometría cíclica y de onda cuadrada, con el fin de determinar las propiedades optoelectrónicas y electroquímicas de estos compuestos. Tanto la bis(hidrazona) como el complejo de tipo rejilla aquí presentados, exhiben varios potenciales de oxidación-reducción, los cuales se estudiaron en detalle mediante las técnicas mencionadas y cuyo estudio sirve de base para el desarrollo futuro de estructuras supramoleculares que puedan utilizarse como interruptores moleculares electroquímicos. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Bis(hidrazona); Rejillas supramoleculares; Química supramolecular; Química de coordinación.

## Introduction

The miniaturization of functional materials used in different technological devices has been based on different “top-down” approaches. The findings in this field of research have resulted in the technological boom we now live in. However, given the imminent impossibility to obtain smaller materials, which would hinder technological development, several new approaches have started to gain attention in the scientific community. Based on the self-assembly of well-defined molecular pieces via covalent and non-covalent interactions (Lehn, 2006), supramolecular chemistry has attracted a lot of interest since its definition by Jean-Marie Lehn (Lehn, 1988) and has resulted in the construction of

several functional materials, an evolution that reached its climax when the chemistry Nobel prize was awarded in 2016 to Sir Fraser Stoddard, Ben Feringa, and Jean-Pierre Sauvage for their work in “the design and synthesis of molecular machines” (Nobelprize.org, 2016).

The study of the self-assembly of different compounds has resulted in complex and well-defined structures such as catenanes (Wasserman, 1960), molecular knots (Dietrich-Buchecker & Sauvage, 1989), macrocycles (Busch, 1967;

### \*Corresponding autor:

Manuel N. Chaur; [manuel.chaur@correounivalle.edu.co](mailto:manuel.chaur@correounivalle.edu.co)

Received: December 27, 2018

Accepted: May 29, 2019

Editor: Luis Fernando Echeverri

Curtis, 1960), and metalloids (Hanan, *et al.*, 1997; Ruben, *et al.*, 2004). In this regard, grid-like metal ion arrays have gained an important place because of their well-defined structure and their interesting physical properties. Nowadays, there are several examples of the highly rich chemical properties of these compounds among which we can mention complexes that show spin crossover behavior (Breuning, *et al.*, 2000; Shen, *et al.*, 2016; Wu, *et al.*, 2014), antiferromagnetic properties (Biswas, *et al.*, 2014; Parween, *et al.*, 2017), and magnetic coupling (Thompson, *et al.*, 2005), multiple redox states (Ruben, *et al.*, 2000; Uppadine, *et al.*, 2005), and pH-dependent electronic properties (Ruben, *et al.*, 2003). All of these, combined with the well-positioned metal ions in the organic matrix, make metalloids a potential part of future memory devices, logic operators or write and read devices (Alam, *et al.*, 2005).

The design of this grid-like supramolecular arrays by self-assembly requires the synthesis of ligands with the necessary information to arrange the metal cations (on a plane) in a square-like arrangement (Dawe, *et al.*, 2009; Dawe & Thompson, 2008; Harrowfield & Lehn, 2012). Early examples of metallic grids employed different bidentate and tridentate ligands based on bi(pyridines) (Youinou, *et al.*, 1992) and terpyridines (García, *et al.*, 1999). However, due to their cumbersome synthesis and low yields, several groups shifted toward ligands with the core pyridine-pyrimidine-pyridine connected by hydrazone moieties (-C=N-N-) (Ruben, *et al.*, 2003).

Bis(hydrazone)s have allowed the synthesis of different grid-like structures with a wide range of metal cations (Hardy, 2013; Stefankiewicz, *et al.*, 2009). However, the solubility of these ligands tends to be low, affecting the grid formation and the yields of the final product. To solve this problem, recently, several bis(hydrazone)s bearing alkyl groups have been reported, which increase the solubility of the ligand (and its complexes) in several organic solvents (for instance, chloroform, acetone, dimethylformamide, tetrahydrofuran, among others) (Carmona-Vargas, *et al.*, 2017; Chaur-Valencia, *et al.*, 2018) allowing full characterization in solutions. In this regard, herein we report the synthesis of a new bis(hydrazone) ligand with an orthophenylbutane substituent highly soluble in different common organic solvents. Spectroscopy characterization and its use in the synthesis of grid-like complexes using  $Zn^{2+}$  as metal cation is reported as well. We also render the full electrochemical characterization of the free ligand and the grid complex and a full NMR characterization of the complex. Our purpose was to increase the knowledge on this bis(hydrazone) ligands and their performance in the preparation of grid complexes.

## Experiments

**Materials and physical methods.** All starting materials and solvents were purchased from Sigma-Aldrich® and used without further purification. The NMR (1D and 2D experiments), UV-Vis, fluorescence spectra, and elemental

analysis were recorded on an NMR 400 MHz Bruker UltraShield™, a Pharma Spec Shimadzu JASCO V-730 UV-VIS spectrophotometer, a JASCO FP-8500 spectrofluorimeter, and a Thermo flashEA #1112 series instrument with a CHN analyzer, respectively.

**Synthesis of bis(hydrazone) (3) and  $Zn^{2+}$  metalloids.** 2-(4-butylphenyl)-4,6-dihydrazinylpyrimidine (2). 101.2 mg of 2-(4-butylphenyl)-4,6-dichloropyrimidine (1) (0.36 mmol  $^1H$ -NMR on figure S1, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3773>) were mixed with an excess of monohydrated hydrazine (1.0 mL, 20.6 mmol) and refluxed for 6 hours under an inert atmosphere. Afterward, the excess of monohydrated hydrazine was removed from the desired product by reduced pressure. Compound (2) was obtained as a white powder with a 96% yield.  $^1H$ -NMR (400 MHz,  $DMSO-d_6$ )  $\delta$ /ppm: 8.18 (2H, d,  $J=8$  Hz, H8), 7.55 (2H, s, H15) 7.24 (2H, d,  $J=12$  Hz, H9), 5.98 (1H, s, H5), 3.18 (4H, s, H16), 2.64 (2H, t, H11), 1.62-1.54 (2H, q, H12), 1.37-1.28 (2H, m, H13), 0.93-0.89 (3H, t, H14) (see Figures S2, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3774>).  $^{13}C$ -NMR (101 MHz,  $DMSO-d_6$ )  $\delta$ /ppm: 128.2, 128.0, 35.2, 33.5, 22.3, 14.3 (see Figure S3, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3884> and S4, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3885>).

2-(4-butylphenyl)-4,6-bis((E)-2-(pyridin-2-ylmethylene)hydrazinyl) pyrimidine (3). 90.6 mg of compound 2 (0.333mmol) were added to 4 mL ethanolic solution of 2-pyridincarboxaldehyde (0.07mL 0.736mmol) and the resulting solution was mixed under reflux for 8 hours. Then, the crude was concentrated using rotatory evaporation. The desired product 3 was obtained by precipitation using cold acetonitrile, filtered and recrystallized in ethanol with a 78% yield. M.p. 241-242 °C.  $^1H$ -NMR (400 MHz,  $CDCl_3$ ),  $\delta$ /ppm: 8.97 (2H, s, H15), 8.66-8.65 (2H, d,  $J=1$  Hz, H22), 8.27-8.24 (2H, d,  $J=8$  Hz, H8), 8.13-8.11 (2H, d,  $J=8$  Hz, H19), 7.96 (2H, s, H17), 7.83-7.79 (2H, t, H20), 7.32-7.29 (4H, H9-H21), 7.14 (1H, s, H5), 2.70-2.66 (2H, t, H11), 1.67-1.59 (2H, q, H12), 1.43-1.33 (2H, m, H13), 0.97-0.93 (3H, t, H14) (Figure S2, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3774>).  $^{13}C$ -NMR (101 MHz,  $CDCl_3$ ),  $\delta$ /ppm: 149.5, 142.3, 136.4, 128.6, 127.9, 123.6, 120.4 (Figure S5, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3886>; and S6, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3887>). Elemental analysis for  $C_{26}H_{26}N_8 \cdot CH_3CN$ ; calculated percentage (%): C 68.41; H 5.95; N 25.64; percentage (%) found: C 68.43; H 5.68; N 23.86.

Metalloids  $[Zn_4(3)_4] \cdot (BF_4)_8$ . 20.8 mg (0.046mmol) of ligand 3 were added to a 5 mL round flask with 2.0 mL of MeCN under stirring. Then, a solution of  $Zn(BF_4)_2 \cdot 7H_2O$  (16.9 mg in 2mL of MeCN) was added dropwise to the stirring solution. After 24 hours, the initial suspension turned into a yellow solution. The complex was precipitated by the slow

addition of diethylether and filtered for a 90% yield. M.p.: >293 °C. <sup>1</sup>H-NMR (400 MHz, MeCN-d<sub>3</sub>), δ/ppm: 7.88-7.84 (2H, t), 7.77 (2H,s), 7.73-7.72 (2H, d, J=4 Hz), 7.56-7.54 (2H, d, J=8 Hz), 7.38 (1H, s), 7.26-7.23 (2H, t), 6.91 (1H, s), 6.48 (1H, s), 6.30 (1H, s), 5.44 (1H, s), 3.14-3.09 (2H, t), 2.07-1.99 (2H, q), 1.85-1.77 (2H, m), 1.31-1.28 (3H, t) (Figures S7, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3888>; S8, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3889>; and S9, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3890>). <sup>13</sup>C-NMR (101 MHz, CD<sub>3</sub>CN), δ/ppm: 149.5, 142.3, 136.4, 128.6, 128.4, 127.9, 127.2, 123.6, 120.4. Elemental analysis: Calculated percentage (%) for the molecular formula C<sub>104</sub>H<sub>138</sub>N<sub>32</sub>B<sub>8</sub>F<sub>32</sub>O<sub>17</sub>Zn<sub>4</sub> ([Zn<sub>4</sub>(3)<sub>4</sub>](BF<sub>4</sub>)<sub>8</sub>·17(H<sub>2</sub>O)): C 40.76; H 4.54; N 14.63; percentage (%) found: C 40.41; H 4.37; N 14.79.

**Electrochemical experiments.** Osteryoung Square Wave Voltammetry (OSWV) and Cyclic Voltammetry (CV) were recorded on dry dimethylformamide (dried through common procedures) using a three-electrode system with silver wire as the pseudo-reference electrode, a platinum wire as the auxiliary electrode, and a glassy carbon as the working electrode. Peak potentials were referenced *versus* ferrocene. All the data were recorded on an Autolab PGSTAT302N potentiostat (Metrohm). CVs were measured in a range from -2.5 V to 2.0 V in a scan rate of 100 mV/s with step potential of 0.01V unless otherwise stated. OSWV measurements were carried out with a step potential of 0.005V, an amplitude of 0.005 V, and a frequency of 20 Hz.

## Results and discussion

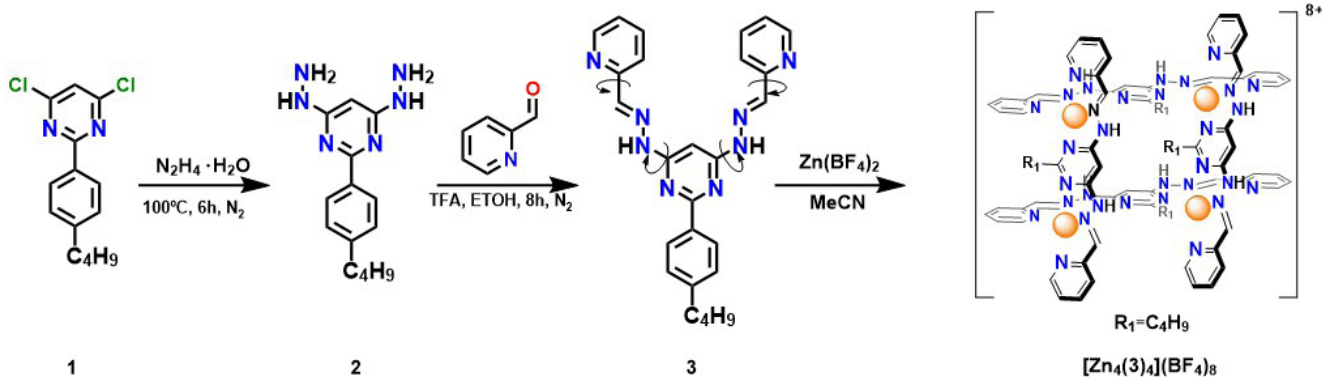
**Synthesis of the organic ligand 2-(4-butylphenyl)-4,6-bis((E)-2-(pyridin-2-ylmethylene) hydrazinyl) pyrimidine.** The highly soluble bis(hidrazone) **3** required a 2-step synthetic pathway as shown in Figure 1. Compound **2** was obtained with a 96% yield by the nucleophilic aromatic substitution of compound **1** (used without further purification) using hydrazine monohydrate as nucleophile on an inert atmosphere after 8 hours; the excess of hydrazine

was removed by rotatory evaporation and compound **2** was precipitated as a white solid by the continuous addition of diethyl ether.

Compound **2** turned out into a purple solid with the presence of oxygen. The rapid decomposition of **2** prevented its storage. For this reason, hydrazine **2** must be used immediately after preparation. To produce the target hydrazone **3**, **2** was dissolved in methanol with a drop of chloroform and stirred until it was completely dissolved. Then, pyridinecarboxaldehyde (2.2 equivalents) was added dropwise to the solution. After 8 hours of reflux, a yellow solid appeared in the bulk of the reaction. The solid was filtered and recrystallized in ethanol to obtain the bis (hydrazone) **3** as a white solid with 76% yield.

The <sup>1</sup>H-NMR of compounds **2** showed the presence of the alkyl protons at high field. Additionally, at low field, in the aromatic region, the hydrazine **2** presented two doublets at 8.18 and 7.24 ppm that integrate for two protons each. The correlation between these two signals is common for substituting aromatic rings, which allowed us to assign the two signals to protons 8 and 9 of the anisole ring. Another feature of this compound is the presence of the hydrazine NH protons that appear as two singlets at 7.55 and 3.18 ppm (H-15, H-16). These signals integrated for 2 and 4 protons, respectively, which confirmed the double substitution of the chloride precursor.

Bis(hydrazone) **3** was also analyzed by <sup>1</sup>H-NMR means. As was expected, the high field signals present in compound **3** underwent almost no change compared with its precursor **2**. Downfield, in the aromatic region, five new signals corresponding to the new pyridine ring and the imine proton can be seen. It is important to note the shift to the lower field of the amine protons (H-15) due to the presence of the hydrazone double bond. NOESY experiments show a spatial correlation between protons H-17 and H-15, which corresponds to the amine and imine protons, respectively; this correlation is a clear indication of a transoid con-formation common for this kind of bis(hydrazones) (Stefankiewicz, et al., 2013).



**Figure 1.** Synthetic route of the grid-like complex [Zn<sub>4</sub>(3)<sub>4</sub>](BF<sub>4</sub>)<sub>8</sub>. Structure **3** must go through single-bond rotations (indicated with arrows) in order to accommodate the tridentate pockets for coordination.



**Characterization of the grid-like complex.** Grid-like complexes are constructed by the self-assembly of polytopic organic ligands with metal cations that allow octahedral or, in some cases, a square planar geometry. In certain cases, it is possible that the formation of the grid complexes competes with other structures like helicates (Stadler, *et al.*, 2016), racks (Stadler, *et al.*, 2006) and corner-like structures (Stefankiewicz, *et al.*, 2010). To prevent this kind of competition it is important to pay special attention to external factors like the solvent, the counter ion of the metal salt, and the stoichiometric between the metal cation and the organic ligand. In this work, we approached a synthetic methodology (Ruben, *et al.*, 2006) using  $Zn(BF_4)_2$  as the source for the metal cation.  $Zn^{2+}$  is a well-known cation in the construction of supramolecular grid-complexes thanks to its diamagnetic behavior, which allows the characterization of its complexes by NMR spectroscopy (Barboiu, *et al.*, 2006). Furthermore, different anions have shown a templating effect on the formation of certain supramolecular structures (Hasenknopf, *et al.*, 1997). Particularly in the construction of grid-like complexes with  $Ni^{2+}$  and  $Zn^{2+}$ , anions like  $(BF_4)^-$  and  $ClO_4^-$  have led to the formation of the desired [2x2] arrangements over bigger ones which have resulted in different assemblies (Bu, *et al.*, 2000; Campos-Fernández, *et al.*, 2001).

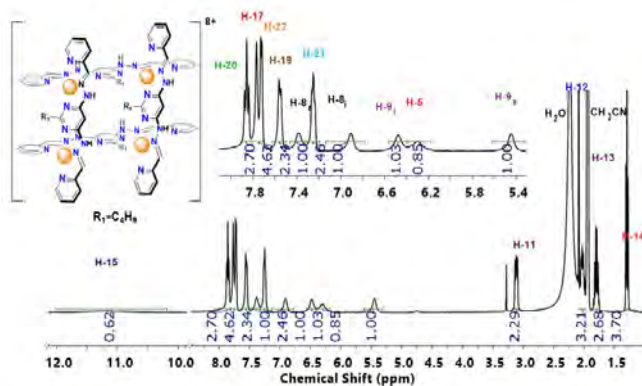
Ligand **3** and the salt of  $Zn^{2+}$  were mixed with a 1:1 stoichiometric relation in acetonitrile. In the first minutes of the reaction, the stirring crude appeared as a suspension, then turned into a yellow solution thanks to the formation of the grid complex. The reaction was left to stir for 24 hours to ensure the formation of the most stable structure under our experimental conditions. Thereafter, the grid-like complex was precipitated using diethyl ether and filtered to obtain a yellow solid with a 90% yield.

NMR spectroscopy was used to follow the changes and shifts in the signals of the organic components of the complex. Figure 2 shows the  $^1H$ -NMR spectrum of the grid compound  $[Zn_4(3)_4](BF_4)_8$ . The signals in the high field did not present much change in comparison with the uncomplexed ligand **3**. This similarity could be an indication of the position of the aliphatic chains outside of the grid structure. On the other hand, the analysis of the aromatic region of the spectrum shows four new signals at 5.47, 6.47, 6.89, and 7.45 ppm. To fully understand the nature of these new signals, a bidimensional COSY NMR experiment was carried out (Figure 3) showing a correlation between the signals at 6.89 - 5.47 ppm and at 6.45 - 7.45 ppm. Such correlations (Figure 2) correspond to the protons of the phenyl group in position 2 of the pyrimidine ring.

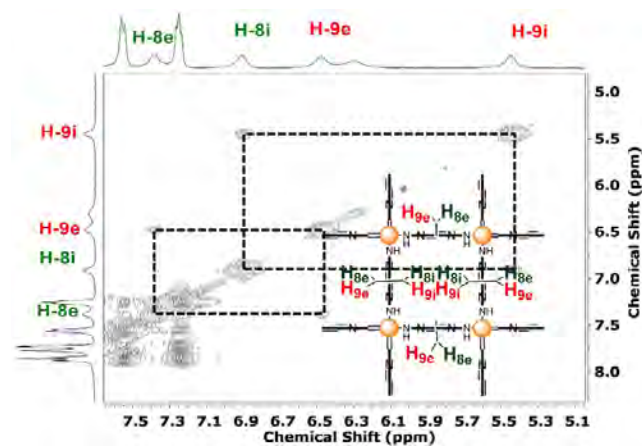
In the free ligand, the phenyl ring rotates freely around the pyrimidine-phenyl single bond axis (Figure 4). This rotation creates a similar chemical environment for the protons closer to the pyrimidine  $H_{8e}$  and  $H_{8i}$ . Similar behavior was observed for the protons in the ortho position to the aliphatic chain  $H_{9e}$  and  $H_{9i}$ . As a result of this rotation,

the  $^1H$ -NMR of the free ligand show two signals, a doublet and a multiplet, that integrate each of them for two protons. On other hand, in the grid complex, the phenyl ring of the bis(hydrazone) ligands inserts itself between two ligands (Figure 3) parallel to the coordination pocket. The position of the phenyl ring inside the compact grid structure creates a steric hindrance that limits the rotation around the phenyl-pyrimidine bond. This behavior results first in the shielding of the inside protons of the phenyl ring shifting the signals up to 5.43 ppm and finally results in the non-equivalence of the phenyl protons (Rojo, *et al.*, 1999). Phenyl substituents in the position 2 of the pyrimidine ring are amongst the most used in the construction of grid complexes. Their presence allow several  $\pi$ - $\pi$  interactions that stabilize the structure (Dutta, *et al.*, 2011)

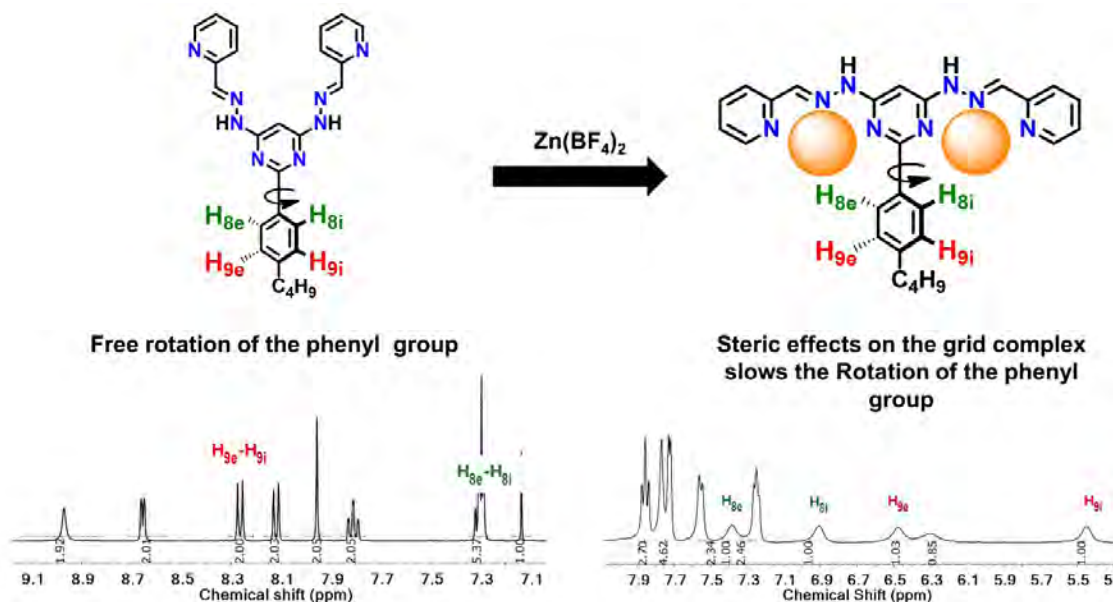
The amount of information related in the bidimensional experiments agreed with other grid complexes reported in the literature (Barboiu, *et al.*, 2006; Stefankiewicz, *et al.*, 2010), which allowed us to confirm that our complex exhibited a grid structure in solution as shown in Figure S10, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3891>; in which the phenyl group



**Figure 2.**  $^1H$ -NMR of the grid complex  $[Zn_4(3)_4](BF_4)_8$  (400 MHz,  $CD_3CN$ )



**Figure 3.** COSY spectrum of the grid complex  $[Zn_4(3)_4](BF_4)_8$  (400MHz,  $CD_3CN$ )



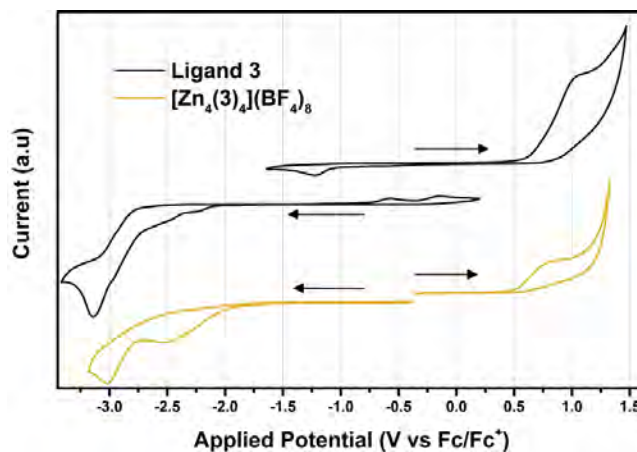
**Figure 4.** Representation of the steric hindrance of the phenyl group inside the grid complex

attached to the pyrimidine ring is right inside the grid structure and the aliphatic chains are organized in the outside of the structure. The elemental analysis for the grid-like compound with the molecular formula  $[(Zn_4(3)_4)(BF_4)_8 \cdot 17(H_2O)]$  resulted in C 40.76%, H 4.54%, and N 14.63%, which is consistent with the calculated one, further confirming the grid-like complex in the bulk.

The UV-Vis spectrum of the metal grid complex and the organic ligand **3** were taken using methanol as solvent. The free ligand **3** exhibited a broad absorption band from 235 to 350 nm (Figure S11, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3892>). This band, which is common in hydrazone systems, corresponds to  $\pi-\pi^*$  transitions present in the imine bond (C=N) of the hydrazone moiety and the ones found in the pyridine and pyrimidine rings (Wang, *et al.*, 2010; Yu, *et al.*, 2016). In contrast with the free ligand, the  $Zn^{2+}$  grid complex exhibited two bands in the visible region corresponding to the above-mentioned  $\pi-\pi^*$  transitions; the bathochromic shift present in the complex can be explained by the extended conjugation in the grid structure (Stefankiewicz, *et al.*, 2009).

**Redox behavior.** To fully understand the redox behavior of ligand **3** and the grid complex  $[(Zn_4(3)_4)(BF_4)_8]$  we conducted Cyclic Voltammetry (CV) and Osteryoung Square Wave Voltammetry (SWV) experiments.

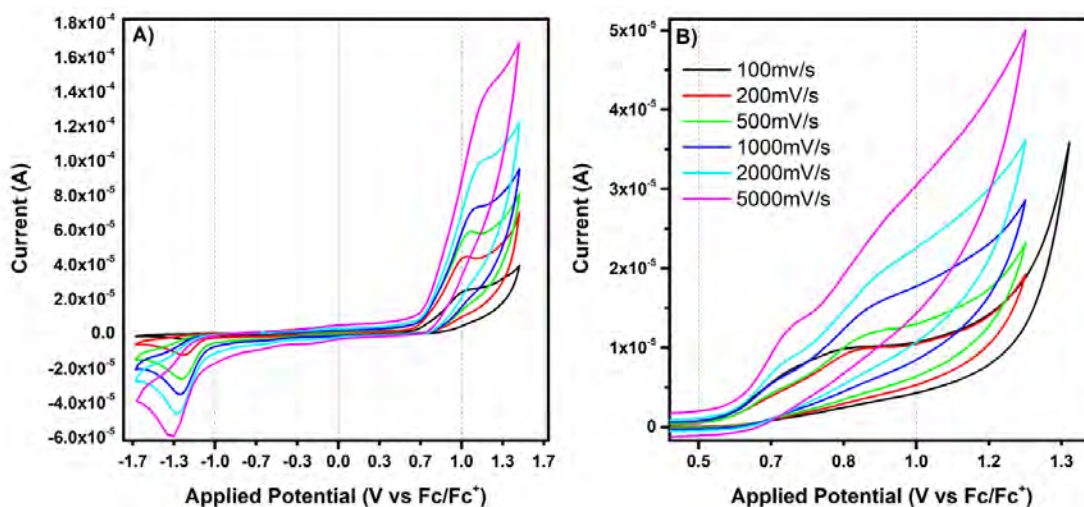
Cyclic voltammograms of compound **3** and grid complex  $[(Zn_4(3)_4)(BF_4)_8]$  are shown in Figure 5. Cathodic and anodic potentials were swept in different experiments; the arrows in the figure indicate both the beginning of the sweep and its initial direction. After the study was completed, ferrocene was added to the solution as an internal standard. The anodic CV curve of compound **3** (upper trace) presented an oxidation wave starting at 0.72 V; this process did not



**Figure 5.** Cyclic voltammograms of compound **3** and the metallic grid complex  $[(Zn_4(3)_4)(BF_4)_8]$  in DMF. Arrows show the initial voltage and the direction of the sweep. Scan rate:  $100 \text{ mVs}^{-1}$

exhibit a well-defined re-reduction wave showing that it is an irreversible process. However, a reduction peak was observed at -1.23 V, which was not observed when the sweep was initiated to cathodic potentials. Most likely, when compound **3** is oxidized, a side reaction may occur generating a stable species which is reduced at -1.23 V. The latter is deduced from the shape of the wave and its current intensity. Increasing the speed rate shifted this reduction peak to more cathodic potentials and increased its current intensity (Figure 6).

This phenomenon was not observed on the  $Zn^{2+}$  grid complex, which could be an indication that the oxidized species of the grid complex are less stable than the ones formed with the free ligand, even if both are apparently



**Figure 6.** Cyclic voltammograms at different scan rates of (A) the oxidation processes in the free ligand **3** and (B) the grid complex  $[(Zn_4(3)_4)(BF_4)_8]$

related to the organic structure of the compounds considering that the  $Zn^{2+}$  is electrochemically inactive within the studied potential window.

The complexation of **3** with  $Zn^{2+}$  results in a cathodic shift of 70 mV for the oxidation process compared with the free ligand. This oxidation process in different hydrazones has been related to deprotonation of the N-H group in the hydrazone moiety (Gordillo, *et al.*, 2017; Adenier, *et al.*, 2004). In the grid complex, the kinetics of the deprotonation of this group is faster due to the stabilization of the resulting negative charge by the  $Zn^{2+}$  cation and the extended conjugation of the structure.

On the other hand, the cathodic CV curve of compound **3** showed three reduction events that are irreversible in nature. The first two reduction processes presented areas of similar size and shape indicating that they may have the same number of electrons involved in the process. Contrary to this, the third reduction of **3** presented a bigger area compared to the first two reductions, which can be translated into more electrons associated with this reduction (Figure 4). The re-oxidation potentials of compound **3** coupled to the two first reduction steps were anodically shifted compared to the reduction potentials. The first two reduction events on molecule **3** exhibited two re-oxidations that were significantly shifted to more anodic voltages. The high kinetical barrier of this re-oxidation process could mean that the reduction of compound **3**, at least in its first two reduction steps, is coupled to a chemical reaction. Furthermore, we can assure that these oxidation potentials are coupled to the reduction since they only appeared in the cathodic curve of the CV.

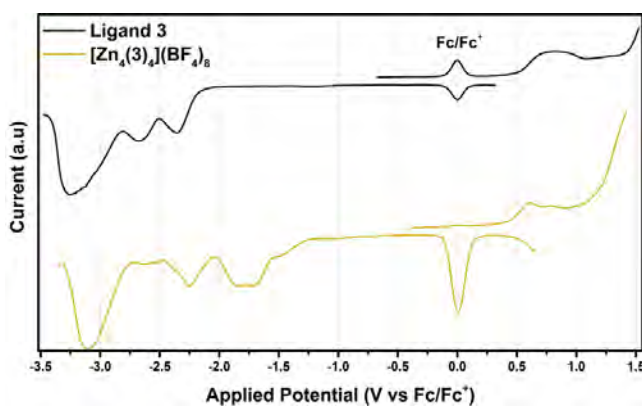
As mentioned before, the CV of compound **3** exhibited two smaller oxidation waves when starting the sweep in the cathodic direction. These processes that are associated with the first and second reduction events of the compound, showed

an increase in the peak current when the second reduction took place at larger scan rates. When the same experiment was carried out for the third reduction peak, the oxidations not only increased their peak currents but also started to overlap. Besides, the peak potentials shifted cathodically implying a change in the electron transfer mechanism.

For the complex, the CV showed two reduction events around -2.5 V and -3.0 V, both irreversible (Figure 4).

OSWV experiments (Figure 7) were carried out for compound **3** and the  $Zn^{2+}$  grid complex. The OSWV of compound **3** showed two oxidation peaks at 0.64 and 0.88 V, which were very close and not very well-defined due to the overlapping of both waves. For compound **3** and for the grid complex, probably adsorption of the sample over the working electrode caused this closed double peak.

On the other hand, the OSWV showed three reduction events for  $[(Zn_4(3)_4)(BF_4)_8]$  and the free ligand **3**. Particularly, the cathodic CV of the grid complex showed two reduction events at -2.5 V and -3.0 V; as can be seen in the OSWV



**Figure 7.** Osteryoung Square Wave Voltammograms of compound **3** and the grid complex  $[(Zn_4(3)_4)(BF_4)_8]$

(Figure 5), the first event in the CV was composed of two separated reductions at -1.7 and 2.25 V. The three reduction waves present in the grid complex are anodically shifted compared to the ones of the free ligand, an indication that the reduction processes are favored by the presence of the metal cation ( $Zn^{2+}$ ), even if the metal used was not electrochemically active in the window of our experiments. The presence of the positive charged ions and the highly conjugated systems of the bis(hydrazone) ligands could add more stabilization to the electrons added to the molecule. It is interesting that the grid complex did not present the reduction events on the anodic curve and the oxidation events on the cathodic curve that can be seen on the free ligand. Their absence could be an indication that the mechanism of the transfer process changes from the free ligand to the grid complex.

The electrochemical events of the synthesized bis(hydrazone) **3** and its grid complex  $[Zn_4(\mathbf{3})_4](BF_4)_8$  were compared to other bis(hydrazones) and different grid- and rack-like complexes synthesized in our group (Table 1). The analysis of the different bis(hydrazones) showed a marked difference in the voltammetry potentials among them. Our compound **3** presented the first reduction peak at the most negative potential indicating that the addition of heteroatoms (compounds **7** and **8** in Table 1) had a marked effect on the ability of the organic compound to receive and stabilize electrons. It is also interesting that lower reduction potentials came from compounds without the phenyl ring at position 2 of the pyrimidine ring, which is an indication of the low participation of this substituent in the reduction mechanism of these compounds.

It is evident that metal complexation also has an influence on the electrochemical properties of these bis(hydrazone) compounds. In all cases, complexes exhibit reduction potentials anodically shifted when compared with the free ligands. The magnitude of the shift is dependent on the nature of the

metal cation. For instance, electrochemically active cations like  $Co^{2+}$  and  $Fe^{2+}$  present lesser negative potentials than the complexes of electrochemically inactive cations like  $Zn^{2+}$  (Uppadine, *et al.*, 2005). Electrochemical band gaps are also affected by the interaction between the ligand and the different metal cations. In fact, complexes exhibit smaller band gaps than the free bis(hydrazone).

To explore the nature of the different redox potentials, a series of CVs were recorded at different scan rates. Using the Randles-Sevcik equation (Equation 1) a graph of peak current *versus* the square root of the scan rate was plotted to verify whether the electrochemical processes were controlled by diffusion or not. All events in compound **3** and the grid complex exhibited a linear correlation between peak current vs square root of the scan rate ( $R^2$  of 0.99, approx.) (see Figure S12, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3893> and S13, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/822/3894>), indicating a diffusion dependence and, therefore, fast electron transfer processes.

$$i_p = 2.99 \times 10^5 \text{ nAC} (\alpha n D \nu)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 1})$$

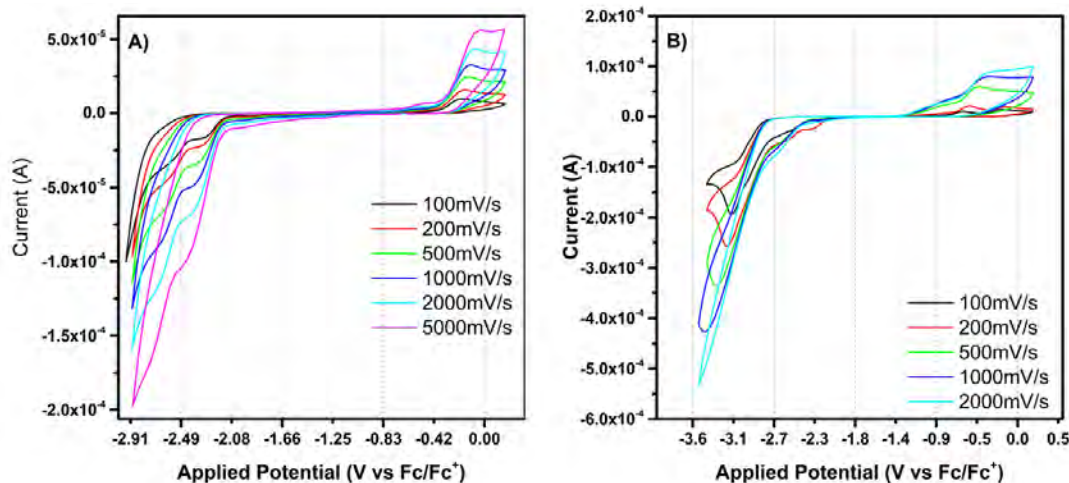
Cyclic voltammetry at different scan rates can be used to analyze the behavior of the electron transfer processes in the redox events. The oxidation of **3** and the grid complex shows different behaviors when analyzed at different scan rates. On one side, ligand **3** shows an increase in the current as a function of the scan rate. Also, the peak potential of the oxidation wave shifts towards more positive potentials. The reduction wave connected to this oxidation process also exhibits an increase in its peak current at faster scan rates. It is possible that this reduction wave corresponds to the reduction of an electrochemically active species generated in the oxidation of the ligand (possible by the Electron Transfer-Chemical Reaction mechanism) which explains the differences in peak currents between the peaks.

**Table 1.** Peak potentials for the cathodic and anodic events of the compounds prepared and similar ones reported in the literature

Compound	Reference	$E_{p, \text{Oxd (1)}}$	$E_{p, \text{Oxd (2)}}$	$E_{p, \text{Red (1)}}$	$E_{p, \text{Red (2)}}$	$E_{p, \text{Red (3)}}$	$\Delta E$ (V)
<b>3</b>	Present work	0.72	0.92	-2.34	-2.67	-3.26	-3.28
$[Zn_4(\mathbf{3})_4](BF_4)_8$	Present work	0.65	0.83	-1.75	-2.26	-3.10	-2.47
<b>4</b>	(Chaur-Valencia, <i>et al.</i> , 2018)	0.67	0.84	-1.10	-1.32	-2.29	-1.77
$[Co_4(\mathbf{4})_4](BF_4)_8$	(Chaur-Valencia, <i>et al.</i> , 2018)	0.66	0.79	-0.57	-1.11	-1.27	-1.23
<b>5</b>	(Fernández, <i>et al.</i> , 2015)	0.59	-	-2.23	-	-	-2.82
$[La_2(\mathbf{5}^{2-})]Cl_2$	(Fernández, <i>et al.</i> , 2015)	0.67	-	-1.36	-	-	2.03
<b>6</b>	(Carmona-Vargas, <i>et al.</i> , 2017)	0.69	-	-2.33	-2.59	-	3.02
$[Zn_2(\mathbf{6})]Cl_2$	(Carmona-Vargas, <i>et al.</i> , 2017)	0.58	-	-1.43	-1.99	-2.41	1.16
<b>7</b>	(Carmona-Vargas, <i>et al.</i> , 2017)	1.00	1.18	-1.09	-1.30	-	2.09
$[Zn_2(\mathbf{7})]Cl_2$	(Carmona-Vargas, <i>et al.</i> , 2017)	1.05	1.28	-0.35	-0.60	-	1.40
$[Zn_4(\mathbf{7})_4]Cl_8$	(Carmona-Vargas, <i>et al.</i> , 2017)	0.58	0.86	-1.22	-2.28	2.50	1.80

\*Peak potentials are present as such due to the irreversibility of the events and are reported vs ferrocene.

\*\* $\Delta E$  in volts calculated by the difference between the first oxidation potential and the first reduction potential



**Figure 8.** Cyclic voltammograms at different scan rates of the reduction processes in the free ligand **3**. A) First two reduction events. B) Full cathodic curve

Interestingly, grid complex  $[(Zn_4(\mathbf{3})_4)(BF_4)_8]$  shows the separation of the oxidation wave into two different processes that separate from each other as the scan rate increases (Figure 5). A presumable electron transfer mechanism could be involved in this redox process. A similar approach was used to analyze the reduction processes on ligand **3**. In cathodic processes, the increase of the scan rate results in larger peak currents and a shift of the peak potentials to more cathodic potentials (Figure 8).

## Conclusions

A new bis(hydrazone) **3** with a *p*-butylphenyl substituent in position two of the pyrimidine ring was successfully synthesized. This compound exhibits a remarkable solubility in common organic solvents. The bis(hydrazone) was then tested for the preparation of metal grid complexes using  $Zn(BF_4)_2$ . The  $^1H$ -NMR of the  $Zn^{2+}$  showed four individual signals for the phenyl protons due to the steric effects related to the position of this substituent in the supramolecular structure confirming the formation of the target metal grid structure. Electrochemical and UV-Vis analyses were carried out to characterize the electronic properties of the prepared compounds. The electrochemical analysis shows that the grid complex can accept multiple electrons. Further analysis also showed that the metal cation had a modular effect on the redox processes. In fact, each redox potential is anodically shifted in the grid structure compared to the free ligand. Finally, it was established that the metal cation also affects the electron transfer mechanism of the redox processes.

## Supplementary material

We supply further details on the bidimensional NMR and the  $^{13}C$ -NMR spectra of the bis(hydrazone) **3** and the grid complex. Additionally, we provide complete Randless-Sevick linearization for every redox potential found for the bis(hydrazone) and the  $Zn^{2+}$  complex.

## Acknowledgments

The authors greatly thank the *Vicerrectoría de Investigaciones* and the *Centro de Excelencia en Nuevos Materiales* (CENM) of the *Universidad del Valle* for the financial support in the development of this research. JDV and MN also acknowledge Colciencias for the Grant “*Jovenes investigadores para la paz*” 2017, code FP44842-407-2017. Finally, the authors are grateful to Professor Alejandro Ortiz from *Universidad del Valle* for allowing them to use the potentiostat for the electrochemical experiments.

## Supporting information

**Figure S1.**  $^1H$ -NMR ( $CDCl_3$ , 400MHz) spectrum of 2-(4-butylphenyl)-4,6-dichloropyrimidine (**1**). See the figure S1 in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/822/3773>

**Figure S2.**  $^1H$  NMR of compounds **2** (400MHz,  $DMSO-d_6$ ) and **3** (400MHz,  $CDCl_3$ ). See the figure S2 in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/822/3774>

**Figure S3.**  $^{13}C$ -NMR ( $DMSO-d_6$ , 101 MHz) spectrum of 2-(4-butylphenyl)-4,6-dihydrazinyipyrimidine (**2**). See the figure S3 in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/822/3884>

**Figure S4.**  $^1H$ -NMR- NOESY of compound **3** (400 MHz,  $CDCl_3$ ). See the figure S4 in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/822/3885>

**Figure S5.**  $^{13}C$ -NMR ( $CDCl_3$ , 101 MHz) spectrum of Bis (hydrazone) **3**. See the figure S5 in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/822/3886>

**Figure S6.** 2D-NMR HSQC ( $CDCl_3$ , 400 MHz) spectrum of Bis(hydrazone) **3**. See the figure S6 in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/822/3887>

**Figure S7.** 2D-NMR COSY ( $CD_3CN-d_3$ , 400 MHz) of grid complex  $[Zn_4 L_4] \cdot 8(BF_4)$ . Aromatic region onset. See the figure S7 in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/822/3888>

**Figure S8.** 2D-NMR COSY ( $\text{CD}_3\text{CN}-d_3$ , 400 MHz) of grid complex  $[\text{Zn}_4 \text{L}_4] \cdot 8(\text{BF}_4)$ . Aliphatic region onset. See the figure S8 in: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/822/3889>

**Figure S9.** 2D-NMR NOESY ( $\text{CD}_3\text{CN}-d_3$ , 400 MHz) of grid complex  $[\text{Zn}_4 \text{L}_4] \cdot 8(\text{BF}_4)$ . Aliphatic region onset. See the figure S9 in: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/822/3890>

**Figure S10.** Rotation of the bis(hydrazone) **3** with A) and without B) the presence of the metal cation. On free ligand cisoid conformation is destabilized by the repulsion of the nitrogen lone pairs. See the figure S11 in: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/822/3891>

**Figure S11.** UV-Vis Spectra of ligand **3** and Grid like complex  $[(\text{Zn}_4(3)_4)(\text{BF}_4)_8]$  in methanol. See the figure S10 in: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/822/3892>

**Figure S12.** Randles-Sevcik linear fit for oxidation peaks in (a) bis(hydrazone) (**3**) and (B) grid complex  $[\text{Zn}_4 \text{L}_4] \cdot 8(\text{BF}_4)$ . See the figure S12 in: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/822/3893>

**Figure S13.** Randles-Sevcik linear fit for oxidation peaks in (a) bis(hydrazone) (**3**) and (B) grid complex  $[\text{Zn}_4 \text{L}_4] \cdot 8(\text{BF}_4)$ . See the figure S13 in: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/822/3894>

## Author contributions

JDV carried out the electrochemical and the UV Vis experiments and drafted all the results and the manuscript. JL performed the synthesis of compound **3** and the grid like complex. M.C analyzed the data, proofread, and reviewed the final document.

## Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest of any kind that could possibly affect the publication or the results of this research process.

## References

- Adenier, A., Chehimi, M. M., Gallardo, I., Pinson, J., Vilà, N. (2004). Electrochemical oxidation of aliphatic amines and their attachment to carbon and metal surfaces. *Langmuir*. **20** (19): 8243-8253. Doi: 10.1021/la049194c
- Alam, M. S., Strömsdörfer, S., Dremov, V., Müller, P., Kortus, J., Ruben, M., Lehn, J.-M. (2005). Addressing the Metal Centers of  $[2 \times 2]$  CoII4 Grid-Type Complexes by STM/STS. *Angewandte Chemie International Edition*. **44** (48): 7896-7900. Doi: 10.1002/anie.200502743
- Barboiu, M., Ruben, M., Blasen, G., Kyritsakas, N., Chacko, E., Dutta, M., ... Lehn, J.-M. (2006). Self-Assembly, Structure and Solution Dynamics of Tetranuclear  $\text{Zn}^{2+}$  Hydrazone  $[2 \times 2]$  Grid-Type Complexes. *European Journal of Inorganic Chemistry*. **2006** (4): 784-792. Doi: 10.1002/ejic.200500963
- Biswas, S., Das, S., van Leusen, J., Kögerler, P., Chandrasekhar, V. (2014). Tetranuclear  $[2 \times 2]$  Square-Grid Lanthanide(III) Complexes: Syntheses, Structures, and Magnetic Properties. *European Journal of Inorganic Chemistry*. **2014** (25): 4159-4167. Doi: 10.1002/ejic.201402326

- Breuning, E., Ruben, M., Lehn, J., Renz, F., García, Y., Ksenofontov, V., ... Rissanen, K. (2000). Spin Crossover in a Supramolecular Fe(II)  $[2 \times 2]$  Grid Triggered by Temperature, Pressure, and Light. *Angewandte Chemie International Edition*. **39** (14): 2504-2507. Doi: 10.1002/1521-3773(20000717)39:14<2504::AID-ANIE2504>3.0.CO;2-B
- Bu, X.-H., Tanaka, K., Shionoya, M., Biradha, K., Morishita, H., Furusho, S. (2000). A spontaneously resolved chiral molecular box: A cyclic tetranuclear Zn(II) complex with DPTZ (DPTZ = 3,6-di-2-pyridyl-1,2,4,5-tetrazine). *Chemical Communications*. VOL. (2000) (11): 971-972. Doi: 10.1039/a909742b
- Busch, D. H. (1967). Transition Metal Complexes of the new Synthetic Macrocyclic Ligands. *Helvetica Chimica Acta*. **50** (S1): 174-206. Doi: 10.1002/hlca.19670500914
- Campos-Fernández, C. S., Clérac, R., Koomen, J. M., Russell, D. H., Dunbar, K. R. (2001). Fine-Tuning the Ring-Size of Metallacyclophanes: A Rational Approach to Molecular Pentagons. *Journal of the American Chemical Society*. **123** (4): 773-774. Doi: 10.1021/ja002960r
- Carmona-Vargas, C. C., Váquiro, I. Y., Jaramillo-Gómez, L. M., Lehn, J.-M., Chaur, M. N. (2017). Grid-type complexes of  $\text{M}^{2+}$  ( $\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{and Zn}$ ) with highly soluble bis(hydrazone)thiopyrimidine-based ligands: Spectroscopy and electrochemical properties. *Inorganica Chimica Acta*. **468**: 131-139. Doi: 10.1016/j.ica.2017.05.002
- Chaur-Valencia, M. N., Zuluaga Corrales, H. F., Martínez, G. (2018). Electronic and electrochemical properties of grid-type metal ion complexes ( $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Co}^{2+}$ ) with a pyridine-pyrimidine-pyridine based bis(hydrazone). *Revista Colombiana de Química*. **47** (2): 45-53. Doi: 10.15446/rev.colomb.quim.v47n2.66081
- Curtis, N. F. (1960). Transition-metal complexes with aliphatic Schiff bases. Part I. Nickel(II) complexes with N-isopropylidene-ethylenediamine schiff bases. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*. **4409-40413**. Doi: 10.1039/jr9600004409
- Dawe, L. N., Shuvaev, K. V., Thompson, L. K. (2009). Polytopic ligand directed self-assembly—polymetallic  $[n \times n]$  grids versus non-grid oligomers. *Chemical Society Reviews*. **38** (8): 2334. Doi: 10.1039/b807219c
- Dawe, L. N. & Thompson, L. K. (2008). Complete and 'incomplete'  $[2 \times 2]$  grids by self-assembly with a sterically hindered ditopic imidazole hydrazone ligand—structural and magnetic studies. *Dalton Transactions*. **27**: 3610. Doi: 10.1039/b800529j
- Dietrich-Buchecker, C. O. & Sauvage, J.-P. (1989). A Synthetic Molecular Trefoil Knot. *Angewandte Chemie International Edition in English*. **28** (2): 189-192. Doi: 10.1002/anie.198901891
- Dutta, M., Movassat, M., Brook, D. J. R., Oliver, A., Ward, D. (2011). Molecular motion in zinc hydrazone grid complexes. *Supramolecular Chemistry*. **23** (9): 632-643. Doi: 10.1080/10610278.2011.593626
- Fernández, M. A., Barona, J. C., Polo-Cerón, D., Chaur, M. N. (2015). Estudios fotoquímicos y electroquímicos de complejos lantánidos de 6-(hidroximetil)piridin-2-carboxaldehído [2-metilpirimidina-4,6-diil] bishidrazona. *Revista Colombiana de Química*. **43** (1): 5-11. Doi: 10.15446/rev.colomb.quim.v43n1.50540

- García, A. M., Romero-Salguero, F. J., Bassani, D. M., Lehn, J. M., Baum, G., Fenske, D.** (1999). Self-assembly and characterization of multimetallic grid-type lead(II) complexes. *Chemistry - A European Journal*. **5** (6): 1803-1808. Doi: 10.1002/(SICI)1521-3765(19990604)5:6<1803::AID-CHEM1803>3.0.CO;2-M
- Gordillo, M. A., Soto-Monsalve, M., Carmona-Vargas, C. C., Gutiérrez, G., D'Vries, R. F., Lehn, J. M., Chaur, M. N.** (2017). Photochemical and Electrochemical Triggered Bis(hydrazone) Switch. *Chemistry - A European Journal*. **23** (59): 14872-14882. Doi: 10.1002/chem.201703065
- Hanan, G. S., Volkmer, D., Schubert, U. S., Lehn, J. M., Baum, G., Fenske, D.** (1997). Coordination arrays: Tetranuclear cobalt(II) complexes with [2 x 2]-grid structure. *Angewandte Chemie - International Edition in English*. **36** (17): 1842-1844. Doi: 10.1002/anie.199718421
- Hardy, J. G.** (2013). Metallo-supramolecular grid complexes: Towards nanostructured materials with high-tech applications. *Chemical Society Reviews*. **42** (19): 7881. Doi: 10.1039/c3cs60061k
- Harrowfield, J. & Lehn, J.** (2012). ChemInform Abstract: Multifunctionality and Multivalency Generation by Self-assembly of Grid-type Metallo-supramolecular Architectures. *ChemInform*. **43** (28): 170-173. Doi: 10.1002/chin.201228260
- Hasenknopf, B., Lehn, J. M., Boumediene, N., Dupont-Gervais, A., Van Dorselaer, A., Kneisel, B., Fenske, D.** (1997). Self-assembly of tetra- and hexanuclear circular helicates. *Journal of the American Chemical Society*. **119** (45): 10956-10962. Doi: 10.1021/ja971204r
- Lehn, J.-M.** (1988). *Supramolecular Chemistry—Scope and Perspectives Molecules, Supermolecules, and Molecular Devices* (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie International Edition in English*. **27** (1): 89-112. Doi: 10.1002/anie.198800891
- Lehn, J.-M.** (2006). *Molecular and Supramolecular Devices. Supramolecular Chemistry*. p. 89-138. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Doi: 10.1002/3527607439.ch8
- Nobelprize.org.** (2016). The Nobel Prize in Chemistry 2016 - Advanced Information. Accessed on: December 20, 2018. Available from: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2016/advanced-information/>
- Parween, A., Naskar, S., Mota, A. J., Espinosa Ferao, A., Chattopadhyay, S. K., Rivière, E., ... Naskar, S.** (2017). C<sub>i</sub>-Symmetry, [2 x 2] grid, square copper complex with the N<sub>4</sub>, N<sub>5</sub>-bis(4-fluorophenyl)-1H-imidazole-4,5-dicarboxamide ligand: Structure, catecholase activity, magnetic properties and DFT calculations. *New Journal of Chemistry*. **41** (20): 11750-11758. Doi: 10.1039/C7NJ01667K
- Rojo, Z., Romero-Salguero, F.-J., Lehn, J.-M., Baum, G., Fenske, D.** (1999). Self-Assembly, Structure, and Physical Properties of Tetranuclear ZnII and CoII Complexes of [2 x 2] Grid-Type. *European Journal of Inorganic Chemistry*. **1999**: 1421-1428. Doi: 10.1002/(SICI)1099-0682(199909)1999:9%3C1421::AID-EJIC1421%3E3.0.CO;2-J
- Ruben, M., Breuning, E., Gisselbrecht, J. P., Lehn, J. M.** (2000). Multilevel molecular electronic species: Electrochemical reduction of a [2 x 2] Co<sub>4</sub>(II) grid-type complex by 11 electrons in 10 reversible steps. *Angewandte Chemie - International Edition*. **39** (22): 4139-4142. Doi: 10.1002/1521-3773(20001117)39:22<4139::AID-ANIE4139>3.0.CO;2-Y
- Ruben, M., Breuning, E., Lehn, J.-M., Ksenofontov, V., Renz, F., Gütllich, P., Vaughan, G. B. M.** (2003). Supramolecular Spintronic Devices: Spin Transitions and Magnetostructural Correlations in [Fe<sub>4</sub>III<sub>4</sub>]<sub>8</sub>+[2x2]-Grid-Type Complexes. *Chemistry - A European Journal*. **9** (18): 4422-4429. Doi: 10.1002/chem.200304933
- Ruben, M., Lehn, J.-M., Müller, P.** (2006). Addressing metal centres in supramolecular assemblies. *Chem. Soc. Rev*. **35** (11): 1056-1067. Doi: 10.1039/B517267P
- Ruben, M., Lehn, J., Vaughan, G.** (2003). Synthesis of ionisable [2 x 2] grid-type metallo-arrays and reversible protonic modulation of the optical properties of the [CoII<sub>4</sub>L<sub>4</sub>] <sup>8+</sup> species. *Chem. Commun*. **3** (12): 1338-1339. Doi: 10.1039/B303922F
- Ruben, M., Rojo, J., Romero-Salguero, F. J., Uppadine, L. H., Lehn, J.-M.** (2004). Grid-Type Metal Ion Architectures: Functional Metallo-supramolecular Arrays. *Angewandte Chemie International Edition*. **43** (28): 3644-3662. Doi: 10.1002/anie.200300636
- Shen, F., Huang, W., Wu, D., Zheng, Z., Huang, X.-C., Sato, O.** (2016). Redox Modulation of Spin Crossover within a Cobalt Metallogrid. *Inorganic Chemistry*. **55** (2): 902-908. Doi: 10.1021/acs.inorgchem.5b02442
- Stadler, A.-M., Ramírez, J., Lehn, J.-M., Vincent, B.** (2016). Supramolecular reactions of metallo-architectures: Ag<sub>2</sub>-double-helicate/Zn<sub>4</sub>-grid, Pb<sub>4</sub>-grid/Zn<sub>4</sub>-grid interconversions, and Ag<sub>2</sub>-double-helicate fusion. *Chemical Science*. **7** (6): 3689-3693. Doi: 10.1039/C5SC04403K
- Stadler, A. M., Kyritsakas, N., Graff, R., Lehn, J. M.** (2006). Formation of rack- And grid-type metallo-supramolecular architectures and generation of molecular motion by reversible uncoiling of helical ligand strands. *Chemistry - A European Journal*. **12** (17): 4503-4522. Doi: 10.1002/chem.200501202
- Stefankiewicz, A. R., Harrowfield, J., Madalan, A. M., Lehn, J.-M.** (2013). Tuning the planarity of [2 x 2] grids. *CrystEngComm*. **15** (44): 9128. Doi: 10.1039/c3ce41510d
- Stefankiewicz, A. R., Rogez, G., Harrowfield, J., Drillon, M., Lehn, J.-M.** (2009). Structural features directing the specificity and functionality of metallo-supramolecular grid-type architectures. *Dalton Transactions*. **29**: 5787. Doi: 10.1039/b902262g
- Stefankiewicz, A. R., Wałęsa-Chorab, M., Szcześniak, H. B., Patroniak, V., Kubicki, M., Hnatejko, Z., Harrowfield, J.** (2010). Grid-corner analogues: Synthesis, characterisation and spectroscopic properties of meridional complexes of tridentate NNO Schiff-base ligands. *Polyhedron*. **29** (1): 178-187. Doi: 10.1016/j.poly.2009.06.069
- Thompson, L. K., Waldmann, O., Xu, Z.** (2005). Polynuclear manganese grids and clusters - A magnetic perspective. *Coordination Chemistry Reviews*. **249** (23): 2677-2690. Doi: 10.1016/j.ccr.2005.07.002
- Uppadine, L. H., Gisselbrecht, J. P., Kyritsakas, N., Näntinen, K., Rissanen, K., Lehn, J. M.** (2005). Mixed-valence, mixed-spin-state, and heterometallic [2x2] grid-type arrays based on heteroditopic hydrazone ligands: Synthesis and electrochemical features. *Chemistry - A European Journal*. **11** (8): 2549-2565. Doi: 10.1002/chem.200401224

- Wang, S., Men, G., Zhao, L., Hou, Q., Jiang, S.** (2010). Binaphthyl-derived salicylidene Schiff base for dual-channel sensing of Cu, Zn cations and integrated molecular logic gates. *Sensors and Actuators, B: Chemical*. **145** (2): 826-831. Doi: 10.1016/j.snb.2010.01.060
- Wasserman, E.** (1960). the Preparation of Interlocking Rings: a Catenane1. *Journal of the American Chemical Society*. **82** (16): 4433-4434. Doi: 10.1021/ja01501a082
- Wu, S. Q., Wang, Y. T., Cui, A. L., Kou, H. Z.** (2014). Toward higher nuclearity: Tetranuclear cobalt(II) metallogrid exhibiting spin crossover. *Inorganic Chemistry*. **53** (5): 2613-2618. Doi: 10.1021/ic402971a
- Youinou, M.-T., Rahmouni, N., Fischer, J., Osborn, J. A.** (1992). Self-Assembly of a Cu<sub>4</sub> Complex with Coplanar Copper(I) Ions: Synthesis, Structure, and Electrochemical Properties. *Angewandte Chemie International Edition in English*. **31** (6): 733-735. Doi: 10.1002/anie.199207331
- Yu, F., Hou, L. J., Qin, L. Y., Chao, J. Bin, Wang, Y., Jin, W. J.** (2016). A new colorimetric and turn-on fluorescent chemosensor for Al<sup>3+</sup> in aqueous medium and its application in live-cell imaging. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **315**: 8-13. Doi: 10.1016/j.jphotochem.2015.09.006





United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization



International Year  
of the Periodic Table  
of Chemical Elements

## 2019 Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos

En el marco de la celebración del aniversario de la tabla periódica, la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Físicas y Naturales se une a esta con un pequeño homenaje a través de dos ensayos preparados por profesores de química, amantes de la enseñanza de la ciencia y conocedores de la trascendencia de esta impresionante propuesta, que cumple 150 años aportando al desarrollo de todas las áreas de la ciencia.

Como lo decía el profesor José Luis Villaveces, “El hecho es que la Tabla Periódica y, sobre todo la Ley Periódica, sí están entre los triunfos más grandes de la ciencia del siglo XIX y de todos los tiempos y fueron un microscopio increíblemente potente que nos permitió, por primera vez desde las audaces especulaciones de los griegos, ver el interior del átomo y entender algo sobre su estructura” (Revista Innovación y Ciencia. XXIX, N 1 de 2019).

Los invitamos a conmemorar esta efemérides con la lectura de los ensayos que a continuación les presentamos.

**Sonia Moreno, Ph.D.**

Editora asociada Ciencias Químicas

# La tabla periódica como fundamento para el aprendizaje de la Química y la construcción de conocimiento

Manuel F. Molina C.\*, Liliam A. Palomeque-Forero

Grupo de Enseñanza de la Química, Departamento de Química, Facultad de Ciencias,  
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

## Resumen

Este escrito sobre la tabla periódica busca ofrecer ideas para la celebración del Año Internacional de la Tabla Periódica propuesto por la UNESCO para este 2019 y apoyado por diferentes organizaciones a nivel internacional. Tales ideas giran alrededor de la consideración de que el lenguaje científico es el eje articular para enseñarla y aspiran a exponer los aportes de diferentes científicos para lograr lo que hoy conocemos como tabla periódica. Además, se hacen algunas propuestas metodológicas para celebrar este aniversario de forma colectiva o personal. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Tabla periódica; Lenguaje; Mendeléyev; Historia; Conocimiento científico.

## The periodic table as a foundation for learning chemistry and building knowledge

### Abstract

This paper on the periodic table seeks to offer ideas around the celebration of the International Year of the Periodic Table (2019 IYPT) proposed by UNESCO for 2019 and supported by different international organizations. These ideas revolve around the consideration of scientific language as an articulating axis to teach the periodic table and the use of the contributions of different scientists to achieve what we know today as the periodic table. Additionally, we make some methodological proposals to celebrate the 2019 IYPT collectively or in a personal way. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Periodic table; Language; Mendeléyev; History; Scientific knowledge.

## Introducción

En el contexto actual, en que basta abrir una aplicación en un teléfono para encontrar los datos sobre cada uno de los elementos químicos, los estudiantes no comprenden la importancia de aprender lo relacionado con la tabla periódica en sus clases introductorias de Química tanto en secundaria como en los primeros años de educación superior. Para estas nuevas generaciones, inmersas en la información inmediata y resumida de las herramientas tecnológicas, cada vez son más necesarias las prácticas innovadoras en el aula. Con las nuevas aproximaciones a la enseñanza de la tabla periódica, es posible emplearla como eje conductor del proceso de apropiación del lenguaje de la Química. El manejo adecuado de los nombres, los símbolos, las nomenclaturas y los demás detalles de escritura científica, es uno de los puntos críticos de la “alfabetización química” de los jóvenes. El trabajo con la tabla desde esta perspectiva puede contribuir a la adquisición de elementos del lenguaje químico de manera fluida. También resulta pertinente usarla en el aula para analizar cómo se lleva a cabo la construcción del conocimiento científico. La comprensión de las acciones individuales y colectivas y la revisión de las biografías y

las historias personales de los investigadores que han contribuido en diferentes momentos históricos a deducir y organizar la información, favorece el acercamiento de los jóvenes a la Química y les permite reflexionar sobre sus actores y apreciar sus características humanas, sus contradicciones, sus equivocaciones y dificultades, y sus esfuerzos y triunfos.

## El lenguaje de la Química

Se ha discutido ampliamente el papel que juega el lenguaje en la apropiación de los conceptos científicos. Considerando que el aprendizaje depende y está relacionado con elementos culturales y sociales, el manejo del lenguaje específico es determinante en las etapas generales de acercamiento al conocimiento (memorización, comprensión, elaboración de patrones mediante la interrelación de varios conceptos), así como para extrapolar lo aprendido, con el fin de emplearlo

### \*Correspondencia:

Manuel F. Molina C.; [mfmolinac@unal.edu.co](mailto:mfmolinac@unal.edu.co)

Recibido: 7 de junio de 2019

Aceptado: 26 de junio de 2019

Editor: Sonia Moreno

para resolver situaciones en diversos escenarios y contextos. El aprendizaje de la tabla periódica de los elementos químicos no pasa, en la mayoría de los casos, de la etapa de memorización; los alumnos recuerdan información desconectada de su realidad. La memorización de los nombres de los elementos de la tabla no implica que los hayan relacionado o interpretado, y que le reconozcan alguna utilidad, sentido y objetivo al tema como parte del currículo de ciencias en secundaria e, incluso, a nivel universitario (Galagovsky, *et al.*, 2013). El aprendizaje no puede quedarse, entonces, en la memorización de los términos, por el contrario, debe propiciarse la construcción del lenguaje científico a partir de los propios estudiantes (del Carmen Olivera, *et al.*, 2015); lo anterior implica que se logre un aprendizaje en el que predomine la creatividad y la participación consciente de los implicados (Cervantes & Gutierrez, 2014).

A pesar de que siempre se han desarrollado opciones lúdicas para incrementar el interés en la información contenida en la tabla y para propiciar el aprendizaje de los detalles más relevantes (Joag, 2014, Martí-Centelles & Rubio-Magnieto, 2014), a nivel superior puede ser útil abordar el tema con actividades de mayor complejidad, como la redacción de ensayos argumentativos en los que los estudiantes expongan sus ideas y la búsqueda de información sobre la importancia de los elementos químicos, por ejemplo, en el diseño y fabricación de distintos objetos de uso cotidiano (equipos de comunicación, alimentos, materiales cerámicos, circuitos eléctricos, entre muchos otros). La búsqueda de información sobre los nombres de los elementos y sus respectivas propiedades químicas, permite mejorar el manejo del lenguaje técnico oral y escrito, enriquece el vocabulario asociado con la ciencia y, a la larga, genera interés por el origen de los vocablos, los nombres y las denominaciones. De hecho, la escritura sobre estos temas se puede emplear como estrategia de aprendizaje en las aulas

(Rodríguez, 2018) para lograr, no solo la alfabetización científica básica, sino verdaderos avances en la apropiación de las ideas, en su interpretación y su argumentación.

### La construcción de conocimiento científico y la tabla periódica

La celebración de este Año Internacional de la Tabla Periódica (*International Year of the Periodic Table*, 2019 IYPT) constituye una ocasión inmejorable para enseñar acerca de la construcción del conocimiento científico con base en las ideas que llevaron a concebir lo que hoy conocemos como la tabla periódica. Si bien el conocimiento va más allá de la simple acumulación de datos, los científicos trabajan sobre esa acumulación, la cual no es solo una simple suma de artículos o ideas, y tiene mucho que ver con las tensiones y consensos en torno a un tema (un ejemplo actual es el consenso alrededor de las causas del cambio climático) (Lewandowsky, 2013). La celebración del IYPT nos permite rescatar un área poco tratada en la enseñanza de la Química, la naturaleza de la ciencia y el conocimiento científico, y lograr un espacio para que los profesores se conviertan en alfabetizadores de la ciencia, algo que parece difícil y a veces abstracto.

La tabla periódica constituyó mucho más que una simple clasificación de elementos químicos conocidos desde la antigüedad. Ha sido una herramienta conceptual que predijo nuevos elementos, pronosticó relaciones no reconocidas, sirvió como dispositivo correctivo y cumplió un rol único como dispositivo de memoria y organización. Se ha convertido en una potente carta de síntesis de conocimiento, donde es posible leer, si hacemos la indagación, la historia de la humanidad (Schwartz, 2007). Por ello, un primer ejercicio de construcción partiría de ver cómo han ido apareciendo los diferentes elementos químicos a lo largo del tiempo, utilizando una línea temporal como la de la Figura 1, similar

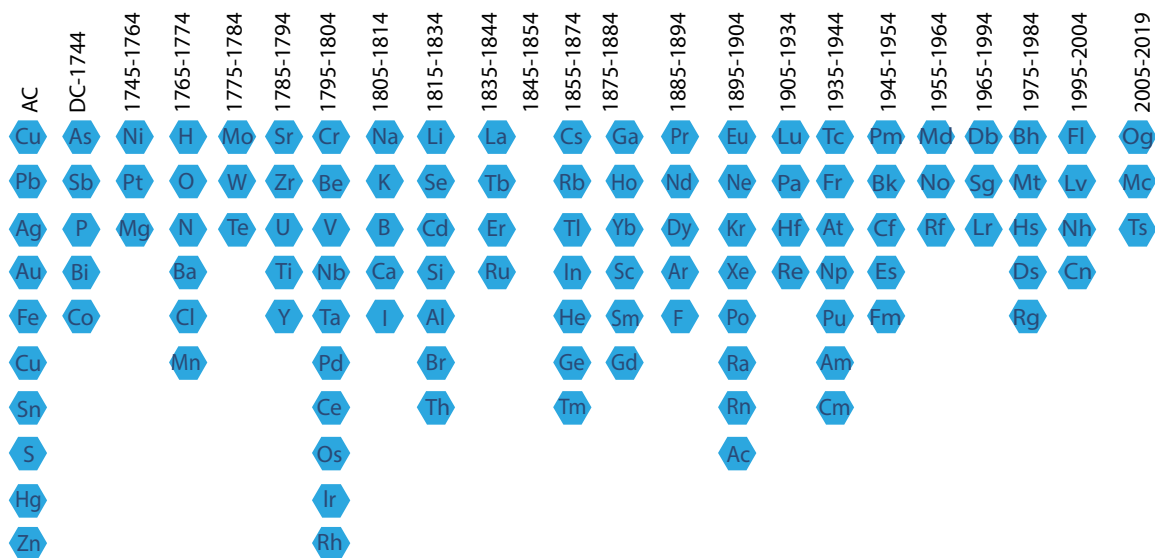


Figura 1. Línea del tiempo de la aparición de los elementos químicos construida en la Waterloo University

a la propuesta por la Universidad de Waterloo (**Waterloo University**, 2019), donde apreciamos que, por ejemplo, antes de Cristo ya se contaba con el cobre, el hierro o el oro, elementos muy utilizados en nuestra era moderna. Al recorrer este esquema, podemos relacionar hechos que en cada intervalo de tiempo ayudaron a construir conocimiento.

Por ejemplo, los gases nobles, que se ubican entre 1895 y 1904 (excepto el helio, descubierto en 1868), fueron una prueba de fuego para la tabla periódica de Mendeléyev. El descubrimiento del argón trajo incertidumbre sobre su posición en la tabla, ya que no era un gas diatómico, como el oxígeno, el flúor o el nitrógeno, y tenía un peso atómico de 40, superior al del potasio, con lo que su ubicación se hacía más difícil. Ello demostró que no bastaba con ordenar los elementos según sus pesos atómicos, que había algo más allá de esta variable. Es el caso del argón, sobre el cual Mendeléyev llegó a sugerir que se trataba de un gas triatómico, el “N<sub>3</sub>” (**Scerri**, 2001), pero finalmente, se lo ubicó en un grupo nuevo entre los halógenos y los metales alcalinos.

Hasta la publicación de la primera tabla periódica de Mendeléyev (1869) se conocían 63 elementos, los cuales marcaron importantes periodos de la humanidad. Son conocidas las eras del cobre y el hierro, con características especiales cada una. Cuando el cobre era el material más utilizado, las armas tenían cierta capacidad, que se mejoró con las aleaciones de estaño o zinc, pero la situación tuvo un avance revolucionario con las herramientas hechas de hierro y, posteriormente, de acero. Asimismo, bastaría llamar la atención sobre cómo la introducción del aluminio producido en masa significó un cambio en las construcciones o en la fabricación de aviones (sin aluminio no podríamos tener aviones rápidos y eficientes), para dimensionar lo que hacen los elementos en nuestra vida. Así pues, la figura 1 puede emplearse desde muchas perspectivas y constituye un material con abundante información implícita que vale la pena introducir en la enseñanza de las ciencias, pues vemos que la ubicación de los elementos en la línea de tiempo lleva consigo una enorme carga de información histórica y conceptual, por lo que constituye una gran puerta de entrada a la descripción de la construcción de conocimiento científico.

Por otra parte, un insumo muy necesario para dar forma a la tabla periódica moderna fue el concepto de elemento. Postulado desde la antigüedad por los griegos en la idea de los cuatro elementos, solo tomó forma con Lavoisier en el siglo XVIII, y se vio nutrido con las contribuciones de científicos como Proust o Berzelius. La introducción de los postulados de Dalton (1803), especialmente el de que un mismo tipo de átomos compone cada elemento, ayudó a construir el concepto de peso atómico relativo, clave en el desarrollo de las ideas de periodicidad. Todo esto, junto con las nociones de molécula de Avogadro (1811), el descubrimiento de nuevos elementos químicos y la determinación más precisa de los pesos atómicos, conformó la sopa de ideas que alcanzó ebullición en el congreso de Karlsruhe en 1860. No puede concebirse la formulación de

la ley periódica en las propuestas de la tabla sin tener en cuenta estas ideas y, sobre todo, los pesos atómicos, lo que permite ver que en la construcción del conocimiento se nutre de muchas ideas que confluyen y hacen su aporte.

Una contribución importante, que le dio fulgor especial a la tabla periódica, fueron las triadas de Döbereiner (1817), quien fue el primero en notar la existencia de relaciones en varios grupos de tres elementos con propiedades químicas similares. Así, encontramos la triada del cloro, el bromo y el yodo, en la que el peso atómico del bromo se puede obtener con el promedio del peso del cloro y el yodo ( $Cl = 35,470$  y  $I = 126,470$ ), lo que da  $80,970$ , muy cercano al actual, que es de  $79,904$ . Las triadas revelaron más que relaciones numéricas, mostraron relaciones químicas entre los constituyentes, bien reflejadas en algunos casos, pero en otros, como en la triada de carbono, nitrógeno y oxígeno, no ajustaban. Para 1864 había 63 elementos, pero las triadas no reunían todos los elementos, por lo cual el reto de la periodicidad seguía vigente (**Scerri**, 2008) Figura 2.

Las triadas parecen ser el camino que siguió Mendeléyev para lograr la aceptación de la ley periódica que propuso, aunque las discusiones de los historiadores se dividen frente a si lo más importante fue la adaptación de los

Masa atómica (1850)			Número atómico		
Li	7		Li	3	
Na	23	$(7+39)/2 = 23$	Na	11	$(3+19)/2 = 11$
K	39		K	19	
Ca	40		Ca	20	
Sr	87	$(40+137)/2 = 88,5$	Sr	38	$(20+56)/2 = 38$
Ba	137		Ba	56	
P	31		P	15	
As	75	$(31+122)/2 = 76,5$	As	33	$(15+51)/2 = 33$
Sb	122		Sb	51	
S	32		S	16	
Se	78	$(32+128)/2 = 80$	Se	34	$(16+52)/2 = 34$
Te	128		Te	52	
Cl	35,5		Cl	17	
Br	80	$(35,5+127)/2 = 81,3$	Br	35	$(17+53)/2 = 35$
I	127		I	53	

H							He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

**Figura 2.** Algunas triadas exitosas de Döbereiner y su ubicación en la tabla periódica (elaboradas a partir de **Scerri**, 2008)

elementos existentes o las predicciones realizadas (Brito, 2005). Al examinar lo que hizo con las triadas, podemos tomar partido. Mendeléyev hizo una comparación de pesos atómicos de la siguiente forma:

$$\begin{matrix} 23(\text{Na}) & 39(\text{K}) & 85(\text{Rb}) & 133(\text{Cs}) \\ 2\text{Li}(7 \text{ o } 14) & 24(\text{Mg}) & 65(\text{Zn}) & 112(\text{Cd}) \end{matrix}$$

Aquí surgen dudas sobre si el elemento referido era el litio u otro, lo cual no fue claro en sus comunicaciones (Scerri, 2008); también se observa que sus primeras relaciones fueron horizontales, no verticales, y puede apreciarse el espíritu de las triadas. En sus predicciones la noción de triadas es rescatable, como la que sigue:

	S (32)	
As(75)	Se ?	Br (80)
	Te (127,5)	

donde el peso atómico del selenio se determina con bastante exactitud al relacionar los elementos horizontales y verticales:

$$(32 + 75 + 80 + 127,9) / 4 = 79$$

De esta forma, las triadas, aunque aisladas, fueron árboles primordiales del gran bosque llamado tabla periódica, y se convirtieron en bases del juego que llevó a Mendeléyev y a los demás científicos a proponer relaciones más amplias entre los elementos. A este aporte debe sumarse el de Newlands, a quien se atribuye una hazaña anterior a la de Mendeléyev por sugerir la inversión del telurio y el yodo, dejando a este más a la derecha, lo cual vemos en la tabla periódica actual, aun cuando el telurio posee mayor masa atómica que el yodo. Newlands fue más allá de la anécdota de comparar las octavas musicales con la organización de los elementos, ya que mostró una organización de los elementos conocidos hasta ese momento con las masas atómicas (Figura 3).

Debe recordarse también a Lothar Meyer, quien se disputa con Mendeléyev el honor de ser el “padre” de la tabla periódica, pero cuya tabla, que debió publicarse en 1868, solo fue publicada 25 años después (Figura 4).

Los nombres, los símbolos, las definiciones y los hechos históricos que rodean la aparición de la tabla periódica sirven para alfabetizar en ciencias y para ayudar a comprender cómo se da forma al conocimiento científico mediante el análisis de esos pequeños cambios aportados por cada científico como pilares de una ciencia colectiva, la cual constituye una visión más real de lo que verdaderamente sucede con los avances científicos y desvirtúa la forma predominante de adjudicarlos a una sola persona, opacando, así, las pequeñas contribuciones de los diversos científicos. La tabla periódica, entonces, no puede atribuirse únicamente a Mendeléyev, ni a Meyer, ya que su perfeccionamiento se debe a la contribución de, por lo menos, cinco científicos (aunque sería posible citar a 15, o incluso más, pues no cuentan exclusivamente quienes trabajaron directamente en la idea de una tabla periódica, sino también quienes aportaron conceptos relacionados). Una ciencia colectiva desmitifica al héroe solitario, desmitifica un trabajo individual y pone de relieve que todos podemos aportar un grano de arena (Tabla 1).

No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.
H 1	F 8	Cl 15	Co & Ni 22	Br 29	Pd 36	I 42	Pt & Ir 50
Li 2	Na 9	K 16	Cu 23	Rb 30	Ag 37	Cs 44	Os 51
G 3	Mg 10	Ca 17	Zn 24	Sr 31	Cd 38	Ba & V 45	Hg 52
Bo 4	Al 11	Cr 19	Y 25	Ce & La 33	U 40	Ta 46	Tl 53
C 5	Si 12	Ti 18	In 26	Zr 32	Sn 39	W 47	Pb 54
N 6	P 13	Mn 20	As 27	Di & Mo 34	Sb 41	Nb 48	Bi 55
O 7	S 14	Fe 21	Se 28	Ro & Ru 35	Tc 43	Au 49	Th 56

Figura 3. Organización periódica propuesta por Newlands en 1865 (elaborada a partir de Scerri, 2017)

1	2	3	4	5	6	7	8
		Al=27,3	Al=27,3				C=12,00
							16,5
							Si=28,5
Cr=52,6	Mn= 55,1	Fe= 56,0	Co=58,7	Ni=58,7	Cu=63,5	Zn=65,0	44,5
	49,2	48,9	47,8		44,4	46,9	44,5
	Ru=104,3	Rh=103,4	Pd=106,0		Ag=107,9	Cd=111,9	Sn=117,6
	92,8=246,4	92,8=246,4	93=2,465		88,8=244,4	88,3	89,4=241,7
	Pt=197,1		Os=199		Hg=200,2	Hg=200,2	Pb=207,0
9	10	11	12	13	14	15	16
			Li=7,03	Be=9,03			
			16,02	14,7			
N=14,4	O=16,0	F=19,0	Na=23,05	Mg=24,0			
16,96	16,07	16,46	16,08	16			
P=31,0	S=32,07	Cl=35,46	K=39,13	Ca=40,0	Ti=48	Mo=92,0	
44	46,7	44,5	46,3	47,6	42	45	
As=75,0	Se=78,8	Br=79,9	Rb=85,4	Sr=87,6	Zr=90,0	Vd=137,0	
45,6	49,5	46,8	47,6	49,5	47,6	47	
Sb=120,6	Te=128,3	I=126,8	Cs=133,0	Ba=137,1	Ta=137,6	W=184,0	
87,4=243,7			71				
Bi=208,0			Te=204,0				

Figura 4. Tabla periódica propuesta por Meyer en 1868 y publicada en 1895 (elaborada a partir de Scerri, 2017)

Tabla 1. Algunos de los científicos predecesores de Mendeléyev

1829	1862	1866	1868
Johan Döbereiner	Alexandre-Emile Beguyer de Chancourtois	John Alexander Newlands	Julius Lothar Meyer

## La celebración del año internacional de la tabla periódica

La celebración de los 150 años de la tabla periódica es un hecho muy significativo para todos los interesados en promover la ciencia. Es una ocasión para participar con entusiasmo y es por ello que queremos hacer las siguientes sugerencias en torno a actividades que podrían desarrollarse.

### Para los profesores

- Hacer videos sobre los diferentes elementos químicos que sean cortos (3 minutos) y con un contenido que no se limite únicamente a datos sino que incorpore ideas innovadoras. En este sentido, uno de los autores de este ensayo, el profesor Molina, organizó una convocatoria dirigida a docentes de colegio para la cual ya se han recibido alrededor de 200 videos sobre diferentes elementos químicos que pueden verse en el canal de “YouTube Manuel F Molina”, en la lista de reproducción “Mi Elemento-Videos Tabla Periódica” ([https://www.youtube.com/watch?v=PoTIVHr15zs&list=PL3pSzpYZBdHOhtK7A39\\_ryHUAwf8T\\_VO3&index=1](https://www.youtube.com/watch?v=PoTIVHr15zs&list=PL3pSzpYZBdHOhtK7A39_ryHUAwf8T_VO3&index=1)).

Construir objetos tridimensionales para representar las propiedades de cada elemento, tales como cubos, triángulos, octaedros, etc.

Con respecto a los cubos, este proyecto se describirá en una próxima entrega sobre la tabla periódica. Serán cubos con información de cada elemento, algunos de tamaño pequeño (10x10) y otros grandes (80x80), cuyo fin es hacer una exposición de los elementos químicos y un concurso de conocimientos. Este proyecto cuenta con el apoyo de la *American Chemical Society* (ACS). Esta tabla periódica hecha con cubos será emblema del “3-Festival de Química”, a realizarse el 23 de octubre de 2019 en las instalaciones del Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, el cual ya se ha organizado en años anteriores (Molina & Carriazo, 2019).

- Elaborar murales para dejar una huella de la tabla periódica en diferentes lugares (salones, laboratorios, paredes, etc.). Los murales pueden ser de la tabla periódica tradicional o propuestas de representación que incluyan otra forma de verla.
- Concursos sobre el conocimiento de los diferentes elementos. En el sitio de internet de la IUPAC (2019) es posible participar en un desafío de preguntas relacionadas con los elementos químicos (<https://iupac.org/100/pt-challenge/>). La siguiente pregunta es un ejemplo de las incluidas en dicha página:

#### ¿Cómo se descubrió el fósforo?

- Por un alquimista que intentaba encontrar la piedra filosofal.
- Su descubrimiento se describe en la Biblia.
- Accidentalmente, por el famoso químico Berzelius.
- Por un minero al intentar disolver la roca de fosfato con ácidos.

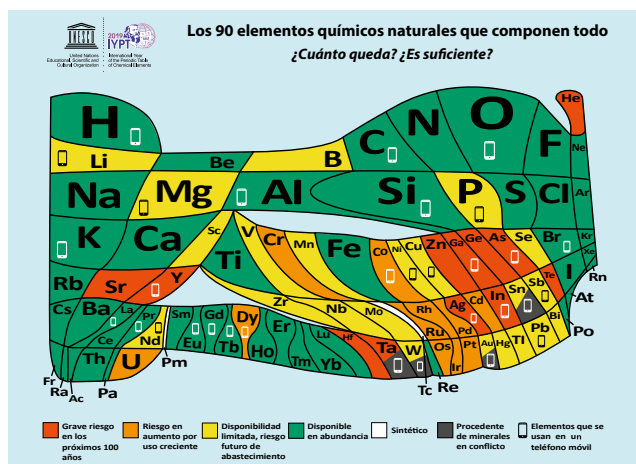


Figura 5. Tabla periódica de la abundancia de los 90 elementos naturales (Tomada de: <https://www.euchems.eu/euchems-periodic-table/>)

<b>Co</b>	<b>Li</b>	<b>Br</b>	<b>I</b>
Cobalto	Litio	Bromo	Iodo
<b>Te</b>	<b>Ac</b>	<b>H</b>	<b>Er</b>
Telurio	Actinio	Hidrógeno	Erbio

Figura 6. Palabras en español e inglés construidas con símbolos de elementos químicos

- Hacer presentaciones, conferencias, trabajos y otras actividades relacionadas con los usos y la abundancia de los elementos químicos. Para esto se puede utilizar la tabla periódica de la Figura 5, propuesta por la *European Chemical Society* (<https://www.euchems.eu/>), a partir de la cual se pueden tomar uno o varios elementos y estudiar su abundancia a nivel global, sus usos, las cuestiones sociales que se suscitan en torno a su obtención, su reciclaje y posibles soluciones para disminuir el consumo de aquellos elementos que poseen un grave riesgo de disponibilidad.

### Para personas interesadas

- Imprimir una camiseta, una gorra, una bufanda u otra prenda con el elemento favorito o una alusión a la tabla periódica (Figura 6).
- Regalar una tabla periódica como obsequio de fechas especiales o de recordatorio de viajes. Existen diferentes representaciones de la tabla disponibles en papelerías o en tiendas virtuales.
- Aprender acerca de los elementos químicos. Hay páginas de internet que ofrecen información e imágenes impactantes de los diferentes elementos químicos, por ejemplo, <https://periodictable.com/>

## Conclusiones

La celebración del Año Internacional de la Tabla Periódica haciendo énfasis en la enseñanza del lenguaje de la Química y la historia de la ciencia contribuye a formar personas que entiendan el proceso de la construcción de conocimiento y a divulgar la Química de forma adecuada. Unámonos a esta importante celebración y exaltemos su ícono: 2019 IYPT.

## Contribución de los autores

El presente escrito surgió de un acuerdo de los autores, que contribuyeron por igual a su elaboración y redacción. LPF contribuyó especialmente con la parte del lenguaje de la Química y MMC con lo concerniente a la construcción de conocimiento.

## Conflicto de intereses

Ninguno que declarar.

## Referencias

- Brito, A., Rodríguez, M. A., Niaz, M.** (2005). A reconstruction of development of the periodic table based on history and philosophy of science and its implications for general chemistry textbooks. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*. **42** (1): 84-111.
- Cervantes, E. & Gutiérrez, P. R.** (2014). Actitudes de los estudiantes de bachillerato ante la educación científica. Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Juárez (México).
- del Carmen Olivera, A., Mazzitelli, C. A., Guirado, A. M.** (2015). El conocimiento construido por los alumnos en las clases de Química. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*. **14** (1): 77-94.
- European Chemical Society.** (2019). EuChemS Periodic Table. Fecha de consulta: 21 de junio de 2019. Disponible en: <https://www.euchems.eu/>
- Galagovsky, L. R., Rodríguez, M. A., Stamat, N., Morales, L. F.** (2003). Representaciones mentales, lenguajes y códigos en la enseñanza de ciencias naturales. Un ejemplo para el aprendizaje de concepto de "reacción química" a partir del concepto de "mezcla". *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*. **21** (1): 107-121.
- IUPAC.** (2019). Periodic Table Challenge. Fecha de consulta: 21 de junio de 2019. Disponible en: <https://iupac.org/100/pt-challenge/>
- Joag, S.D.** (2014). An effective method of introducing the periodic table as a crossword puzzle at the high school level. *Journal of Chemical Education*. **91** (6): 864-867.
- Lewandowsky, S., Gignac, G. E., Vaughan, S.** (2013). The pivotal role of perceived scientific consensus in acceptance of science. *Nature Climate Change*. **3** (4): 399-402.
- Martí-Centelles, Vicente; Rubio-Magnieto, J.** (2014). ChemMend: A Card Game To Introduce and Explore the Periodic Table while Engaging Students' Interest. *Journal of Chemical Education*. **91** (6): 868-871.
- Molina, M. F.** (2019). Mi Elemento-Videos Tabla Periódica. Fecha de consulta: 21 de junio de 2019. Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=PoTIVHr15zs&list=PL3pSzpYZBdHOhtK7A39\\_ryHUAwf8T\\_VO3&index=1](https://www.youtube.com/watch?v=PoTIVHr15zs&list=PL3pSzpYZBdHOhtK7A39_ryHUAwf8T_VO3&index=1)
- Molina, M. F. & Carriazo, J. G.** (2019). Awakening Interest in Science and Improving Attitudes toward Chemistry by Hosting an ACS Chemistry FeSTiVAI in Bogotá, Colombia. *Journal of Chemical Education*. **96** (5): 944-950
- PeriodicTable.** (2019). The Photographic Periodic Table of the Elements. Fecha de consulta: 21 de junio de 2019. Disponible en: <https://periodictable.com>
- Rodríguez, B. F. C. & Hernández, T. E.** (2016). El lenguaje como una estrategia para el aprendizaje de los temas del currículo de las ciencias. *Bio-grafía. Escritos sobre la biología y su enseñanza*. **9** (17): 73-88.
- Scerri, E.** (2008). The role of triads in the evolution of the periodic table: Past and present. *Journal of Chemical Education*. **85** (4): 585.
- Scerri, E. & Worrall, J.** (2001). Prediction and the Periodic Table. *Studies in History and Philosophy of Science*. **32A**: 407-452.
- Schwartz, A. T.** (2007). *The Periodic Table: Its Story and Its Significance* (Eric R. Scerri). New York, Estados Unidos de América: Oxford University Press.
- Scerri, Eric.** (2017). El descubrimiento de la tabla periódica como un caso de descubrimiento simultáneo. *Epistemología e Historia de la Ciencia*. **2** (1): 82-97.
- Waterloo University.** (2019). iyp-2019-timeline-elements-poster. Fecha de consulta: 21 de junio de 2019. Disponible en: <https://uwaterloo.ca/chem13-news-magazine/may-2019/feature/iyp-2019-timeline-elements-poster>

## Los lantánidos: ni tierras ni raras

✉ Fernando Echeverri L.\*, ✉ John Jairo Parra B.

Universidad de Antioquia, Instituto de Química, Medellín, Colombia

### Resumen

La tabla periódica de los elementos contiene la base fundamental del conocimiento pasado, presente y futuro de la Química. Sin embargo, aún se proponen modelos adicionales y complementarios para tratar de satisfacer todas y cada una de las propiedades físicas y químicas, en especial de aquellos elementos que actualmente no se ajustan a ella. Algunas de esas desviaciones seguramente tendrán explicaciones por aproximaciones cuánticas, obviamente desconocidas en el tiempo de la propuesta original. Específicamente, existen dos situaciones relevantes clásicas, relacionadas con las tierras raras y los actínidos, que involucran unos 30 elementos. Estos se muestran como anexos por fuera del orden previsto y, por sus características de grupos, se organizan como períodos. A pesar de los debates en torno a la reubicación de dichos elementos, que realmente no es un mero ejercicio académico, las tierras raras son valiosos materiales con múltiples aplicaciones en la vida diaria y, además, tienen un papel fundamental en el equilibrio económico y político mundial. En este artículo se presentan varios aspectos relacionados con su posición en la tabla periódica, así como las propiedades estructurales y electrónicas de sus favorables y anómalos comportamientos, sus aplicaciones y el contexto internacional por la hegemonía mundial basada en el uso de sus elementos. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Lantánidos; Tierras raras; Configuración; Orbital *f*; Tabla periódica; Reasignación de la posición; Materiales estratégicos; Aplicaciones; Economía y política; China *Vs.* Estados Unidos.

### The lanthanides: neither earths nor rare

### Abstract

The periodic table of elements contains the fundamental basis of past, present, and future knowledge of Chemistry. However, additional and complementary models are still proposed to try to satisfy the unique physical and chemical properties of those that do not conform to it. Some of these questions will surely have explanations based on quantum approaches, obviously unknown in the time of the original proposal. In the periodic table, there are two typical relevant situations related to rare lands and actinides, involving about 30 elements. These are displayed as annexes outside the intended order and having group characteristics, they are organized as periods. Despite discussions regarding the relocation of these elements, which is not an irrelevant academic exercise, rare earths are now valuable materials with multiple applications and they have a fundamental role in economic balance and global politics. This article presents several aspects related to their position in the periodic table, as well as the structural and electronic properties of their favorable and unusual behaviors, their applications, and the international context for global hegemony founded on this type of elements. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Lanthanides; Rare earths; Configuration; *f*orbital; Periodic table; Position reassignment; Strategy material; Application; Economy and politics; China vs USA.

### Introducción

Están en todos partes y vienen en múltiples colores y tamaños, crean interrogantes en todo momento, hacen más gratas nuestras vidas, pero su obtención requiere de largos procesos. En el peor de los momentos, son motivo de agrias disputas entre dos rivales que antes compartían todo. Son los elementos de las tierras raras, los cuales han sido objeto de casi dos siglos de investigación mediante laboriosos procesos que hoy se consideran rudimentarios, y de técnicas analíticas muy limitadas; por ello su purificación y sus aplicaciones han sido un reto para el ingenio humano. Aún contienen propiedades por explorar que pueden mejorar la

calidad de nuestra vida, o terminarla, o modularla, ya que recientemente se han constituido en una herramienta valiosa del equilibrio geopolítico y económico mundial. Se podría afirmar con certeza que las aplicaciones tecnológicas y científicas de las tierras raras han marcado un hito en los últimos dos decenios y que durante los próximos años sus nuevos usos incidirán de manera notable en el transporte, la generación de energía y la computación, entre otros.

#### \*Correspondencia:

Fernando Echeverri; [fernando.echeverri@udea.edu.co](mailto:fernando.echeverri@udea.edu.co)

**Recibido:** 17 de junio de 2019

**Aceptado:** 28 de junio de 2019

**Editor:** Sonia Moreno



¿Qué tienen de especial las tierras raras, por qué se debate su posición en la tabla periódica, cuáles son sus usos y por qué son tan importantes en el ámbito mundial? Estos interrogantes se abordan en este ensayo, pero para responderlos es necesario ubicarse en el contexto de la racionalidad de la tabla periódica, que justamente ahora está cumpliendo 150 años.

## La tabla periódica

Algunos elementos químicos que hoy conocemos se originaron en los primeros tiempos del universo, en una secuencia de reacciones que permitió generar la serie completa desde el hidrógeno hasta el hierro, dándose posteriormente el fenómeno de la fisión nuclear. A partir del hierro, el elemento más estable en la naturaleza, se empieza a presentar la fusión nuclear, para crear casi todos los demás elementos.

La tabla periódica vigente es una ordenación de los elementos químicos (63) y fue propuesta por el ruso Dmitri Mendeléiev, el alemán Julius Lothar Meyer y el inglés William Odling en 1869 con base en las ideas del italiano Stanislao Cannizzaro, después de haber asistido al primer Congreso Internacional de Química Pura y Aplicada realizado en Alemania. Su primera formulación se hizo en función de los pesos atómicos. En 1871 el mismo Mendeléiev publica la segunda versión de su tabla y agrupa los elementos en columnas y grupos. En 1911, antes de que se descubrieran los protones en el núcleo atómico, el físico aficionado Antonius van den Broek propuso en la revista *Nature*, que el orden de los elementos en la tabla periódica dependía del número de cargas positivas del núcleo, o sea, el número atómico. En 1913 Henry Moseley logra probar esa hipótesis estudiando los espectros de rayos X de 50 elementos químicos.

Ahora bien, en la propuesta original hubo otro hallazgo importante y es que con dicho ordenamiento se generaban conjuntos de elementos que tenían propiedades químicas muy similares y que hoy se conocen como grupos, de los cuales hay 18 según la IUPAC. También se ha establecido un tercer descriptor de los elementos en la tabla, llamado el bloque, que hace relación a la ocupancia de orbitales por los electrones y toman el nombre de estos, por lo tanto, los bloques se denominan *s*, *p*, *d* y *f*. Este aporte se debió al químico norteamericano Glenn Seaborg, quien murió en 1999 a los 86 años de edad.

Estos son algunos datos curiosos de la tabla: el bromo (Br), el mercurio (Hg) y el galio (Ga) en condiciones normales son líquidos y el francio se vuelve líquido dependiendo de la temperatura ambiente; hay 11 gases, y varias decenas de otros elementos sintéticos, algunos con cortísimas vidas medias. El astato ( $Z=85$ ) es el segundo elemento más escaso en el planeta y emite una cantidad muy grande de radioactividad, por lo que, en vez de usarse con fines nucleares, se ha podido aprovechar en radioterapia en células cancerosas. El berkelio (Bk,  $Z=97$ ), elemento químico radioactivo, es el más escaso del planeta, porque se genera por la descomposición del uranio enriquecido

(U-239), lo que deja solamente unos átomos de berkelio. Los nombres de los elementos responden a los de países, ciudades, científicos, procesos, mitología, color, apariencia, grado de dificultad del proceso de obtención, etc. Solo uno lleva el nombre de una mujer, el meitnerio, y otro es compartido, el curio. Y hay desviaciones importantes, pues, por ejemplo, el agua no debería ser líquida en su estado natural, sino gaseosa.

En la tabla de Mendeléiev quedaron los huecos para predecir la existencia de algunos elementos descubiertos poco después, como el galio (1875), el escandio (1879), el germanio (1887), y el tecnecio (1937). Su descubrimiento posterior fue el sello de garantía de la precisión y racionalidad de orden propuesto. Sin embargo, a pesar de su exactitud, aún tiene puntos en discusión y, por ello, continuamente se proponen diferentes modelos u ordenamientos (Rich & Laing, 2011), entre ellos el helicoidal, el esférico, el tetraédrico (Stewart, 2018), así como 32 columnas o grupos en vez de las 18 existentes (Lemonick, 2019). Todo esto para tratar de acomodar las propiedades “anómalas” de algunos elementos en el esquema original.

## Tierras raras, ni tan raras ni tan escasas

La denominación de tierras raras es algo confusa: el término “tierra”, que parece un poco arcaico, proviene de la antigua denominación que se daba a lo que hoy se conoce como óxidos, y que correspondía a materiales con apariencia amorfa, insolubles en agua y que no cambiaban su estado físico con el calentamiento. Erróneamente se considera que la palabra “rara” se adoptó por su baja concentración en los materiales a partir de los cuales se purificaban, pero varios de ellos son más abundantes incluso que los metales preciosos o que el mismo cobre y el plomo. También cabe la acepción de que se trataba de elementos que se utilizaban muy raramente, pues para la época de su descubrimiento tenían poca utilidad práctica. Pero, ante todo, la palabra hace referencia a la dificultad para extraerlos y purificarlos, tanto la de aquellos materiales que los contenían en forma bruta, como la de los que tenían propiedades químicas muy similares, lo que entorpecía extremadamente su separación.

Las tierras raras corresponden a una serie de elementos que se encuentran en una posición especial dentro de la tabla periódica y cuya comprensión requiere un análisis más a fondo, desde una perspectiva no rigurosamente mecánico-cuántica. Los electrones en los átomos se encuentran en la periferia del núcleo ocupando niveles; de ellos se conocen los niveles K, L, M, N, O, P y Q (1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, en términos actuales), los que, a su vez, están constituidos por subniveles (*s*, *p*, *d*, *f*), que pueden contener 1, 3, 5 y 7 orbitales, respectivamente, pero cada uno de ellos puede alojar solamente hasta dos electrones. Sin embargo, hay dos limitantes para situarlos. La primera es que hay un número máximo de electrones en cada orbital, nivel y subnivel, y la segunda es que estos se llenan en orden de menor a mayor energía, independientemente de la secuencia de los orbitales.

En otras palabras, es probable que se ocupen primero los orbitales externos antes que otros internos, como en el caso del potasio y del calcio. Ahora bien, a medida que se incrementa el número de electrones y se llenan los niveles más externos, comienzan a observarse las influencias de otros factores, explicables por aproximaciones cuánticas. En el caso del cobre, por ejemplo, es curioso que su distribución electrónica sea  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1 3d^{10}$  y no  $\dots 4s^2 3d^9$ . Esto es muy importante en algunas propiedades de las tierras raras.

Casi todas las tierras raras se originaron en dos materiales provenientes de sendas minas suecas, una de ellas en Itterby, por lo que se le dio el nombre de iterbita, y la otra en Bastnäs, en la cual se encontró la cerita (**American Chemical Society**, 1999). Secuencialmente, de ellas fueron obteniéndose productos que se clasificaron inicialmente como elementos puros, pero, posteriormente, algunos de ellos demostraron ser una mezcla. De la iterbita se generaron el itrio, el terbio, el erbio, el tulio, el disprosio, el holmio, el iterbio y el lutecio, y de la cerita, el cerio, el lantano, el praseodimio, el neodimio, el gadolinio, el samario y el europio. El praseodimio solamente se obtuvo en 1947 y constituye un elemento radioactivo generado por la descomposición del uranio.

Las tierras raras no se encuentran en la naturaleza en forma libre, como otros elementos; se hallan en minerales muy específicos como la allanita, la loparita, la parisita, la apatita, la monazita y otros (**Balaram**, 2018). Durante la Segunda Guerra Mundial fueron contaminantes de los materiales fisionables necesarios para fabricar la bomba atómica; esos conocimientos de los procesos de separación son la base para producirlos a escala industrial actualmente, y se basan fundamentalmente en el intercambio iónico (**American Chemical Society**, 1999).

### La rara posición y agrupación de las tierras raras en la tabla periódica

Según la *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), las tierras raras corresponden a quince elementos de los llamados lantánidos ( $Z=57$  a  $Z=71$ ), además del escandio y el itrio. Ellos, a su vez, se han dividido en dos series según su masa molecular: los lantánidos pesados, o ítricos, que son de menor concentración e incluyen el europio, el gadolinio, el terbio, el disprosio, el holmio, el erbio, el tulio, el iterbio y el lutecio, y los ligeros o céricos, como el lantano, el cerio, el praseodimio, el neodimio, el prometio y el samario.

Dentro de la tabla periódica las tierras raras hacen parte del grupo 3 (que define sus propiedades químicas), el período 6 (ordenados de acuerdo con el número creciente de protones), y el bloque  $f$ , que indica la presencia de electrones en ese orbital. De esta manera, los elementos de los lantánidos se incluyen como un periodo de acuerdo con su número atómico creciente (secuencia de izquierda a derecha en la tabla), pero por sus propiedades químicas son más bien

un grupo (secuencia de arriba abajo). Realmente no tuvieron una posición definida en la tabla hasta que Glenn Seaborg, por comodidad gráfica, propuso localizarlos como una extensión del período VI, pero fuera de la misma tabla, algo que también tuvo que hacerse con los Actínidos (**Lemonick**, 2019). Es curioso, además, que ni en la misma tabla de la IUPAC se ha definido si el lantano y el actinio, o el lutecio y el laurencio, son elementos del grupo 3 (figura 1) (**IUPAC**, 2018).

La distribución electrónica de las tierras raras corresponde a la fórmula general  $4f^{n+1} 5s^2 5p^6 6s^2$ . La disponibilidad de los tres electrones de los subniveles  $5d$  y  $6s$  hace que todos ellos sean trivalentes, incluidos el escandio ( $3d 4s$ )<sup>3</sup>, el itrio ( $4d 5s$ )<sup>3</sup> y el lantano ( $5d 6s$ )<sup>3</sup>, pero estos últimos no tienen electrones en el orbital  $f$ . Esto representa una diferencia fundamental frente a los demás elementos, ya que el orbital  $4f$  se va llenando paulatinamente, desde 0 electrones en el lantano hasta 14 electrones en el lutecio, pero hay que tener en cuenta que se presentan algunas excepciones en las que los electrones ocupan el subnivel  $5d$  en vez de llenar el  $4f$  por razones de energía y distancia entre el núcleo y el orbital (Ce y el Gd). Por otra parte, los electrones de este orbital no participan en la formación de enlaces y, por lo tanto, no afectan su comportamiento químico, pero son la causa principal de las anómalas propiedades físicas de los elementos de las tierras raras que se explotan comercialmente.

### ¿Por qué son magnéticos y luminiscentes los elementos de las tierras raras?

Las peculiaridades de los elementos de las tierras raras, que incluyen efectos luminiscentes o fosforescentes y magnéticos, se explican fundamentalmente por los electrones del orbital  $4f$ . En este contexto, se debe recordar que el llenado de los subniveles se hace de manera secuencial y ordenada y que siempre se comienzan a llenar con electrones los orbitales menos energéticos, pero, además, los espines de los electrones se mantienen orientados paralelamente, que es la configuración más estable. El llenado de electrones es normal hasta que se llega al tercer nivel, pues a partir de allí comienzan a manifestarse los efectos del solapamiento de los orbitales  $4f$  con los electrones situados en  $5s$  y  $5p$ . Esto, a su vez, causa un incremento en la carga nuclear, por lo cual el tamaño efectivo de los átomos se contrae hasta en un 20 % dentro de la secuencia de lantano a lutecio, lo que se conoce como la llamada Contracción Radial o Lantánida (**Voncken**, 2016). De esta manera, en el caso extremo del gadolinio, que tiene la configuración  $[\text{Xe}] 4f^7 5d^1 6s^2$ , hay siete electrones no apareados que se comportan como pequeños magnetos que contribuyen en gran medida al momento magnético total de los metales de las tierras raras, creándose así magnetos permanentes. Estas propiedades son extensivas a otros metales cuando se producen aleaciones que contienen tierras raras. En el caso del escandio, el itrio y el lantano no hay electrones desapareados y, por lo tanto, carecen de magnetismo.

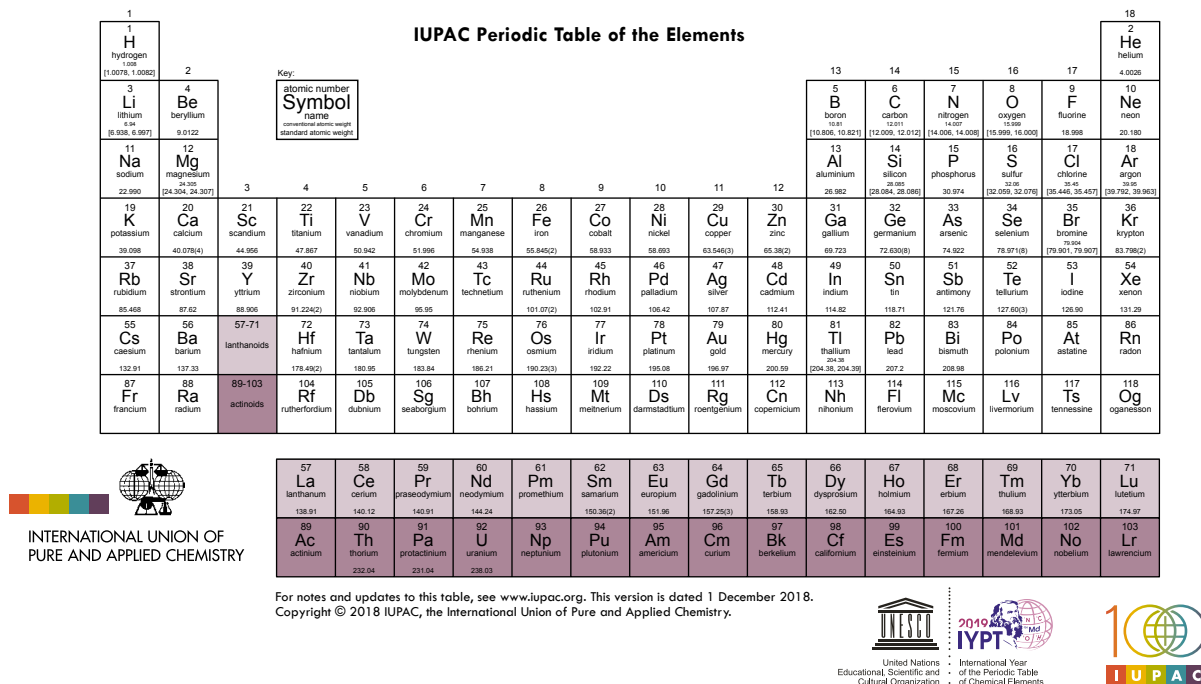


Figura 1. La tabla periódica según la IUPAC (IUPAC, 2018).

Los lantánidos presentan coloraciones verdes, rosadas y amarillas. Dichos colores son el resultado de la transición de un electrón entre diferentes orbitales *f* existentes (transición *f-f*). Esa diferencia es tan pequeña que basta la energía UV para excitarlos y generar luminiscencia por su efecto, lo que se aprovecha en el billete de 50 euros, al cual se añade una sal de europio que le da su fluorescencia característica cuando se observa bajo este tipo de luz (Ganguli & Cook, 2018).

Por otra parte, y debido a lo anterior, la diferencia energética de los electrones de los orbitales *4f* y *5d* es tan pequeña que es fácil promover un electrón del orbital *f* al *d*, generando la forma tetravalente del cerio, o bien, que un electrón del orbital *5d* sea transferido al *4f*, con lo cual se explica el carácter divalente de metales como el samario, el europio y el iterbio (Voncken, 2016).

### Las tierras raras están en todas partes

Si la vida moderna se midiera por la frecuencia de uso y la presencia de diversos materiales, indudablemente que los plásticos y los elementos de las tierras raras se llevarían el palmarés. No obstante, el empleo original de estos últimos es modesto, pues en sus inicios la utilidad más común era para fabricar piedras de encendedores.

Aunque algunas aplicaciones están aún en fase de experimentación, hoy son elementos tecnológicamente vitales y fuente de bienestar humano, y se emplean en las siguientes aplicaciones (Deacon & Junk, 2014; Gschneidner & Pecharsky, 2006; Voncken, 2016; Ritter, 2017; Balaram, 2018; Behrsing & Kirkpatrick, 2019): catalizadores, baterías y motores de carros eléctricos, procesos petroquímicos,

computadores, discos duros, lectores de CD, tecnología nuclear, televisores y pantallas (color verde con terbio y rojo con europio), autenticidad de billetes, decoración, iluminación, turbinas eólicas, óptica y pulimiento de vidrio y cristales, lámparas LED, láseres, fibra óptica, tubos catódicos, resonancia magnética de imágenes para diagnóstico, micrófonos, audífonos y un largo etcétera que incluye también elementos para defensa y ataque (aviones, barcos, tanques, submarinos, radares). Se augura que pronto habrá carros eléctricos con motores sin ineficientes engranajes y refrigeración basada en aleaciones que no requieren de gases ni de compresores. Tampoco la alta costura se ha olvidado de ellos, con el reemplazo de botones plásticos por piezas de neodimio. El gadolinio es especialmente importante en aleaciones refrigerantes, así como en el diagnóstico mediante resonancia magnética nuclear por los incrementos en la intensidad del campo de los tejidos que lo contienen y que se administra antes del examen.

### Las tierras raras como fuente de poder

Más allá del poder energético generado por las tierras raras, estas hacen parte importante del equilibrio tecnológico, económico y político del mundo. En China se concentra más del 70 % de la producción mundial, cifra que algunos ubican hasta en un 90 %, aunque tiene un poco más del 30% de las reservas mundiales (Balaram, 2018). Para 1987, el dirigente chino Deng Xiao Ping hizo la primera advertencia del potencial de las tierras raras: “Occidente tiene petróleo. China, las tierras raras.” (Hornby & Sanderson, 2019). Esto ha sido posible por razones especialmente interesantes,

como, por ejemplo, una planificación tecnológica a muy largo plazo y la presión importante sobre la competencia, que cerró las minas ante los precios momentáneamente bajos del mercado. La reactivación de una industria de este tipo tampoco es un proceso sencillo, corto y barato, puesto que pueden transcurrir casi diez años a partir de la prospección para que una mina comience a producir (iNemi, 2014; **Geological Society of London**, 2011). Pero adicionalmente, hay un factor que se esgrime para imponer cuotas mundiales y manejar los precios; China aduce que esos procesos son altamente contaminantes y corrosivos, y realmente lo son, y que, por lo tanto, debe preservar la salud de sus ciudadanos y cuidar el medio ambiente, lo que implica regular la producción de las tierras raras. Es cierto que parte de la basura final de la purificación consiste en ácido sulfúrico, soda cáustica, fluoruros, sulfuros e ingentes cantidades de agua, así como elementos radioactivos, con lo cual se deben extremar las precauciones y disponer cuidadosamente de esos residuos, lo que encarece y dificulta los procesos. Tal vez por esas razones de seguridad para sus connacionales y respeto a su medio ambiente es que Australia procesaba su materia prima en Malasia, pero cambios políticos recientes han revertido los acuerdos existentes (Law, 2019), por lo que, además de las tierras raras, Australia deberá encargarse de la deposición final de los cientos de miles de toneladas de desechos que se generan en ese proceso, incluidos el torio y el uranio.

Además de China y Australia, países como Estados Unidos, Brasil y Vietnam tienen significativas reservas de tierras raras, pero su producción es baja. En Colombia se desconoce si se han hecho intentos por reconocer la presencia de esos valiosos metales. Por otro lado, tanto las tierras raras como otros metales estratégicamente valiosos podrían explicar parcialmente por qué algunas empresas optan por importar rocas, tierra y piedra molida a través de los llamados ‘cobreductos’, así como los metales puros producidos *in situ*.

Valga una aclaración final. No se pueden confundir las tierras raras con otro mineral que también está estrechamente involucrado en procesos tecnológicos actuales, como es el coltán. Este contiene principalmente niobio y tantalio, pero tampoco se conoce un inventario nacional de sus existencias.

En algunos círculos financieros se considera que la amenaza de un embargo de esos materiales estratégicos por parte de China no tendría éxito, pues si bien ellos son productores, en Occidente esos metales se procesan y regresan a ese país como componentes importantes de sus productos tecnológicos (Binnemans, *et al.*, 2013). Sin embargo, pocos quieren correr un riesgo, como cuando en 2010 ese país embargó los envíos de tierras raras a Japón por una disputa territorial, afectando notablemente la producción de importantes empresas como Hitachi, Honda y Panasonic, multiplicando estratosféricamente su costo. Aunque hubo una reclamación ante la Organización Mundial del Comercio, solo se procedió a un fallo dos años después, cuando ya el daño económico estaba hecho.

El reciente embargo del presidente Trump a bienes de importación de China fue respondido por el presidente chino Xi Jinping con una visita a la ciudad de Ganzhou, (Stevenson, 2019), centro de producción de buena parte de las tierras raras, en una clara advertencia de su respuesta futura. Peor aún, cuando en China se procesaba la producción de Mountain Pass, la mina productora de tierras raras en Estados Unidos, ésta, que era prácticamente la única representante norteamericana del ramo, quebró en el 2002. Posteriormente, en el 2015 reactivó su producción, pero para el 2018 fue rematada al mejor postor por un precio irrisorio. No sobra mencionar que su principal comprador fue una empresa china (Kirkpatrick, 2019; Topf, 2017).

Por otra parte, estos vaivenes políticos han traído consigo una inestabilidad económica que multiplica el precio del kilogramo de tierras raras en 10 a 20 veces. Por esta razón, las iniciativas privadas de exploración y explotación tienen un alto riesgo, y solo factores de seguridad nacional, aunados a subsidios, podrían reactivar el negocio de las tierras raras en Occidente.

Visto que en una cadena de producción no se puede sustituir súbitamente un elemento químico por otro y que poner a funcionar una mina es tarea de casi un decenio, la opción más inmediata parece ser reciclar las tierras raras (Balaram, 2018; Binnemans, *et al.*, 2013), lo que no es fácil, porque ya está comprobada la dificultad para separarlos entre sí. Por otra parte, también se exploran otras fuentes como las minas de fertilizantes de fosfatos y los residuos de la combustión del carbón y de procesos nucleares. Occidente no está preparado para soportar el embargo de unos metales que, aunque carecen de una posición definida en la tabla periódica, tienen un puesto notable en el equilibrio geopolítico mundial.

## Conclusiones

A pesar de que la tabla periódica tiene indudable valor constitutivo y predictivo para la Química, aún queda por definirse la posición correcta de los elementos correspondientes a las tierras raras y los Actínidos. Es claro que situarlos como apéndices en una tabla bidimensional no satisface el ordenamiento básico propuesto por sus autores originales. Tal vez a través de la ‘multidimensionalidad’ y el empleo de parámetros cuánticos pueda llegarse a un modelo que incluya esos 30 elementos, que constituyen casi un 25% de los conocidos hasta ahora. Día tras día el ser humano hace ingentes esfuerzos por descubrir más elementos, obviamente a través de reactores nucleares o ciclotrones o aceleradores de partículas. Más allá de que su ubicación correcta pueda ser un ejercicio académico, con una tabla periódica homogénea y consistente existe la posibilidad de conocer más profundamente cómo se organiza la materia y de qué manera se pueden optimizar sus propiedades para el bienestar humano.

El aspecto científico tiene también un componente geopolítico. De manera muy simplista se puede afirmar que esos molestos electrones del orbital *f*, que tanto perturban

la armonía actual de la tabla periódica, son responsables de otra revolución tecnológica en la cual, entre otras cosas, el quemar y desperdiciar reservas fósiles para obtener energía serán ventajosamente sustituidos por procesos más limpios y eficientes que emplean el magnetismo y otras propiedades particulares de los elementos que constituyen las tierras raras. Esto siempre y cuando el orden mundial no se desordene y prevalezca la armonía tecnológica entre quienes poseen el recurso y quienes tienen el conocimiento para explotarlo en bien del ser humano. De otra manera, podríamos ser testigos de esa fatal premonición atribuida a Einstein: la cuarta guerra mundial se hará con palos y piedras.

### Contribución de los autores

Fernando Echeverri: idea y redacción. John Jairo Parra: revisión de la distribución electrónica y conceptos de la tabla periódica.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

### Referencias

- American Chemical Society.** (1999). Separation of rare earth elements. 1999. Fecha de consulta: 8 de junio de 2019. Disponible en: <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/education/whatischemistry/landmarks/earthelements/separation-of-rare-earth-elements-commemorative-booklet.pdf>
- Balaram, V.** (2018). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*. **10**: 1285-1303. Doi: 10.1016/j.gsf.2018.12.005
- Behrsing, T., Deacon, G.B., Junk, P.C.** (2014) The chemistry of rare earth metals, compounds and corrosion inhibitors. En: Forsyth, Maria, and Hinton, Bruce (editores.) *Rare Earth-based Corrosion Inhibitors*. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering (61). Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, p. 1-37.
- Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., Buchert, M.** (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal Cleaner Production*. **51**: 1-22.
- Ganguli, R., & Cook, D.** (2018). Rare earths: A review of the landscape. *MRS Energy & Sustainability*. **5**: E9. Doi: 10.1557/mre.2018.7
- Gschneidner, K.A., Jr & Pecharsky, V.K.** (2006). Rare Earths and Magnetic Refrigeration. *Journal of Rare Earths*. **24**: 641-647
- Hornby, L. & Sanderson, H.** (2019). Rare earths: Beijing threatens a new front in the trade war. *Financial Times*, Jun 3.
- IUPAC.** (2018). Periodic Table of Elements. Fecha de consulta: 8 de junio de 2019. Disponible en: <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>
- iNEMI.** (2014). White Paper: Rare Earth Metals Current Status & Future Outlook. iNEMI Rare Earth Metals Project Team Second Quarter. Fecha de consulta: 20 de junio de 2019. Disponible en: [http://thor.inemi.org/webdownload/projects/iNEMI\\_REM\\_Whitepaper.pdf](http://thor.inemi.org/webdownload/projects/iNEMI_REM_Whitepaper.pdf)
- Geological Society of London.** (2011). Rare Earth Elements. Fecha de consulta: 2 de junio de 2019. Disponible en: <https://www.geolsoc.org.uk/~media/shared/documents/policy/Rare%20Earth%20Elements%20briefing%20note%20final%20%20new%20format.pdf>
- Law, Y-H.** (2019). Politics could upend global trade in rare earth elements. *Science* **364**: 114-115. DOI: 10.1126/science.364.6436.114
- Lemonick, S.** (2019). Rearranging the table. *Chem Eng News*. **97**: 26-29.
- Kirkpatrick, K.** (2019). Electronics Need Rare Earths. *Communications ACM*. **62**: 17-18. Doi: 10.1145/3303847
- Rich, R.L. & Laing, M.** (2011). Can the periodic table be improved? *Educ. Quím.* **22** (2): 162-165.
- Ritter, S.K.** (2017). A whole new world for rare earths. *Chem Eng News*. **95**: 30-34.
- Stevenson, A.** (2019). China Faces New 'Long March' as Trade War Intensifies, Xi Jinping Says. *The New York Times*, May 21. Fecha de consulta: 8 de junio de 2019. Disponible en: <https://www.nytimes.com/2019/05/21/world/asia/xi-jinping-china-trade.html>
- Stewart, P.J.** (2018). Tetrahedral and spherical representations of the periodic system. *Foundations of Chemistry*. **20**: 111-120.
- Topf, A.** (2017). Mountain Pass sells for \$20.5 million. *Mining. Com.* Fecha de consulta: 20 de junio de 2019. Disponible en: <https://www.mining.com/mountain-pass-sells-20-5-million>
- Voncken, J.H.L.** (2016). *The Rare Earth Elements*, Springer Briefs in Earth Sciences, Dordrecht: Springer, 2016. 127 p. Doi: 10.1007/978-3-319-26809-5\_3

# Preliminary characterization of the dominant baroclinic modes of a tropical Andean reservoir during a dry period

Andrés Posada-Bedoya\*, Andrés Gómez-Giraldo, Ricardo Román-Botero

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

## Abstract

Field data and a simplified numerical model were used to investigate the dominant basin-scale internal waves in a tropical Andean reservoir during a dry period. The structure and period of the observed baroclinic oscillations were inferred from spectral analysis of the measured temperature records and the associated isotherm displacements. The dominant oscillation identified from the field data had a vertical structure made of two layers with vertical velocities oscillating out of phase (V2 mode) with a period of 24 h. The theoretical baroclinic vertical modes of the reservoir were estimated by using a simplified eigenfunction model that reproduced the period and vertical structure of the observed dominant mode, indicating also that the horizontal velocity oscillations in every layer were in phase (V2H1 mode) with a period close to 24 h. The wind forcing exhibited a periodic behavior dominated by the 24-h period component and, thus, we concluded that a V2H1 mode was dominant during the survey analyzed and it was excited by resonance with the diurnal wind-forcing. We modeled the reservoir as a linear damped forced mass-spring system to estimate the damping ratio of the baroclinic oscillations and we found that the motions were underdamped with a damping rate similar to the reported in other lakes around the globe. In addition, we estimated the gradient Richardson number due to the dominant V2H1 baroclinic mode and we found that the potential diapycnal mixing by shear was low. Finally, we discuss the vertical structure of the phase of the internal wave oscillations and the potential implications of the identified internal wave field for the ecology of the reservoir. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Baroclinic modes; Internal waves; Eigenmodes; Tropical Andean reservoir.

## Caracterización preliminar de los modos baroclinicos dominantes de un embalse tropical andino durante un período seco

### Resumen

A partir de datos de campo y un modelo numérico simple, se investigaron las ondas internas a escala de cuenco en un embalse tropical andino durante un período seco. La estructura y el período de las oscilaciones baroclinicas observadas, se infirieron a partir del análisis espectral de las series de temperatura medidas y de los desplazamientos verticales de las isotermas asociadas. El modo de oscilación dominante identificado a partir de los datos de campo constaba de dos capas que oscilaban con velocidades verticales y fases contrarias (modo V2), y con un período de 24 h. Los modos baroclinicos verticales teóricos del embalse se estimaron a partir de un eigenmodelo simple, el cual predijo el período y la estructura vertical del modo dominante identificado a partir de las observaciones, indicando también que las oscilaciones de la velocidad horizontal en cada capa estaban en fase (modo V2H1) y con un período natural cercano a 24 h. El forzamiento del viento mostró una variabilidad periódica con un período dominante cercano a las 24 h, por lo que concluimos que el modo V2H1 fue el dominante durante el período analizado y sometido a excitación por resonancia con el forzamiento diurno del viento. Se modeló el embalse como un sistema lineal masa-resorte, amortiguado y forzado, con el fin de estimar la relación de amortiguamiento de las oscilaciones baroclinicas, y se obtuvieron oscilaciones subamortiguadas con una tasa de amortiguamiento similar a la reportada en otros lagos alrededor del mundo. También se investigó el potencial del modo V2H1 en la generación vertical de turbulencia debido a inestabilidades cortantes usando el número de Richardson del gradiente, y encontramos que la producción de turbulencia era baja. Por último, se discuten aquí la estructura vertical de la fase en las oscilaciones de las ondas internas y las potenciales implicaciones del campo de ondas internas en la ecología del embalse. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Modos baroclinicos; Ondas internas; Eigenmodos; Embalse tropical Andino.

\*Corresponding autor:

Andrés Posada-Bedoya; [afposadab@unal.edu.co](mailto:afposadab@unal.edu.co); **Received:** December 2, 2018; **Accepted:** April 5, 2019; **Editor:** José Pabón Caicedo

## Introduction

The existing literature on physical limnology and its linkage with the water quality of temperate inland waters is prolific. However, the investigations in the tropics, and particularly in the tropical Andes, are scarce in spite of the fast growing of human populations in tropical regions, which has created serious environmental problems during the last decades for tropical lakes and reservoirs (Nilssen, 1984; Parinet, *et al.*, 2004). Tropical lakes differ from temperate lakes in a variety of aspects (Lewis Jr., 1987; Lewis Jr., 1996) and are likely more sensitive to environmental changes (climate, land use, population, invasive species, pollution) than temperate lakes (Lewis Jr., 2000). However, historical emphasis on the study of temperate lakes has biased our understanding of tropical lakes functioning in the context of physical and biogeochemical responses.

In the particular case of Colombia, numerous reservoirs for hydropower generation and water supply have been constructed during the last few decades to satisfy the growing energy and water demands of the country. Management of these reservoirs requires extensive knowledge and understanding of the physical processes responsible for water circulation, which influence directly water quality, demanding clarification of the predominant processes and time scales over which they evolve (Mortimer, 1974; Mortimer, 2004). Under this context, this paper focuses on the description of basin-scale internal waves, a predominant physical process, in a tropical Andean reservoir and discusses possible consequences on the water quality.

Stratified lakes and reservoirs can be regarded as three-dimensional, mechanical, viscously damped oscillators characterized by an infinite spectrum of baroclinic (i.e., internal motions in which isopycnal surfaces oscillate) oscillatory natural modes with characteristic periods and spatial structures (Monismith, 1985; Lemmin, *et al.*, 2005; Shimizu, *et al.*, 2008; Valerio, *et al.*, 2012). The characteristics of these natural modes depend on the shape of the basin and the vertical structure of the density field (Münnich, *et al.*, 1996; Fricker & Nepf, 2000) and are fundamental to the ecological functioning of lakes and reservoirs as they drive a variety of physical, chemical and biological processes (MacIntyre, *et al.*, 1999; Eckert, *et al.*, 2002; Serra, *et al.*, 2007; Evans, *et al.*, 2008; Hingsamer, *et al.*, 2014). These internal waves can produce turbulence and mixing through different mechanisms, such as the increased shear at the lake interior (Horn, *et al.*, 2001; Prusse, *et al.* 2010; Bouffard, *et al.*, 2012; Ulloa, *et al.*, 2015), interaction with the bathymetry, and a cascade of energy from basin-scale to high-frequency internal waves (Imberger, 1998; Boegman, *et al.*, 2003; Wüest & Lorke, 2003; Gómez-Giraldo, *et al.*, 2008). The basin-scale internal waves play an important role in the development of the turbulent boundary layer (Lemckert, *et al.*, 2004; Lorke, *et al.*, 2005; Simpson, *et al.*, 2011) and can resuspend

sediments and nutrients from the bottom and reincorporate them into the water column (Gloor, *et al.*, 1994; Pierson & Weyhenmeyer, 1994).

The natural modes are classified depending on the number of nodal points they have in the horizontal ( $j$ ) and vertical ( $i$ ) directions as  $V_iH_j$  (Figure 1S, <https://www.racecfyn.co/index.php/racecfyn/article/downloadSuppFile/799/3895>). The most commonly observed vertical baroclinic response is the  $V_1$  (Mortimer, 1953); however, higher vertical modes are not unusual (e.g., Wiegand & Chamberlain, 1987; Vidal, *et al.*, 2005; Vidal & Casamitjana, 2007; Pannard, *et al.*, 2011; Lorrain, *et al.*, 2011; Ulloa, *et al.*, 2018). The difference in the spatial structure of the modes leads to advection and mixing in different locations and, thus, it can drive mixing and turbulence at specific zones of the water column where high shear occurs (Wiegand & Chamberlain, 1987; MacIntyre, *et al.*, 1999; Hondzo & Haider, 2005; Henderson, 2016). The vertical structure of the oscillations can influence the circulation patterns in the lake (Vidal, *et al.*, 2005; Vidal, *et al.*, 2007; Ulloa, *et al.*, 2018) and affect the properties of the water withdrawn for the reservoir operation (Anohin, *et al.*, 2006), as well as the routes followed by substances and species entering to the reservoir from the inflow discharges (Cortés, *et al.*, 2014; Hogg, *et al.*, 2018). Vertical one modes typically lead to stronger dissipation around the basin perimeter through the turbulent boundary layer, while higher order vertical modes tend to dissipate more of its energy through increased shear at the interior of the lake (Simpson, *et al.*, 2011).

The description of the natural modes has been accomplished in the literature by the implementation of models with simple horizontal geometries (e.g., rectangular, circular, elliptical) and flat bottoms for layered (Heaps & Ramsbottom, 1966; Csanady, 1967; Antenucci & Imberger, 2001) and continuous stratification (Csanady, 1972; Monismith, 1987). However, they reveal little about real sloping bottoms. Münnich (1996) and Fricker & Nepf (2000) proposed two-dimensional eigenvalue numerical models taking account for a 2D arbitrary morphometry and continuous stratification. On the other hand, there is a family of eigenvalue layer-stratified models with irregular bathymetry that can incorporate better the two-dimensional (horizontal) features of the morphometry and have shown to accurately predict the natural modes of oscillation (Schwab, 1977; Bäuerle, 1998; Shimizu, *et al.*, 2007). In this work, we used a simple eigenmodel of the family of the rectangular flat bottom (Gill, 1982) to support our observations, even though we recognize the existence of more advanced models.

Previous studies have dealt with internal waves in Colombian inland waters (Vélez-Castaño & Gómez-Giraldo, 2011; Posada-Bedoya, *et al.*, 2017). However, none of them have been focused on the characterization of the internal waves during dry seasons. The dry season stratification particularly imposes a major restriction for the vertical mixing of the water column compared to other hydrological seasons of the tropical Andes hydrology and, thus, it is of critical interest

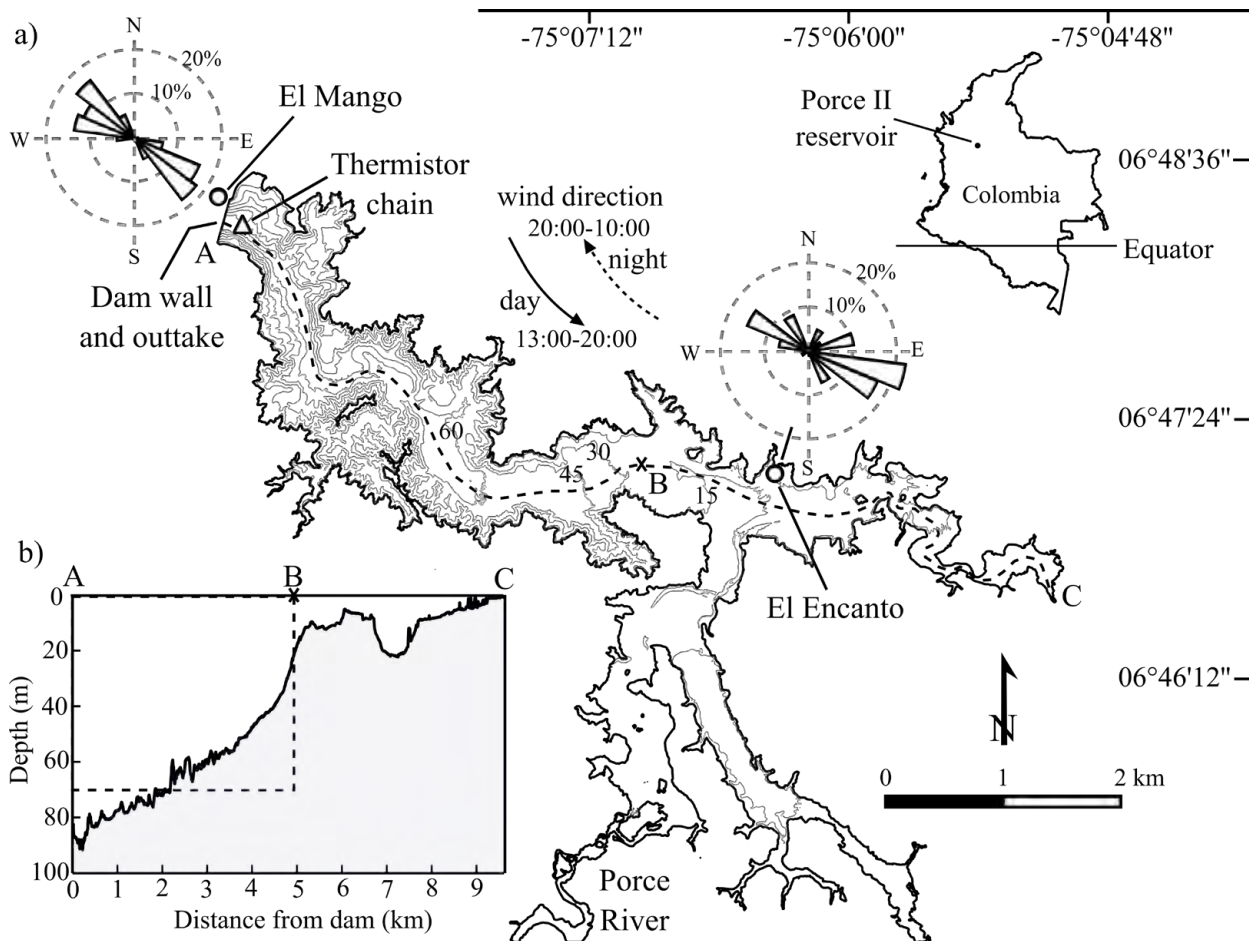
for the water quality of the reservoir. Our objective was to make a first approach to the characterization of the dominant basin-scale baroclinic response of a tropical Andean reservoir during a dry hydrological period from the analysis of field measurements complemented with a numerical eigenmodel. We also investigated the nature of the damping of the oscillations and the diapycnal mixing associated with the baroclinic modes. With this work, we expect to motivate future research on tropical Andean inland waters of Colombia and highlight the relevance of the physical processes for the water quality of these water bodies.

In this paper, we describe the study site, measurements, data analysis procedure, and the natural eigenfunction model. We describe the evolution of the external forcing and the thermal structure during the survey. Then, we depict the measured internal wave field from spectral analysis of the field data and present the theoretical natural modes by using the eigenmodel. With the aim to show the role of the wind forcing in the excitation of the internal waves, we assimilated the reservoir as a linear damped forced mass-spring

system and estimated the damping ratio of the dominant baroclinic mode. Finally, we estimated the potential diapycnal mixing by shear due to the baroclinic modes and summarized the scopes of the numerical model and the relevance of the results for the reservoir ecology.

### Materials and methods

**Study site.** Porce II is a reservoir for hydroelectric power generation located in Antioquia, Colombia. It is a 10-km long, 1-km wide canyon reservoir with a maximum depth of ~94 m (Figure 1). The reservoir is situated in a valley sheltered by mountains running parallel to its main axis. The surrounding topography influences the wind pattern over the reservoir (see wind roses in Figure 1) inducing a dominant component following the canyon axis that blows every afternoon (**Largo-Gaviria, 2011**). The reservoir receives the waters of the Porce River, which is its main tributary. Temperature is the dominant parameter in the density stratification of the dry season, with no practical effect of salinity or suspended solids (**Largo-Gaviria, 2011**).



**Figure 1.** (a) Porce II reservoir location with bathymetry, thermistor chain station (white triangle) and meteorological stations (white circles). Isobaths are shown every 15 m. The wind rose was calculated for wind speeds above 2 ms<sup>-1</sup> from measurements during the survey. Inset (b) bottom basin along the thalweg, which is shown as the dashed line in (a). The dashed rectangle in (b) represents the rectangular domain defined to solve the eigenfunction model.



**Field data.** One thermistor chain was installed close to the dam around the deepest zone of the reservoir (Figure 1) recording data every 15 min during the dry period from March 30 to April 08 of 2011. The thermistor mooring was composed of 13 temperature loggers located at depths of 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 22, 30, 38, 40 and 44 m. The shallow temperature sensors (<30 m depth) were HOBO Pendant® (ONSET), with an accuracy of 0.53 °C (resolution of 0.14 °C) and the remaining were HOBO® Pro V2 (ONSET), with an accuracy of 0.2 °C (resolution of 0.02 °C). We measured a conductivity, temperature, and depth (CTD) profile of high vertical resolution (around 20 cm bin-size) using a Sea-Bird Scientific CTD during April 05 of 2011 at the same location of the thermistor chain. Wind speed and direction were recorded at the dam site by El Mango meteorological station and with the portable Davis Instruments® Vantage Pro 2 meteorological station at El Encanto site (Figure 1) with sampling intervals of 30 min and 15 min, respectively. Wind information at El Mango and hydrological records of the Porce River inflow and the outtake discharge were provided by the owner of the reservoir, *Empresas Públicas de Medellín*, at 30 minutes intervals.

**Spectral analysis.** Fourier analysis was applied to three types of time series: (i) Isotherm depth time series calculated from the measured temperature field data, (ii) temperature records, and (iii) forcing time series (i.e., wind speed and hydrological discharges). Isotherm depths were calculated by linear interpolation of the thermistor chain temperature data. Power spectral density estimations were calculated from the modified periodogram by averaging in the frequency domain to improve the statistical confidence (**Bendat & Piersol, 1986**). The significance of the spectral peaks was tested by comparing the computed spectrum against the mean red noise spectrum from the time series by performing a  $\chi^2_2$ -test with a probability of error of  $\alpha = 0.05$  and a 95% confidence level and two degrees of freedom (**Torrence & Compo, 1998**). The lower confidence boundary for the spectral peaks was defined as the upper 95% significance level for the red noise signal (a first-order autoregressive process) containing the same variance as the observed time series (**Gilman, et al., 1963**). In order to identify the vertical structure of the internal waves, we performed cross power spectral analysis and calculated the coherence and phase difference (**Bendat & Piersol, 1986**) between pairs of temperature series recorded at different depths.

**Numerical model.** To describe the baroclinic modes of Porce II, we implemented a model that provides an adequate representation of the weak and continuous stratification of the reservoir assuming a rectangular basin geometry of uniform depth  $H$  and length  $L$ . Starting from the continuity and the momentum equations, neglecting viscous and non-linear effects, assuming incompressibility, and applying the Boussinesq approximation to the fluids equations of motion, we obtained the following two-dimensional linear wave approximation (**Gill, 1982; Münnich, et al., 1992**):

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + N^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (1),$$

where

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (2),$$

$w$  denotes the vertical velocity component,  $z$  is the height measured from the flat bottom basin,  $x$  and  $y$  are the horizontal coordinates, and  $N$  is the Brunt-Väisälä or buoyancy frequency. In the case of internal waves, surface elevations are small, therefore, we used the rigid lid approximation, thus, the boundary conditions were as follows:

$$w(x,z=H) = w(x,z=0) = 0 \quad (3)$$

To obtain the baroclinic modes, we had to find the non-trivial solutions to eq. 1 subject to these boundary conditions. We assumed a periodic time dependence, so  $w = \chi(x, z) e^{i\omega t}$ , and by taking advantage of the flat bottom geometry, we assumed decoupled solutions in  $x$  and  $z$ :  $\chi(x,z) = \zeta(x) W(z)$ . By replacing this expression in eq. 1, we obtained two ordinary differential equations in  $\zeta(x)$  and  $W(z)$ :

$$\frac{d^2 \zeta(x)}{dx^2} + C \zeta(x) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d^2 W(z)}{dz^2} + C \frac{N^2(z)}{\omega^2} W(z) = 0 \quad (5),$$

where  $C$  is a separation constant to be determined. The general solution of eq. 4 for  $\zeta$  was

$$\zeta(x) = A \sin(k_x x + \phi_0) \quad (6),$$

where  $k_x$  is the horizontal wave number,  $A$  is a constant amplitude and  $\phi_0$  is the phase to be determined from the boundary conditions. Thus, eq. 6 yields the separation constant  $C = k_x^2$ . Replacing this constant in eq. 5 we obtained (**Gill, 1982**)

$$\frac{d^2 W_n(z)}{dz^2} + \frac{N^2(z)}{c_n^2} W_n(z) = 0 \quad (7),$$

where  $c_n$  is the horizontal phase speed and  $W_n$  is the vertical structure of the  $n^{\text{th}}$  vertical mode. This is of the Sturm-Liouville form, which is analogous to the normal modes of oscillations of other systems, e.g., the stretched string. For a continuously stratified lake, there is an infinite set of possible values (eigenvalues):

$$c_n, \quad n = 1,2,3,\dots, \quad (8),$$

associated with the corresponding eigenfunctions, the normal modes:

$$W_n(z), \quad n = 1,2,3,\dots, \quad (9),$$

that satisfy eq. 7. Although eq. 7 describes all the vertical wave modes along an infinite  $x$ -axis, we are only interested in the standing waves, whose wavelength ( $\frac{2\pi}{k_x}$ ) must be an integer part of twice the length of the lake,  $2L$ . Hence, for those standing waves,

$$k_m = m \frac{\pi}{L}, \quad m = 1,2,3,\dots, \quad (10),$$

where  $m$  is the horizontal order of the mode. Thus, for every  $c_n$  obeying eq. 7 there must exist a set of certain frequencies  $\omega_{mn}$  (the eigenfrequencies) associated with the horizontal

wavelengths  $k_m$  determined by solving eq. 10 that represent the baroclinic modes of the basin. In that way, the natural frequencies and periods  $T_{mn}$  of the baroclinic modes are

$$\omega_{mn} = c_n k_m, \quad T_{mn} = \frac{2\pi}{\omega_{mn}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (11).$$

To solve the eq. 7 for the vertical structure and phase velocity of the modes, the  $z$ -axis was discretized using centered finite differences, which, along with the boundary conditions, led to a matrix formulation with the generalized eigenvalue form:

$$\mathbf{A}\Phi = \lambda\mathbf{B}\Phi \quad (12),$$

where  $\mathbf{A}$  is a matrix determined by the discretization on the  $z$ -axis,  $\mathbf{B}$  a matrix determined by the discretized buoyancy frequency in the  $z$ -axis and  $\lambda$  is the eigenvalue related to the wave phase velocity as  $\lambda = 1/c_n^2$ . For a uniform vertical discretization of the water column ( $\Delta z$ ), the squared matrices  $\mathbf{A}$  and  $\mathbf{B}$  are:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2/\Delta z^2 & -1/\Delta z^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -1/\Delta z^2 & 2/\Delta z^2 & -1/\Delta z^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1/\Delta z^2 & 2/\Delta z^2 & -1/\Delta z^2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1/\Delta z^2 & 2/\Delta z^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & -1/\Delta z^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\Delta z^2 & 2/\Delta z^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} N_1^2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & N_2^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & N_3^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_4^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_k^2 \end{bmatrix} \quad (14),$$

where the subscript  $k$  indicates the position in the vertical grid and  $N_k$  is the corresponding buoyancy frequency of the  $k$ -th cell.

The vertical velocities obtained by the model have arbitrary units because the resultant eigenvectors are not realistic velocity vectors. Thus, the vertical displacement,  $\delta = w/i\omega$ , which differs from the vertical velocity  $w$  only by one factor ( $1/i\omega$ ), has the same vertical structure to that of the vertical velocity (Fricker & Nepf, 2000). Finally, the horizontal velocity component in the middle of the reservoir associated to the baroclinic modes was calculated from the vertical velocity at one end of the basin by integrating the two-dimensional continuity equation (Münnich, et al., 1992).

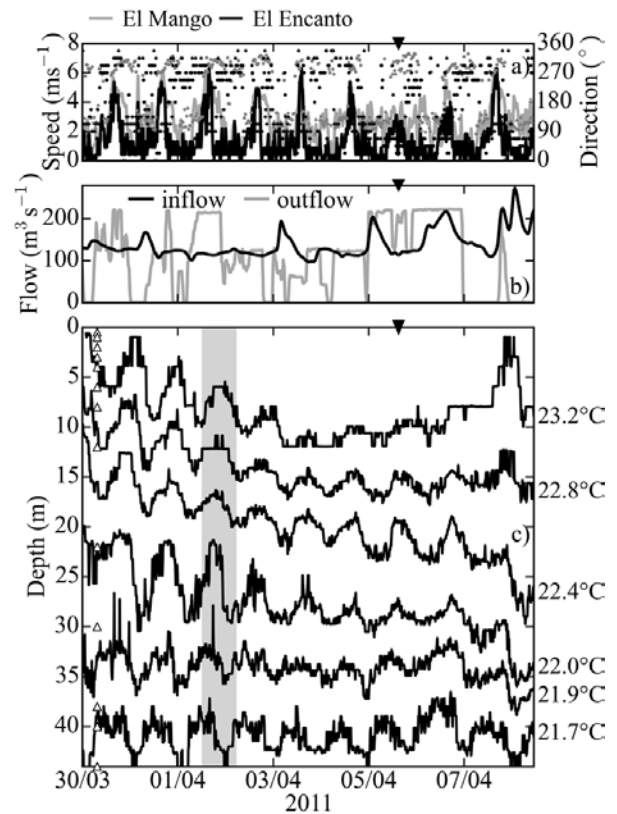
## Results

**Thermal structure, hydrology and wind forcing.** Diurnal wind speeds occurred regularly over the reservoir, with maximum speeds between the 13:00 h and 20:00 hours coming mainly from the northwest, ascending from the dam and through the river canyon. Lower wind speeds occurred during the night and early morning with an opposite wind direction along the canyon valley towards the dam site (Figure 2a). The power spectrum of the wind speed measured at both stations showed the dominant 24 h periodicity of the wind-forcing (Figure 3a) with a minor peak around the

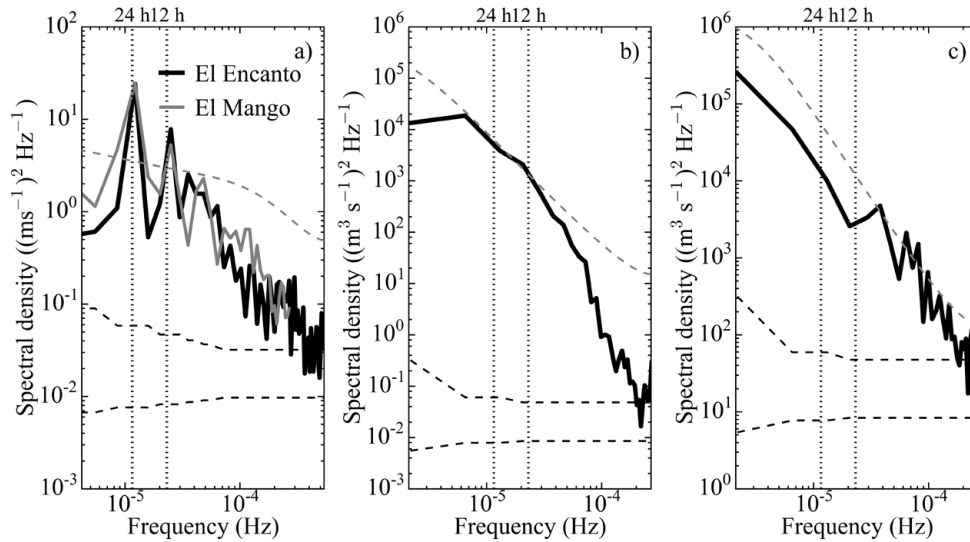
12 h period. Diurnal cycles of atmospheric pressure above the reservoir were related to the diurnal cycle of the wind forcing (not shown). However, given the spatial scale of the reservoir, it is very unlikely that the horizontal gradients of atmospheric pressure become high enough to excite internal wave motions and for that reason, this variable was not included in the subsequent analyses.

Low inflow discharges dominated during the field campaign, with a gradual increase throughout the survey and the occasional arrival of important discharges towards the end of the period. Outflow discharges occurred with a variable operation, with similar magnitudes to those of the inflows when the outtake was in operation. A dominant frequency component in the inflows and outflows time series was not identified, as can be seen from their power spectra (Figures 3b,c).

The evolution of the thermal structure showed a gradual deepening of the isotherms between depths of 10 and 30 meters, which indicates a warming of these waters due to the surface heat fluxes. Towards the end of the survey (from April 6 onwards), there was a change in the deepening rate of the isotherms, with a faster deepening for the isotherms



**Figure 2.** (a) Wind speed (line) and direction (dots), (b) inflow and outflow discharges, and (c) isotherm displacements. The black triangle at the top of the panels marks the time of measurement of a temperature profile with the CTD. Triangles in panel (c) mark the depths of the thermistors. The gray shadowed area in panel (c) indicates the period discussed in the text.



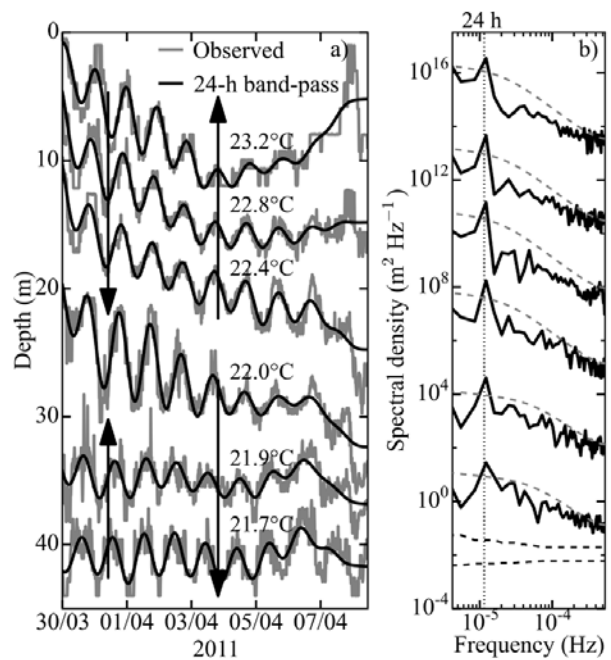
**Figure 3.** Power spectrum of (a) wind speed, (b) inflow discharge, and (c) outflow discharge. The dashed gray lines indicate the significance limit for the spectral peaks with a confidence level of 95% (Torrence & Compo, 1998). The bottom dashed black lines indicate the confidence bands of the power spectra with a confidence of 95%. The vertical dotted lines mark the 12 h- and 24 h-periods.

below 20 m deep and an upward trend in the isotherms above 20 m (Figure 2c). According to the observations by Gómez-Giraldo, *et al.* (2012), this behavior is a typical signature of the effect of the Porcè River plume on the thermal structure during dry periods.

Two features of the dynamics of the isotherm displacements stand out. First, there was a dominant periodicity close to 24 h in the vertical displacements that gradually reduced its amplitude towards the end of the survey. Second, the top and bottom isotherms shown in Figure 2c oscillated against one other indicating a corresponding oscillation in the thickness of the middle layers of the reservoir. For instance, during April 1 (see the gray panel in Figure 2c), the displacement of upper isotherm (23.2°C) was upward while the displacement of the bottom isotherm (21.7°C) was downward.

**Observed internal waves.** The isotherm displacements and their associated power spectra exhibited a dominant and statistically significant energy peak around the 24-h period (Figure 4), as expected from the qualitative analysis of Figure 2, and matching the major peak in the wind speed power spectrum. The amplitude, and hence the energy, of the internal wave oscillations, gradually decreased throughout the survey period, reaching minimum energy towards the end of it.

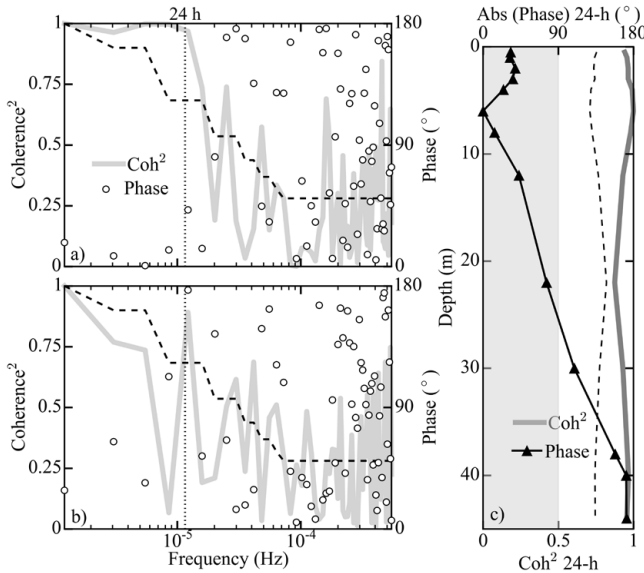
To identify the nature of the 24-h period oscillations, we calculated the coherence and phase spectra between the temperatures recorded by the thermistors at 6 m and at 20 m and between thermistors at 6 m and at 44 m (Figure 5a,b). For the 24-h period, the coherence was high and statistically significant for both pairs of temperature records. The phase spectra around this period provided information about the vertical structure of the oscillations. Around the 24-h period



**Figure 4.** (a) Depth time series of isotherms and its band-passed signal around the 24-h period band. The arrows make explicit the direction of the vertical displacements. (b) Power spectra of isotherm displacement. The dashed gray lines indicate the significance limit for the spectral peaks with a confidence level of 95% (Torrence & Compo, 1998). The bottom dashed black lines indicate the confidence bands of the power spectra with a confidence of 95%. Offset between spectra is three logarithmic cycles. The vertical dotted line marks the 24 h-period.

band, the 6 m and 44 m temperature records oscillated out of phase with one another while the temperatures at 6 m and 12 m oscillated in phase (Figure 5a,b).

To improve the understanding of the vertical structure of the oscillations, we calculated the coherence and phase for the 24 h period between the temperature at every thermistor depth and the temperature at 6m depth, defined arbitrarily as reference. Figure 5c shows the vertical structure of the

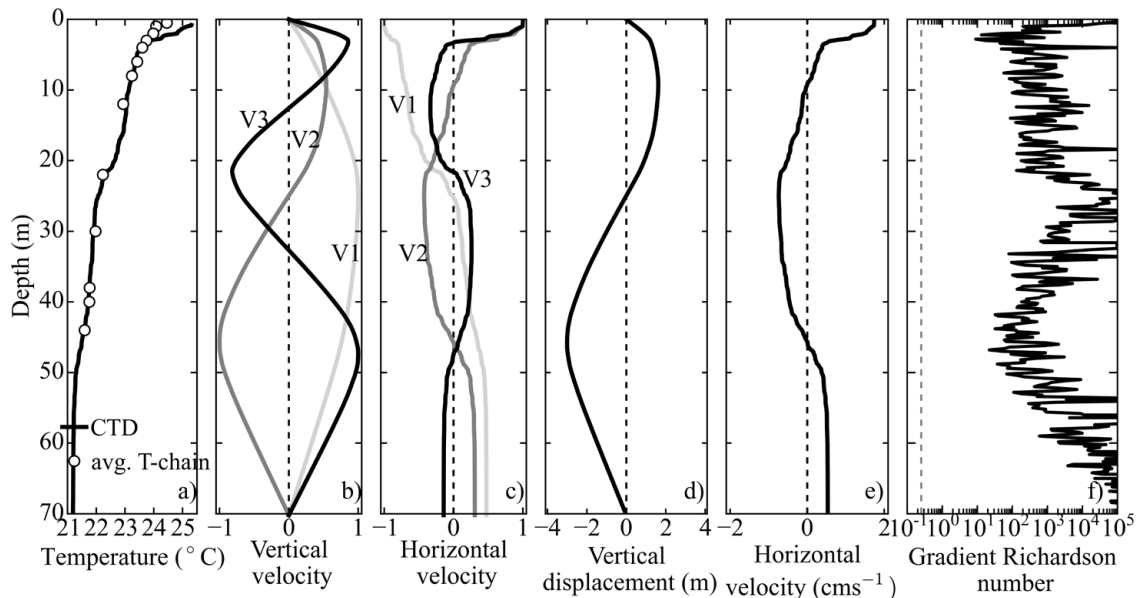


**Figure 5.** Coherence and phase spectra between temperature time series at (a) 6 m and 12 m deep and (b) at 6 m and 44 m deep. (c) Vertical profile of coherence and phase for the 24-h period band using the temperature series at 6 m depth as reference. The black dashed line in all panels indicates the threshold of 95% significance for the coherence.

coherence and phase for the 24-h period oscillations. The vertical-two structure of the oscillations can be confirmed in the depth range covered by the thermistor chain with a change of phase around 20 to 30 m deep.

Thus, the 24-h peak of the isotherms displacements was associated with a second vertical mode or higher. However, at this point it is not possible to establish with certainty the vertical order of the mode from the field data, as the thermistor chain did not cover the whole depth range of the reservoir and, hence, it could be possible that below 44 m (the location of the deepest thermistor) another change of phase occurs. It should be noted that our data does not strictly exhibit phase differences of 0° or ±180°, which would be expected for pure modes. The discussion of this result is presented below.

**Predicted baroclinic modes by the eigenmodel.** We set the uniform depth of the domain at 70 m and 5 km length, which is the approximated length of the main body of the reservoir where the basin-scale oscillations are expected to occur (Figure 1b). Since the thermistor chain covered only the first 44 m of the water column, the buoyancy frequency required to solve the model was calculated from the temperature profile measured with the CTD, which covered all the water column and shows a similar structure to the average temperature profile measured with the thermistor chain for the survey (Figure 6a). In addition, the CTD profile was smoothed using a fourth-order Butterworth filter, as the results of the eigenfunction model are not significantly sensitive to the small-scale features of the stratification profile (Münnich, 1996).



**Figure 6.** (a) Average temperature profile of the thermistor chain for the survey (dots) and the temperature profile measured with the CTD (line); (b) vertical and (c) horizontal velocity profiles associated with the lowest three baroclinic natural modes. (d) Vertical isotherm displacement profile scaled for a maximum amplitude of 3 m and its (e) associated horizontal velocity profile for the V2H1 mode. (f) Gradient Richardson number associated with the V2H1 baroclinic mode. The dashed line in (f) indicates the critical value of 0.25.

The vertical structure of the first three natural modes predicted by the eigenmodel is shown in Figures 6b,c. The natural periods (phase velocities) associated with the lower vertical modes V1, V2, and V3 are 12.7 h ( $0.22 \text{ ms}^{-1}$ ), 25.2 h ( $0.11 \text{ ms}^{-1}$ ), and 35.2 h ( $0.09 \text{ ms}^{-1}$ ), respectively.

## Discussion

**Porce II as a wind-forced damped oscillator.** The combined analysis of the field data and the results of the eigenmodel indicated that during the survey, a V2H1 mode of natural period close to 24 h was excited in the reservoir and the depth of change of phase of the oscillations occurred between 20 and 30 m deep. The spectral analysis of the wind speed showed a significant secondary peak around the 12-h period, which matched the theoretical period of the V1H1 mode predicted by the eigenmodel. However, the measured isotherm displacement did not show any significant energy content around that period, which indicates that the mode was not excited during the survey. Although the simultaneous response of several modes is not a rare feature (Antenucci, *et al.*, 2000; Vidal, *et al.*, 2007), this was not observed in Porce II and the V2H1 mode was the only dominant seiche. A possible aspect inhibiting the excitation of the V1H1 mode is that, although a 12-h periodic onset of the wind exists, its duration is less than one-quarter of the mode period (i.e.,  $\sim 3\text{h}$ ), which is the minimum duration of a wind event leading to the formation of the horizontal baroclinic gradients (Spigel & Imberger, 1980) necessary for the complete excitation of the mode. On the other hand, it has been shown that when internal waves are excited by density currents there is a strong influence of the level of neutral buoyancy of the currents on the relative proportion of energy transferred to the different vertical wave modes (Maurer & Linden, 2014). Although more research is needed to prove it, we suggest that the inhibition of the V1 mode excitation is caused by the currents from the selective withdrawal and the river plume moving between 10 m and 40 m, which is the depth range on what the V1 mode should change the velocity direction (Figure 6d). Such depth range coincided with the middle layer of the V2 mode (Figure 6d), so the currents did not interfere with the horizontal motion of the V2 mode.

Previous studies have shown that the periodic operation of the outflow discharge in a reservoir may lead to the excitation of internal waves (Imberger & Fandry, 1975; Ibarra, *et al.*, 2015). It has also been shown that internal waves may be energized by the intrusion of density currents in stratified environments (Maxworthy, *et al.*, 2002; Nash & Moum, 2005). According to the spectral analysis, it can be concluded that the wind is the only forcing whose spectral content explains the baroclinic oscillations occurring in Porce II reservoir. Thus, it is possible to affirm that the V2H1 baroclinic mode was excited by resonance with the wind forcing. This dynamic regime has been observed in other stratified lakes, such as Lake Alpnach (Münnich, *et al.*, 1992; Lorrai, *et al.*, 2011).

To get a deeper insight into the link of the water column response and the wind-forcing, we assimilated the reservoir to a harmonic, viscously damped wind-forced oscillator. We 24-h bandpass-filtered the observed oscillations of the 25 m depth isotherm and adjusted the output to the oscillation of a linear damped forced mass-spring system (Gómez-Giraldo, *et al.*, 2006). This simple dynamic system allows the description of the oscillations of the reservoir without including the complexities added by the spatial structure (Stocker & Imberger, 2003). The wind forcing,  $F$ , was discretized by 15-min long uniform wind blocks. Each constant wind block was considered as made up of a suddenly imposed steady wind event of infinite duration and an equal but negative wind starting 15 min later. At a particular location in the reservoir, the isotherm oscillation generated by every suddenly imposed steady wind event (positive or negative) of infinite duration is given by

$$x_i(t) = AF_i \{1 - \cos[\omega(t - t_{lag})]e^{-\alpha(t - t_{lag})}\}H(t) \quad (15),$$

$$\zeta = \frac{\alpha}{\omega_0} \quad \omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2 \quad (16),$$

where  $x$  is the displacement from the equilibrium position,  $t$  is the elapsed time from the start of the wind event, the coefficient  $A$  and the phase  $t_{lag}$  account for the spatial location and  $H$  is the unit step function, the parameter  $\alpha$  is the inverse of the  $e$ -folding time, which is given by  $T_d = T(2\pi\zeta)^{-1}$ , the damping ratio  $\zeta$  is the ratio of the decay constant  $\alpha$  to the undamped natural frequency  $\omega_0$ ,  $T$  is the natural period, and  $\omega$  is the damped natural frequency of the system. The displacement generated by the wind speed time series is given by the linear superposition of the displacements generated by each individual wind-block (positive and negative):

$$X(t, \alpha, \omega, A, t_{lag}) = \sum_{i=1}^M x_i(t - t_{si}) \quad (17),$$

where  $t_{si}$  is the time of the start of the  $i$ th wind event and  $M$  is the total number of positive and negative wind events. The values of  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $A$ , and  $t_{lag}$  were obtained by least-squared fitting  $X$  with the 24-h bandpass-filtered isotherm displacement.

Figure 7 shows the adjustment obtained with a good fit between the model and the measured vertical displacement. Towards the end of the period, a reduction in the amplitude of the 24-h period oscillation seems to be associated with the decay of the 24-h component of the wind forcing.

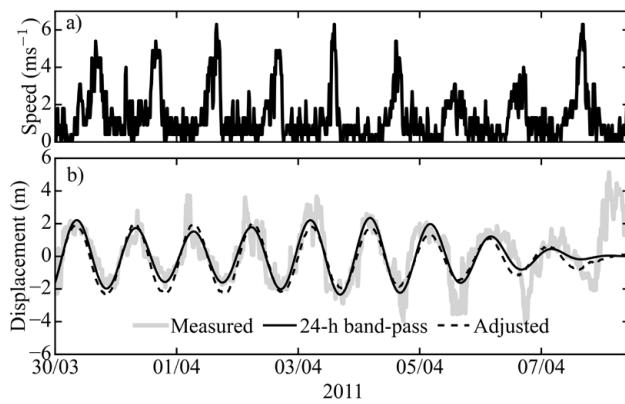
The damping ratio obtained for the V2H1 mode was compared to damping ratios of seiche modes in other lakes around the globe (Table 1). The damping ratio of the V2H1 mode in Porce II ( $\zeta = 0.08$ ) is well below the critical damping ( $\zeta_c = 1$ ), so the oscillations were underdamped, which has also been observed in most stratified systems with few cases (Imam, *et al.*, 2013) reporting overdamped oscillations. We observed that the damping ratio and the  $e$ -folding time of the V2H1 mode in Porce II were similar to that reported in the other lakes in spite of the differences in size, geographical location, stratification intensity, and vertical structure. We

have speculated that the major source of damping of the baroclinic motions in the reservoir is the bottom friction, as the turbulence at the interior due to the internal wave currents seems to produce low turbulence activity, as we discuss below.

**Potential diapycnal mixing induced by the baroclinic modes.** We carried out a scaling analysis to evaluate the potential for diapycnal mixing induced by the baroclinic modes in Porce II. Following Miles (1961), we calculated the gradient Richardson number given by

$$Ri = \frac{N^2}{(\partial u / \partial z)^2} \quad (18),$$

which expresses the ratio of the stability due to the stratification (given by  $N$ ) and the destabilization induced by the shear ( $\partial u / \partial z$ ). If  $Ri$  is smaller than a critical value of 0.25, the water column may become unstable and vertical mixing can be generated through Kelvin-Helmholtz instabilities.



**Figure 7.** (a) Wind speed. (b) 25 m-depth isotherm vertical displacement measured and detrended, 24-h bandpass-filtered and estimated by the mechanical model.

The vertical displacements predicted by the eigenmodel were scaled by a maximum amplitude of 3 m (Figure 6d), which was defined from the observed isotherm oscillations (Figure 2c) while the horizontal velocity component was calculated from the vertical velocity by integrating the two-dimensional continuity equation (Münnich, *et al.*, 1992). Figure 6 shows how  $Ri$  is higher than 0.25 all along the water column, which indicates that mixing-inducing instabilities were not produced at the interior of the water column by the baroclinic mode. Thus, we suggest that a turbulent bottom boundary layer driven by the seiche-associated currents was the major source of mixing, dissipation, and damping of the basin-scale oscillations. In sloping bottom basins as Porce II, basin-scale circulations associated with the internal waves can accelerate the flow close to the boundaries and favor the formation of supercritical shear layers, which, in turn, induce mixing around the metalimnetic region that intersects the lake boundary (Ulloa, *et al.*, 2018). Direct measurements of turbulent dissipation (Román-Botero, *et al.*, 2017) also showed that during periods of dominant basin-scale internal waves activity in Porce II, there was a strongly stratified turbulence at the interior (far from the boundaries), characteristic of low dissipation, in contrast with the high-isotropic turbulence induced by the density plumes during flood events.

**Potential implications for reservoir ecology.** It has been shown that internal wave oscillations may affect the water quality withdrawn from a reservoir because the vertical fluctuations induced by the standing waves expose different water masses to the selective withdrawal at the forefront of the intake gates (Figure 2S-a1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/799/3896>; 2S-a2, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/799/3896>) (Anohin, *et al.*, 2006). In

**Table 1.** Damping in selected lakes. Modified from Imam, *et al.* (2013).

Lake	Length h (km)	Mode period, $T$ (d)	Damping time scale, $T_d$ (d)	Damping ratio, $\zeta$	Source
Baldegg Lake	4.5	0.3-0.4	>7	<0.009	Lemmin (1987)
Wood Lake	7	0.5	2.0	0.04	Wiegand & Chamberlain (1987)
North basin of Windermere	7	0.8	3.1	0.04	Mortimer (1952); Heaps & Ramsbottom (1966); Spigel & Imberger (1980)
Sooke Lake Reservoir	4	0.3	0.7	0.07	Stevens (1999)
Lake Tiberias	22	0.9	1.8	0.08	Shimizu & Imberger (2008)
Untersee (Lake Zurich)	29	1.8	2.1	0.14	Horn, <i>et al.</i> (1986)
Kootenay Lake	100	5	5.7	0.14	Stevens, <i>et al.</i> (1996)
		12	10.6	0.18	
Nechako Reservoir	75.6	5.7	0.8	1.2	Imam, <i>et al.</i> (2013)
Lake Villarrica	20	0.9	30.0	0.03	Rozas, <i>et al.</i> (2014)
Porce II Reservoir*	10.0	1.1	1.9	0.08	

\*Results from the present work

Porce II, the vertical oscillations of up to 4 m at the depth of the submerged gates could be important for inducing essential changes in the quality of the water withdrawn, which in turn may be important for the quality of the river and Porce III reservoir located downstream of Porce II dam. The dominant V2H1 mode during the survey has the peculiarity of generating a periodic contraction and expansion of the middle layers of the reservoir (Münlich, *et al.*, 1992). The horizontal pressure gradient generated by that periodic variation in the thickness of the layers can favor the transit towards the dam site of the masses of water inserted at mid-depths by the river plume (Figure 2S-b1, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/799/3896>; 2S-b2, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/799/3896>) (Vidal, *et al.*, 2007). In this way, it can decrease the transit time of the river plume into the system and, hence, influence the retention time of the water, which is a very important parameter for water quality (Soares, *et al.*, 2008). On the other hand, the amplitude of internal waves can be sufficient to define the intrusion depth of a river plume depending on the phase of the oscillations and the background conditions that face the plume when it enters the reservoir (Figure 2S-c1, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/799/3896>; 2s-c2, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/799/3896>) (e.g. Cortés, *et al.*, 2014; Hogg, *et al.*, 2018). Our calculations suggest that the seiche-associated currents induce weak diapycnal mixing at the interior of the water column. Thus, it is suggested that a turbulent bottom boundary layer driven by seiche currents is the major source of the internal wave dissipation, possibly inducing resuspension of sediment and other substances (Wiegand & Chamberlain, 1987). It should be noted that the aforementioned mechanisms of interaction of the natural modes and the water quality are only hypothetical scenarios and none of them has been proved in this work. However, they are described here to highlight the importance of studying internal waves and their linkage to the water quality of stratified inland waters.

River intrusions incorporate nutrients into the upper mixed layer where important primary productivity occurs by the turbulent mixing and advection which are modulated by other physical processes (MacIntyre, 1993; MacIntyre & Jellison, 2001; Cortés, *et al.*, 2014). During the dry season in Porce II, typical inflow plumes loaded with nutrients intrude at depths of 20 to 30 m (Gómez-Giraldo, *et al.*, 2012). We performed a simple decoupled analysis of the time scale that internal waves induced turbulent mixing takes to transport nutrients vertically from the river intrusion to the upper mixed layer. For this analysis, we neglected the contribution of the density current and other processes in vertical turbulent mixing as they evolve. The time scale for the turbulent diffusive transport ( $\tau_{mix}$ ) of substances from the plume up to the surface layer is  $\tau_{mix} \sim \frac{\ell^2}{K_z}$ , where  $K_z$  is the eddy vertical diffusivity and  $\ell$  is the length scale. To incorporate

the load of nutrients introduced by the river plume into the surface layer would require a vertical distance  $\ell \sim 20$  m. According to the magnitudes estimated of  $Ri \gg 1$  all along the water column and the  $K_z$  parameterization as a function of  $Ri$  (Yeates, *et al.*, 2013), the eddy vertical diffusivity  $K_z$  at the interior of the water column is of the order of the molecular diffusivity. We assumed a value of  $K_z = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (Gloor, *et al.*, 2000), getting  $\tau_{mix} \sim 12$  years. Thus, we suggest that for the typical dry conditions in Porce II reservoir, the diapycnal mixing induced by the internal waves is negligible and other mechanisms and interactions among processes must be responsible for the major vertical transport and mixing at the lake interior.

**Vertical structure of the phase.** The gradual vertical variation of the phase of the measured temperature from the surface to 40 m deep (Figure 6c) is not explained by the theory of normal baroclinic modes, which predicts phase shifts of  $180^\circ$ . A similar pattern in the vertical structure of the phase for both measured temperature and velocity has been found in other lakes with a wide metalimnion that matches the depth range where the phase is variable (LaZerte, 1980; Pérez-Losada, *et al.*, 2003; Vidal, *et al.*, 2008; Hingsamer, *et al.*, 2014). In agreement with these authors, we consider that this is the signature of the basin-scale internal waves in lakes with a wide metalimnion. According to the wave ray theory (Maas & Lam, 1995), the baroclinic modes are standing waves that result from the superposition of internal wave rays whose paths close upon themselves after bouncing in the boundaries of the basin (Cushman-Roisin, *et al.*, 1989; Maas & Lam, 1995; Gómez-Giraldo, *et al.*, 2006). We believe that the sharp phase shifts predicted by the eigenfunction models for flat horizontal bottoms are only possible if there is a complete vertical and horizontal symmetry of the domain. Due to the variations in the slope, depth, and stratification, the direction of the wave ray propagation on a real lake changes with depth and horizontal location. We consider that this makes possible that the rays close upon themselves at a different phase in a vertical profile, especially in the metalimnion, where they are changing direction continuously with the vertical change in the buoyancy frequency. This is likely more visible as the metalimnion thickness to the total depth is larger.

According to Henderson & Deemer (2012), the gradual variation of the phase in temperature and velocity is the signature of vertical wave propagation and not of standing waves, similar to lee waves formation in stratified systems. They suggest that because of the energy loss at the bottom of the lake, wave rays reflected from the bottom are less energetic than those downward-propagating incident rays. Thus, the superposition of both results in net downward energy propagation. Even if this were the case, it does not explain why the gradual shift in phase is observed in thick metalimnions and is not in very homogeneous hypolimnions and epilimnions. Damping (energy loss) has been recognized as a universal feature observed in basin-scale internal waves

around the globe (Mortimer, 1952; Heaps & Ramsbottom, 1966; Wiegand & Chamberlain, 1987; Shimizu, *et al.*, 2008) in several lakes where the gradual variation in phase is not observed. Our estimated damping rate was similar to those reported from other lakes where standing waves have been identified with a sharper vertical change of phase, so we do not see the attenuation of the downward rays as the cause of the gradual phase shift as suggested by Henderson & Deemer (2012). However, we recognize that more work is necessary to clarify the nature of gradual vertical phase shift.

**Future calculations of the baroclinic modes.** It must be recognized that the sloping bottom of the reservoir basin, clearly different from a rectangular basin, can induce phenomena as wave-ray focusing and defocusing which may affect the periods and spatial structures of the internal wave modes (Cushman-Roisin, *et al.*, 1989; Maas & Lam, 1995; Fricker & Nepf, 2000; Gómez-Giraldo, *et al.*, 2006). Those effects cannot be captured by the numerical model implemented in this work, which assumes a rectangular flat-bottom basin. Nonetheless, as a first approximation to the description of the natural modes, the model provided a good and valuable description of the dominant baroclinic mode observed in the field during the survey analyzed, capturing quite well the natural period and the approximated depth of change of phase of the vertical displacements.

More complete models should be used to capture the properties of the wave field in Porce II taking into account both real bathymetry and stratification. The weak and continuous stratification of Porce II, very different from the typically layered-like summer stratification of temperate lakes, as well as the non-simple morphometry of the reservoir, lead us to suggest that future analysis on the baroclinic modes must be addressed by using more elaborated models than the one used in this work.

---

## Supplementary information

---

**Figure 1S.** Schematic view of the structure of various internal wave modes for a rectangular basin of depth  $H$  and length  $L$  with uniform stratification. The solid lines with arrows indicate the amplitude of the periodic circulation pattern. The dashed line represents the associated amplitude of the isotherms vertical displacement. See the figure 1S in: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/799/3895>

**Figure 2S.** Schematic view of hypothetical mechanisms that could link basin-scale internal waves and water quality in Porce II reservoir. (a1,a2) Difference of the physical and chemical properties of the mass of water extracted by the selective withdrawal during the two states of maximum vertical displacement associated with the V2H1 mode. (b1,b2) Difference in the advance of the river plume front during the evolution of the two states of maximum vertical displacement associated with the V2H1 mode. (c1,c2) Difference on the neutral buoyancy intrusion depth of the river plume for the two states of maximum vertical displacement associated with the V2H1 mode. See the figure 2S in: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/799/3896>

---

## Conclusions

Internal waves were a prominent feature of the basin-scale hydrodynamics of Porce II reservoir during the dry period studied. An underdamped V2H1 mode was excited in the reservoir by resonance with the diurnal wind forcing and prevailed for several days according to the field observations and the results of a simplified eigenvalue model.

Despite the simplifications involved in the simple model, it has shown to be useful for identifying the period and the spatial structure of the dominant basin-scale oscillations. More detailed models are required to investigate these modes and their effects more thoroughly.

We found that the contribution of the internal waves to the mixing at the interior of the water column was weak, and we suggest that the most important mixing and dissipation region appears to be the turbulent bottom boundary layer driven by seiche currents.

## Acknowledgments

We thank Ana C. Arbeláez, Daniel Largo, Hugo Escorcía, Juan Franco, and Mauricio Toro for their logistic support in the field and to *Empresas Públicas de Medellín* (EPM) for funding the field work and providing the hydrological data. We gratefully acknowledge the valuable suggestions provided by Hugo Ulloa and two anonymous reviewers during the preparation of this manuscript.

## Author contributions

The present work shows some results of the Master's thesis of Andrés Posada-Bedoya under the supervision of Andrés Gómez-Giraldo and Ricardo Román-Botero. All the authors participated in the analysis and interpretation of the results, as well as in the drafting of the manuscript, the drawing of all the figures, and the preparation of the tables.

## Conflict of interests

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

## References

- Anohin, V. V., Imberger, J., Romero, J. R., Ivey, G. N. (2006). Effect of Long Internal Waves on the Quality of Water Withdrawn from a Stratified Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, **132**: 1134-1145.
- Antenucci, J. P. & Imberger, J. (2001). Energetics of long internal gravity waves in large lakes. *Limnology and oceanography*, **46** (7): 1760-1773.
- Antenucci, J. P., Imberger, J., Saggio, A. (2000). Seasonal evolution of the basin-scale internal wave field in a large stratified lake. *Limnology and Oceanography*, **45**: 1621-1638.
- Bäuerle, E. (1998). Excitation on internal seiches by periodic forcing. In J. Imberger [ed.], *Physical processes in lakes and oceans*. Coastal and Estuarine Studies. V. 54. AGU. p. 167-178.
- Bendat, J. S. & Piersol, A. G. (1986). *Random data: analysis and measurement procedures*. 2nd ed. Wiley. p. 605.



- Boegman, L., Imberger, J., Ivey, G. N., Antenucci, J. P.** (2003). High-frequency internal waves in large stratified lakes. *Limnology and Oceanography*. **48**: 895-919.
- Bouffard, D., Boegman, L., Rao, Y. R.** (2012). Poincaré wave-induced mixing in a large lake. *Limnology and oceanography*. **57** (4): 1201-1216.
- Cortés, A., Fleenor, W., Wells, M., de Vicente, I., Rueda, F.** (2014). Pathways of river water to the surface layers of stratified reservoirs. *Limnology and Oceanography*. **59** (1): 233-250.
- Csanady, G. T.** (1967). Large-scale motion in the Great Lakes. *Journal of Geophysical Research*. **72** (16): 4151-4162.
- Csanady, G. T.** (1972). Response of large stratified lakes to wind. *Journal of Physical Oceanography*. **2** (1): 3-13.
- Cushman-Roisin, B., Tverberg V., Pavia, E.G.** (1989). Resonance of internal waves in fjords: a finite-difference model. *J. Mar. Res.* **47**: 547-567.
- Eckert, W., Imberger, J., Saggio, A.** (2002). Biogeochemical response to physical forcing in the water column of a warm monomictic lake. *Biogeochemistry*. **61** (3): 291-307.
- Evans, M. A., MacIntyre, S., Kling, G. W.** (2008). Internal wave effects on photosynthesis: Experiments, theory, and modeling. *Limnology and Oceanography*. **53** (1):339-353.
- Fricker, P. D., Nepf, H. M.** (2000). Bathymetry, stratification, and internal seiche structure. *Journal of Geophysical Research*. **105** (C6): 14237-14251.
- Gill, A. E.** (1982). *Atmosphere-ocean dynamics*. Academic. Press. London. p. 662.
- Gilman, D. L., Fuglister, F. J., Mitchell Jr. J. M.** (1963): On the power spectrum of "red noise". *J. Atmos. Sci.* **20**: 182-184.
- Gloor, M., Wüest, A., Imboden, D. M.** (2000). Dynamics of mixed bottom boundary layers and its implications for diapycnal transport in a stratified, natural water basin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. **105** (C4): 8629-8646.
- Gloor, M., Wüest, A., Münnich, M.** (1994). Benthic boundary mixing and resuspension induced by internal seiches. *Hydrobiologia*. **284** (1): 59-68.
- Gómez-Giraldo, A., Imberger, J., Antenucci, J. P.** (2006). Spatial structure of the dominant basin-scale internal waves in Lake Kinneret. *Limnology and Oceanography*. **51** (1): 229-246.
- Gómez-Giraldo, A., Imberger, J., Antenucci, J. P., Yeates, P. S.** (2008). Wind-shear generated high-frequency internal waves as precursors to mixing in a stratified lake. *Limnology and Oceanography*. **53** (1): 354-367.
- Gómez-Giraldo, E. A., Largo, D.C., Franco, J.D., Román- Botero, R., Escorcía, H., Arbeláez, A.C.** (2012). Caracterización de los procesos de transporte dominantes en los embalses Porce II, Riogrande II y La Fe. In: Palacio, J. (ed.), *Informes técnicos embalses Porce II, Riogrande II y La Fe; "Estudio de la problemática ambiental de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico"*. Universidad de Antioquia, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Empresas Públicas de Medellín.
- Heaps, N. S., Ramsbottom, A. E.** (1966). Wind effects on water in a narrow two-layered lake. *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A*. **259**: 391-430.
- Henderson, S. M.** (2016). Turbulent production in an internal wave bottom boundary layer maintained by a vertically propagating seiche. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. **121** (4): 2481-2498.
- Henderson, S. M. & Deemer, B. R.** (2012). Vertical propagation of lakewide internal waves. *Geophys. Res. Lett.* **39**. L06405.
- Hingsamer, P., Peeters F., Hofmann H.** (2014) The Consequences of Internal Waves for Phytoplankton Focusing on the Distribution and Production of Planktothrix rubescens. *PLoS ONE*. **9** (8): e104359.
- Hogg, C. A., Egan, G. C., Ouellette, N. T., Koseff, J. R.** (2018). Shoaling internal waves may reduce gravity current transport. *Environmental Fluid Mechanics*. **18** (2): 383-394.
- Hondzo, M., Haider, Z.** (2004). Boundary mixing in a small stratified lake. *Water resources research*. **40** (3): 1-12.
- Horn, D. A., Imberger, J., Ivey, G. N.** (2001). The degeneration of large-scale interfacial gravity waves in lakes. *J. Fluid Mech.* **434**: 181-207.
- Horn, W., Mortimer, C. H., Schwab, D. J.** (1986). Wind-induced internal seiches in Lake Zurich observed and modeled. *Limnology and Oceanography*. **31** (6): 1232-1254.
- Ibarra, G., De la Fuente, A., Contreras, M.** (2015). Effects of hydropeaking on the hydrodynamics of a stratified reservoir: The Rapel Reservoir case study. *Journal of Hydraulic Research*. **53** (6): 760-772.
- Imam, Y. E., Laval, B., Pieters, R., Lawrence, G.** (2013). The strongly damped baroclinic response to wind in a multibasin reservoir. *Limnology and Oceanography*. **58** (4): 1243- 258.
- Imberger, J.** (1998). Flux paths in a stratified lake: A review. In J. Imberger (Editor), *Physical processes in lakes and oceans*. Coastal and Estuarine Studies. V. 54. AGU. pp. 1-17.
- Imberger, J. & Fandry, C.** (1975). Withdrawal of a stratified fluid from a vertical two-dimensional duct. *Journal of Fluid Mechanics*. **70** (2): 321-332.
- Largo-Gaviria, D. C.** (2011). Spatio-temporal characterization of the thermal structure of Porce II reservoir. Master degree thesis, Univ. Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Lemckert, C., Antenucci, J., Saggio, A., Imberger, J.** (2004). Physical properties of turbulent benthic boundary layers generated by internal waves. *Journal of Hydraulic Engineering*. **130** (1): 58-69.
- Lemmin, U.** (1987). The structure and dynamics of internal waves in Baldeggersee. *Limnology and Oceanography*. **32**: 43-61.
- Lemmin, U., Mortimer, C. H., Bäuerle, E.** (2005). Internal seiche dynamics in Lake Geneva. *Limnology and Oceanography*. **50**: 207-216.
- Lewis Jr., W. M.** (1987). Tropical limnology. *Annual review of ecology and systematics*. **18**: 159-184.
- Lewis Jr., W. M.** (1996). Tropical lakes: How latitude makes a difference. *Perspectives in tropical limnology*. pp. 43-64. SPB Academic Publishing bv, Amsterdam, The Netherlands.
- Lewis, W. M.** (2000). Basis for the protection and management of tropical lakes. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*. **5**: 35-48.
- Lorke, A., Peeters, F., Wüest, A.** (2005). Shear-induced convective mixing in bottom boundary layers on slopes. *Limnology and Oceanography*. **50** (5): 1612-1619.
- Lorrai, C., Umlauf, L., Becherer, J. K., Lorke, A., Wüest, A.** (2011). Boundary mixing in lakes: 2. Combined effects of shear-and convectively induced turbulence on basin-scale mixing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. **116** (C10).
- Maas, L. R. & Lam, F.-P. A.** (1995). Geometric focusing of internal waves. *Journal of Fluid Mechanics*. **300**: 1-41.
- MacIntyre, S.** (1993). Vertical mixing in a shallow, eutrophic lake: Possible consequences for the light climate of phytoplankton. *Limnology and Oceanography*. **38** (4): 798-817.

- MacIntyre, S., Flynn, K. M., Jellison, R., Romero, J. R.** (1999). Boundary mixing and nutrient fluxes in Mono Lake, California. *Limnology and Oceanography*. **44** (3): 512-529.
- MacIntyre, S. & Jellison, R.** (2001). Nutrient fluxes from upwelling and enhanced turbulence at the top of the pycnocline in Mono Lake, California. In *Saline Lakes*, p. 13-29. Springer, Dordrecht.
- Maurer, B. D. & Linden, P.** (2014). Intrusion-generated waves in a linearly stratified fluid. *J. Fluid Mech.* **752**: 282-295.
- Maxworthy, T., Lielich J., Simpson, J. E., Meiburg, E. H.** (2002). Propagation of a gravity current in a linearly stratified fluid. *J. Fluid Mech.* **453**: 371-394.
- Miles, J. W.** (1961). On the stability of heterogeneous shear flows. *J. Fluid Mech.* **10** (4): 496-508.
- Monismith, S. G.** (1985). Wind-forced motions in stratified lakes and their effect on mixedlayer shear. *Limnology and Oceanography*. **30**: 771-783.
- Monismith, S.** (1987). Modal response of reservoirs to wind stress. *Journal of Hydraulic Engineering*. **113** (10): 1290-1304.
- Mortimer, C. H.** (1952). Water movements in lakes during summer stratification; evidence from the distribution of temperature in Windermere. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B.* **236**: 355-404.
- Mortimer, C. H.** (1953). The resonant response of stratified lakes to wind. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*. **15** (1): 94-151.
- Mortimer, C. H.** (1974). Lake hydrodynamics. *Verh. Int. Ver. Limnol.* **20**: 124-197.
- Mortimer, C. H.** (2004). Lake Michigan in motion: Responses of an inland sea to weather, earth-spin, and human activities. Univ of Wisconsin Press.
- Münnich, M.** (1996). The influence of bottom topography on internal seiches in stratified media. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. **23** (1-4): 257-266.
- Münnich, M., Wüest, A., Imboden, D. M.** (1992). Observations of the second vertical mode of the internal seiche in an alpine lake. *Limnology and Oceanography*. **37** (8): 1705-1719.
- Nash, J. D. & Moum, J. N.** (2005). River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean. *Nature*. **437** (7057): 400-403.
- Nilssen, J. P.** (1984). Tropical lakes—functional ecology and future development: The need for a process-orientated approach. *Hydrobiologia*. **113**: 231-242.
- Pannard, A., Beisner, B. E., Bird, D. F., Braun, J., Planas, D., Bormans, M.** (2011). Recurrent internal waves in a small lake: potential ecological consequences for metalimnetic phytoplankton populations. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*. **1** (1): 91-109.
- Parinet, B., Lhote, A., Legube, B.** (2004). Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management – application to a tropical lake system. *Ecological Modelling*. **178**: 295-311.
- Pérez-Losada, J., Roget, E., Casamitjana, X.** (2003). Evidence of high vertical wave-number behavior in a continuously stratified reservoir: Boadella, Spain. *Journal of Hydraulic Engineering*. **129** (9): 734-737.
- Pierson, D. C. & Weyhenmeyer, G. A.** (1994). High resolution measurements of sediment resuspension above an accumulation bottom in a stratified lake. *Hydrobiologia*. **284**: 43-57.
- Posada-Bedoya, A., Gómez-Giraldo, E. A., Román-Botero, R.** (2017). Effect of density currents on the seasonal evolution of basin-scale internal waves in a Tropical Andean reservoir. 20th International Physical Processes in Natural Waters (PPNW) Workshop.
- Preusse, M., Peeters, F., Lorke, A.** (2010). Internal waves and the generation of turbulence in the thermocline of a large lake. *Limnology and Oceanography*. **55** (6): 2353-2365.
- Román-Botero, R., Boegman, L., Gómez-Giraldo, A.** (2017). Vertical mixing in a tropical Andean Reservoir, Porce II. 20th International Physical Processes in Natural Waters (PPNW) Workshop.
- Rozas, C., de la Fuente, A., Ulloa, H., Davies, P., Niño, Y.** (2014). Quantifying the effect of wind on internal wave resonance in Lake Villarrica, Chile. *Environmental Fluid Mechanics*. **14** (4): 849-871.
- Schwab, D. J.** (1977). Internal free oscillations in Lake Ontario. *Limnology and Oceanography*. **22** (4): 700-708.
- Serra, T., Vidal, J., Casamitjana, X., Soler, M., Colomer, J.** (2007). The role of surface vertical mixing in phytoplankton distribution in a stratified reservoir. *Limnology and Oceanography*. **52** (2): 620-634.
- Shimizu, K. & Imberger, J.** (2008). Energetics and damping of basin-scale internal waves in a strongly stratified lake. *Limnology and Oceanography*. **53** (4): 1574-1588.
- Shimizu, K., Imberger, J., Kumagai, M.** (2007). Horizontal structure and excitation of primary motions in a strongly stratified lake. *Limnology and Oceanography*. **52** (6): 2641-2655.
- Simpson, J. H., Wiles, P. J., Lincoln, B. J.** (2011). Internal seiche modes and bottom boundary-layer dissipation in a temperate lake from acoustic measurements. *Limnology and Oceanography*. **56** (5): 1893-1906.
- Soares, M. C. S., Marinho, M. M., Huszar, V. L., Branco, C. W., Azevedo, S. M.** (2008). The effects of water retention time and watershed features on the limnology of two tropical reservoirs in Brazil. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*. **13** (4): 257-269.
- Spigel, R. H. & Imberger, J.** (1980). The classification of mixed-layer dynamics of lakes of small to medium size. *Journal of Physical Oceanography*. **10** (7): 1104-1121.
- Stevens, C.** (1999). Internal waves in a small reservoir. *J. Geophys. Res. Oceans*. **104**: 15777-15788.
- Stevens, C., Lawrence, G., Hamblin, P., Carmack, E.** (1996). Wind forcing of internal waves in a long narrow stratified lake. *Dyn. Atmos. Oceans*. **24**: 41-50.
- Stocker, R., Imberger, J.** (2003). Energy partitioning and horizontal dispersion in a stratified rotating lake. *J. Phys. Oceanogr.* **33**: 512-529.
- Torrence, C., Compo, G. P.** (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **79** (1): 61-78.
- Ulloa, H. N., Constantinescu, G., Chang, K., Horna-Munoz, D., Steiner, O. S., Bouffard, D., Wüest, A.** (2018). Hydrodynamics of a periodically wind-forced small and narrow stratified basin: A large-eddy simulation experiment. *Environmental Fluid Mechanics*. **19** (3): 667-698
- Ulloa, H. N., Winters, K. B., de la Fuente, A., Niño, Y.** (2015). Degeneration of internal Kelvin waves in a continuous two-layer stratification. *Journal of Fluid Mechanics*. **777**: 68-96.

- Valerio, G., Pilotti, M., Luisa Marti, C., Imberger, J.** (2012). The structure of basin-scale internal waves in a stratified lake in response to lake bathymetry and wind spatial and temporal distribution: Lake Iseo, Italy. *Limnology and Oceanography*. **57** (3): 772-786.
- Vélez-Castaño, J. D., Gómez-Giraldo, A.** (2013). Modelos multicapas para estimar el periodo de los modos naturales de oscilación en lagos y embalses tropicales. *Tecnología y ciencias del agua*. **4** (2): 171-183.
- Vidal, J. & Casamitjana, X.** (2008). Forced Resonant Oscillations as a Response to Periodic Winds in a Stratified Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*. **134** (4): 416-425.
- Vidal, J., Casamitjana, X., Colomer, J., Serra, T.** (2005). The internal wave field in Sau reservoir: Observation and modeling of a third vertical mode. *Limnology and Oceanography*. **50** (4): 1326-1333.
- Vidal, J., Rueda, F. J., Casamitjana, X.** (2007). The seasonal evolution of high vertical mode internal waves in a deep reservoir. *Limnology and Oceanography*. **52** (6): 2656-2667.
- Wiegand, R. C. & Chamberlain, V.** (1987). Internal waves of the second vertical mode in a stratified lake. *Limnology and Oceanography*. **32** (1): 29-42.
- Wüest, A. & Lorke, A.** (2003). Small-Scale Hydrodynamics in Lakes. *Annual Review of Fluid Mechanics*. **35** (1): 373-412.
- Yeates, P. S., Gómez-Giraldo, A., Imberger, J.** (2013). Observed relationships between microstructure patches and the gradient Richardson number in a thermally stratified lake. *Environ. Fluid Mech.* **13** (65): 205-226.

# Integral transforms and extended Voigt functions

M.A. Pathan

Centre for Mathematical and Statistical Sciences, Peechi P.O., Kerala-680653, India

## Abstract

In this paper we introduce a generalization of the Voigt functions and discuss their properties and applications. Some interesting explicit series representations, integrals and identities and their link to Jacobi, Laguerre and Hermite polynomials are obtained. The resulting formulas allow a considerable unification of various special results which appear in the literature. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Voigt function; Bessel function; Parabolic function; Hypergeometric function and Laguerre polynomials.

## Transformadas integrales y funciones extendidas de Voigt

## Resumen

En este artículo se introduce una generalización de las funciones de Voigt y se discuten sus propiedades y aplicaciones. Se obtienen representaciones explícitas de series, integrales e identidades y sus conexiones con los polinomios de Jacobi, Laguerre y Hermite. Las fórmulas resultantes permiten la unificación de algunos resultados especiales que aparecen en la literatura. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Función de Voigt; Función de Bessel; Función parabólica; Polinomio de Laguerre.

## Introduction

The Voigt functions  $K(x; y)$  and  $L(x; y)$  are effective tools for solving a wide variety of problems in probability, statistical communication theory, astrophysical spectroscopy, emission, absorption and transfer of radiation in heated atmosphere, plasma dispersion, neutron reactions and indeed in the several diverse field of physics and engineering associated with multi-dimensional analysis of spectral harmonics. The Voigt functions are natural consequences of the well-known Hankel transforms, Fourier transforms and Mellin transforms, resulting in connections with the special functions. Many mathematicians and physicists have contributed to a better understanding of these functions. For a number of generalizations of Voigt functions, we refer Yang (1994), Pathan, *et al.* (2003), (2006), Klusch (1991) and Srivastava, *et al.* (1998). Following the work of Srivastava, *et al.* (1987), Klusch (1991) has given a generalization of the Voigt functions in the form

$$V_{\mu, \nu}(x, y, z) = \sqrt{\frac{x}{2}} \int_0^{\infty} t^{\mu} e^{-yt-zt^2} J_{\nu}(xt) dt \quad (1.1)$$

$$= \frac{z^{-\alpha} x^{\nu+\frac{1}{2}}}{2^{\nu+\frac{1}{2}} \Gamma(\nu+1)} \left\{ \Gamma(\alpha) \psi_2 \left[ \alpha; \nu+1, \frac{1}{2}; -\frac{x^2}{4z}, -\frac{y^2}{4z} \right] - \frac{y}{\sqrt{z}} \Gamma\left(\alpha + \frac{1}{2}\right) \psi_2 \left[ \alpha + \frac{1}{2}; \nu+1, \frac{3}{2}; -\frac{x^2}{4z}, -\frac{y^2}{4z} \right] \right\} \quad (1.2)$$

$(\alpha = (\mu + \nu + 1)/2, x, y, z \in \mathbb{R}^+, R(\mu + \nu) > -1)$

where  $\psi_2$  denotes one of Humbert's confluent hypergeometric function of two variables, defined by Srivastava, *et al.* (1984), p.59

$$\psi_2[\alpha; \gamma, \gamma'; x, y] = \sum_{m, n=0}^{\infty} \frac{(\alpha)_{m+n}}{(\gamma)_m (\gamma')_n} \frac{x^m y^n}{m! n!}, \max\{|x|, |y|\} < \infty, \quad (1.3)$$

$(\lambda)_n$  being the Pochhammer symbol defined (for  $\lambda \in \mathbb{C}$ ) by

$$(\lambda)_n = \lambda(\lambda+1) \dots (\lambda+n-1) \quad (n \in \mathbb{N})$$

$$= \frac{\Gamma(\lambda+n)}{\Gamma(\lambda)} \quad (\lambda \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{Z}_0^-).$$

The classical Bessel function  $J_{\nu}(x)$  is defined by (see, Andrews, *et al.* (1999)).

$$J_{\nu}(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \left(\frac{z}{2}\right)^{\nu+2m}}{m! \Gamma(\nu+m+1)}, \quad (z \in \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0)) \quad (1.4)$$

so that

$$K(x, y) = V_{1/2, -1/2} \left( x, y, \frac{1}{4} \right) \quad (1.5)$$

and  $L(x, y) = V_{1/2, 1/2} \left( x, y, \frac{1}{4} \right)$

## Corresponding author:

M.A. Pathan; [mapathan@gmail.com](mailto:mapathan@gmail.com)

Received: Octubre 11, 2018

Accepted: April 4, 2019

Editor: Jorge Cossio Betancur

Observe that  $J_\nu(z)$  is the defining oscillatory kernel of Hankel's integral transform

$$(H_\nu f)(x) = \int_0^\infty f(t)J_\nu(xt)dt$$

${}_pF_q$  is the generalized hypergeometric series defined by (see, **Andrews, et al.** (1999)).

$$\begin{aligned} & {}_pF_q \left[ \begin{matrix} (\alpha_1), (\alpha_2), \dots, (\alpha_p); \\ (\beta_1), (\beta_2), \dots, (\beta_q); \end{matrix} z \right] \\ &= \sum_{n=0}^\infty \frac{(\alpha_1)_n \dots (\alpha_p)_n z^n}{(\beta_1)_n \dots (\beta_q)_n n!} \\ &= {}_pF_q(\alpha_1, \dots, \alpha_p; \beta_1, \dots, \beta_q; z) \end{aligned}$$

The following hypergeometric representation for the Jacobi polynomials  $P_n^{\alpha, \beta}(x)$  is a special case of the above generalized hypergeometric series

$$\begin{aligned} P_n^{\alpha, \beta}(x) &= (-1)^n P_n^{\alpha, \beta}(-x) = \\ & \frac{(\alpha + 1)_n}{n!} {}_2F_1(-n, \alpha + \beta + n + 1; \alpha + 1; \frac{1-x}{2}) \end{aligned} \tag{1.6}$$

Another special case [**Prudnikov, et al.** (1986), p.579 (18)] expressible in terms of hypergeometric function is

$$\begin{aligned} {}_1F_1(-n, \alpha + 1; z) &= \frac{n!}{(\alpha + 1)_n} L_n^{(\alpha)}(z) = \\ & \sum_{k=0}^n \frac{(\alpha + 1)_n}{(n - k)!k!(\alpha + 1)_k} (-z^k) \end{aligned} \tag{1.7}$$

where  $L_n^{(\alpha)}(z)$  is Laguerre polynomial [**Andrews, et al.** (1999)].

The generalized Hermite polynomials (known as Gould-Hopper polynomials)  $H_n^r(x, y)$  [**Gould, et al.** (1962)] defined by

$$e^{xt+yt^r} = \sum_{n=0}^\infty H_n^r(x, y) \frac{t^n}{n!} \tag{1.8}$$

are 2-variable Kampe de Fariet generalization of the Hermite polynomials **Dattoli, et al.** (2003) and **Gould, et al.** (1962)

$$H_n(x, y) = n! \sum_{r=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \frac{y^r x^{n-2r}}{r!(n-2r)!} \tag{1.9}$$

These polynomials usually defined by the generating function

$$e^{xt+yt^2} = \sum_{n=0}^\infty H_n(x, y) \frac{t^n}{n!} \tag{1.10}$$

reduce to the ordinary Hermite polynomials  $H_n(x)$  (when  $y = -1$  and  $x$  is replaced by  $2x$ ).

We recall that the Hermite numbers  $H_n$  are the values of the Hermite polynomials  $H_n(x)$  at zero argument that is  $H_n(0) = 0$ . A closed formula for  $H_n$  is given by

$$H_n = \begin{cases} 0, & \text{if } n \text{ is odd} \\ \frac{(-1)^{n/2} n!}{(\frac{n}{2})!}, & \text{if } n \text{ is even} \end{cases} \tag{1.12}$$

**Altin, et al.** (2006) presented a multivariable extension of the so called Lagrange-Hermite polynomials generated by [see **Altin, et al.** (2006), p.239, Eq.(1.2)] and **Chan, et al.** (2001):

$$\prod_{j=1}^r (1 - x_j t^j)^{-\alpha_j} = \sum_{n=0}^\infty h_n^{(\alpha_1, \dots, \alpha_r)}(x_1, \dots, x_r) t^n \tag{1.13}$$

( $\alpha_j \in \mathbb{C}(j = 1, \dots, r)$ );  $|t| < \min\{|x_1|^{-1}, |x_2|^{-\frac{1}{2}}, \dots, |x_r|^{-\frac{1}{r}}\}$

where

$$h_n^{(\alpha_1, \dots, \alpha_r)}(x_1, \dots, x_r) = \sum_{k_1+2k_2+\dots+rk_r=n} (\alpha_1)_{k_1} \dots (\alpha_r)_{k_r} \frac{x_1^{k_1}}{k_1!} \dots \frac{x_r^{k_r}}{k_r!}$$

The special case when  $r = 2$  in (1.13) is essentially a case which corresponds to the familiar (two-variable) Lagrange-Hermite polynomials  $h_n^{(\alpha_1, \alpha_2)}(x_1, x_2)$  considered by **Dattoli, et al.** (2003)

$$(1 - x_1 t)^{-\alpha_1} (1 - x_2 t^2)^{-\alpha_2} = \sum_{n=0}^\infty h_n^{(\alpha_1, \alpha_2)}(x_1, x_2) t^n \tag{1.14}$$

The present work is inspired by the frequent requirements of various properties of Voigt functions in the analysis of certain applied problems. In the present paper it will be shown that generalized Voigt function is expressible in terms of a combination of Kampe de Fariet's functions. We also give further generalizations (involving multivariables) of Voigt functions in terms of series and integrals which are specially useful when the parameters take on special values. The results of multivariable Hermite polynomials are used with a view to obtaining explicit representations of generalized Voigt functions. Our aim is to further introduce two more generalizations of (1.1) and another interesting explicit representation of (1.1) in terms of Kampe de Fariet series  $F_{l,m;n}^{p,q;r}$  [see (**Srivastava, et al.** (1984), p.63)]. Finally we discuss some useful consequences of Lagrange-Hermite polynomials and analyze the relations among different generalized Voigt functions.

### Generalized Voigt function $\Phi_{\mu, \nu, r}^{\alpha, \beta}$

In an attempt to generalize (1.1), we first investigate here the generalized Voigt function  $\Phi_{\mu, \nu, r}^{\alpha, \beta}$

Denition The generalized Voigt function  $\Phi_{\mu, \nu, r}^{\alpha, \beta}$  is defined by the Hankel transform

$$\begin{aligned} \Phi_{\mu, \nu, r}^{\alpha, \beta} &= \Phi_{\mu, \nu, r}^{\alpha, \beta}(x, y, z | X) \\ &= \sqrt{\frac{x}{2}} \int_0^\infty t^\mu e^{-yt-zt^r} {}_1F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xyt)_1 \\ & \quad F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xzt^r) J_\nu(xt) dt \end{aligned} \tag{2.1}$$

where  $x, y, z, X \in \mathbb{R}^+$ ,  $r > 1$ ,  $Re(\alpha) > -1$  and  $Re(\mu + \nu) > -1$ .

A fairly wide variety of Voigt functions can be represented in terms of the special cases of (2.1). We list below some cases.

The generalized Voigt function

$$\Phi_{\mu,\nu,2}^{\alpha,\beta} = \Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta} = \Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, z | X)$$

is defined by the integral representation

$$\Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, z | X) = \sqrt{\frac{x}{2}} \int_0^\infty t^\mu e^{-yt - zt^2} {}_1F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xyt)_1 F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xzt^2) J_\nu(xt) dt \quad (2.2)$$

where  $x, y, z, X \in \mathbb{R}^+$ ,  $Re(\alpha) > -1$  and  $Re(\mu + \nu) > -1$ .

An obvious special case of (2.1) occurs when we take  $r = 2$  and  $X = 1$ . We thus have

$$\omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, z) = \Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, z | X)|_{X=1} \quad (2.3)$$

$$= \sqrt{\frac{x}{2}} \int_0^\infty t^\mu e^{-yt - zt^2} {}_1F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -yt)_1 F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -zt^2) J_\nu(xt) dt$$

Clearly, the case  $X = 0$  in (2.1) reduces to a generalization of (1.1) in the form

$$V_{\mu,\nu,r}(x, y, z) = \Phi_{\mu,\nu,r}^{\alpha,\beta}(x, y, z | 0) \quad (2.4)$$

$$= \sqrt{\frac{x}{2}} \int_0^\infty t^\mu e^{-yt - zt^r} J_\nu(xt) dt$$

and (2.2) corresponds to (1.1) and (1.2) and we have

$$\Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, z | 0) = V_{\mu,\nu}(x, y, z)$$

and

$$V_{\mu,\nu}(x, y, 1/4) = V_{\mu,\nu}(x, y)$$

$$= (2\sqrt{z})^{\mu+1/2} \Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(2x\sqrt{z}, 2y\sqrt{z}, z | 0)$$

Moreover,  $\Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, 0 | 0)$  is the classical Laplace transform of  $t^\mu J_\nu(xt)$ . The case when  $z = 1/4$  and  $X = 0$  in (2.1) yields

$$\Omega_{1/2, -1/2}^{(\alpha,\beta)}\left(x, y, \frac{1}{4} | X\right) |_{X=0} = K(x, y) \text{ and } \Omega_{1/2, 1/2}^{(\alpha,\beta)}\left(x, y, \frac{1}{4} | X\right) |_{X=0} = L(x, y)$$

Using the definition (2.1) with  $\alpha = 0, \beta = 1$  and applying [Prudnikov, et al. (1986), p.581(35)]

$${}_1F_1(2; 1; x) = (1 + x) e^x;$$

we get a connection between  $V_{\mu,\nu}$  and  $\Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}$  in the form

$$\Omega_{\mu,\nu}^{0,1}(x, y, z | X)$$

$$= V_{\mu,\nu}(x; yX; zX) - XyV_{\mu+1,\nu}(x; yX; zX)$$

$$- XzV_{\mu+2,\nu}(x; yX; zX) + X^2yzV_{\mu+3,\nu}(x; yX; zX)$$

where  $V_{\mu,\nu}$  is given by (1.1).

Similarly setting  $\alpha = 1, \beta = 1$  and applying [Prudnikov, et al. (1986), p.582(53)]

$${}_1F_1(3; 2; x) = \frac{(2+x)}{2} e^x,$$

we get

$$\Omega_{\mu,\nu}^{1,1}(x, y, z | X) = V_{\mu,\nu}(x, y(1+X), z(1+X)) + \frac{X^2yz}{4} V_{\mu+3,\nu}(x, y(1+X), z(1+X)) - \frac{Xy}{2} V_{\mu+1,\nu}(x, y(1+X), z(1+X)) - \frac{Xz}{2} V_{\mu+2,\nu}(x, y(1+X), z(1+X))$$

### Explicit Representations for $\Phi_{\mu,\nu,r}^{\alpha,\beta}$

In (2.1), we expand  ${}_1F_1^s$  in series and integrate term. We thus find that

$$\Phi_{\mu,\nu,r}^{\alpha,\beta}(x, y, z | X) = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{(\alpha + \beta + 1)_m (\alpha + \beta + 1)_n y^m z^n (-X)^{m+n}}{(\alpha + 1)_m (\alpha + 1)_n m! n!} V_{\mu+m+nr,\nu}(x, y, z) \quad (3.1)$$

which may be rewritten in the form

$$\Phi_{\mu,\nu,r}^{\alpha,\beta}(x, y, z | X) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{m}{r} \rfloor} \frac{(\alpha + \beta + 1)_{m-nr} (\alpha + \beta + 1)_n y^{m-nr} z^n (-X)^{m-nr+n}}{(\alpha + 1)_{m-nr} (\alpha + 1)_n (m-nr)! n!} V_{\mu+m,\nu,r}(x, y, z) \quad (3.2)$$

where we have used the series manipulation [Srivastava, et al. (1984), p.101(5)]

$$\sum_{m,n=0}^{\infty} A(m, n) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\lfloor \frac{m}{r} \rfloor} A(m, m - nr)$$

By using a well-known Kummer's theorem [Prudnikov, et al. (1986), p.579(2)]

$${}_1F_1(a; b; x) = e^x {}_1F_1(b - a; b; -x);$$

in (2.1) yields

$$\Phi_{\mu,\nu,r}^{\alpha,\beta}(x, y, z | X) = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)_m (-\beta)_n y^m z^n (X)^{m+n}}{(\alpha + 1)_m (\alpha + 1)_n m! n!} V_{\mu+m+nr,\nu}(x, y(X+1), z(X+1)) \quad (3.3)$$

which further for  $X = 1$  and  $r = 2$  reduces to

$$\omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, z) = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)_m (-\beta)_n y^m z^n}{(\alpha + 1)_m (\alpha + 1)_n m! n!} V_{\mu+m+2n,\nu}(x, 2y, 2z)$$

For  $r = 2$ , (3.3) reduces to the representation

$$\Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, z|X) = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)_m(-\beta)_n y^m z^n (X)^{m+n}}{(\alpha+1)_m(\alpha+1)_n m!n!} V_{\mu+m+2n,\nu}(x, y(X+1), z(X+1)) \tag{3.4}$$

In view of the result (1.7)[Prudnikov, *et al.* (1986), p.579(18)] with  $\beta = n$  ( $n$  an integer),(3.4) reduces to

$$\Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,n}(x, y, z|X) = \sum_{k,r=0}^n \frac{(-(X+1)y)^k(-(X+1)z)^r n!n!}{k!r!(n-k)!(n-r)!(\alpha+1)_k(\alpha+1)_r} V_{\mu+k+2r,\nu}(x, (X+1)y, (X+1)z) \tag{3.5}$$

**Series expansions of  $\Omega_{\mu,\nu,r}^{\alpha,\beta}$  involving Jacobi, Laguerre and Hermite polynomials**

We consider the formula [Srivastava, *et al.* (1984), p.22] expressible in terms of Jacobi polynomials  $P_n^{(\alpha,\beta)}(x)$ [2] in the form

$$e^t {}_1F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xt) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{(\alpha + 1)_n} P_n^{(\alpha,\beta-n)}(1 - 2X)$$

which on replacing  $t$  by  $yt$  and  $t$  by  $zt^r$  gives

$${}_1F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xyt) = e^{-yt} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(yt)^n}{(\alpha + 1)_n} P_n^{(\alpha,\beta-n)}(1 - 2X)$$

and

$${}_1F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xzt^r) = e^{-zt^r} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(zt^r)^n}{(\alpha + 1)_n} P_n^{(\alpha,\beta-n)}(1 - 2X),$$

respectively. These last two results are now applied to (2.1) to yield a double series representation

$$\Phi_{\mu,\nu,r}^{\alpha,\beta} = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{y^m z^{rn}}{(\alpha + 1)_m(\alpha + 1)_n} P_m^{\alpha,\beta-m}(1 - 2X) \tag{4.1}$$

$$P_n^{\alpha,\beta-n}(1 - 2X) V_{\mu+m+rn,\nu}(x, y, z)$$

As before, set  $r = 2$  and use  $\Phi_{\mu,\nu,2}^{\alpha,\beta} = \Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}$  to get

$$\Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta} = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{y^m z^{2n}}{(\alpha + 1)_m(\alpha + 1)_n} P_m^{\alpha,\beta-m}(1 - 2X) P_n^{\alpha,\beta-n}(1 - 2X) V_{\mu+m+2n,\nu}(x, y, z) \tag{4.2}$$

Putting  $X=0$  and using the property  $P_n^{\alpha,\beta}(1) = \frac{(\alpha+1)_n}{n!}$  in (4.2),we obtain the following representation

$$V_{\mu,\nu}(x, y, z) = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{y^m z^{2n}}{m!n!} V_{\mu+m+2n,\nu}(2x, 2y, z) \tag{4.3}$$

Now consider a result [Prudnikov, *et al.* (1986), p.579 (8)] connecting  ${}_1F_1$  and Laguerre polynomial

$${}_1F_1(a, a - n; -Xt) = e^{-Xt} \frac{(-1)^n n!}{(1 - a)_n} L_n^{(a-n-1)}(Xt)$$

which on replacing  $t$  by  $yt$  and  $t$  by  $zt^r$  gives

$${}_1F_1(a, a - n; -Xyt) = e^{-Xyt} \frac{(-1)^n n!}{(1 - a)_n} L_n^{(a-n-1)}(Xyt)$$

and

$${}_1F_1(a, a - n; -Xzt^r) = e^{-Xzt^r} \frac{(-1)^n n!}{(1 - a)_n} L_n^{(a-n-1)}(Xzt^r)$$

respectively. These last two results are now applied to (2.1) to yield an integral representation

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{x}{2}} \int_0^{\infty} t^{\mu} e^{-(1+X)yt-(1+X)zt^r} L_n^{(a-n-1)}(Xyt) L_n^{(a-n-1)}(Xzt^r) J_{\nu}(xt) dt \\ &= \frac{(1 - a)_n(1 - a)_n}{n!n!} \Phi_{\mu,\nu,r}^{a-n-1,n}(x, (1 - X)y, (1 - X)z|X) \end{aligned} \tag{4.4}$$

The use of generalized Hermite polynomials defined by (1.8) can be exploited to obtain the series representations of (2.1). We have indeed

$$\begin{aligned} \Phi_{\mu,\nu,r}^{\alpha,\beta} &= \Phi_{\mu,\nu,r}^{\alpha,\beta}(x, y, z|X) = \sqrt{\frac{x}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} H_n^r(u, v) \\ & \int_0^{\infty} t^{\mu} e^{-(y+u)t-(z+v)t^r} {}_1F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xyt) \\ & {}_1F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xzt^r) J_{\nu}(xt) dt \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} H_n^r(u, v) \Phi_{\mu+n,\nu,r}^{\alpha,\beta}(x, y + u, z + v|X) \end{aligned} \tag{4.5}$$

by applying (1.8) to the integral on the right of (2.1). Since

$$\lim_{x \rightarrow 0} x^{-\nu} J_{\nu}(x) = \frac{1}{2^{\nu} \Gamma(\nu + 1)}$$

we may write a limiting case of (2.1) in the form

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, z|X)}{x^{\nu+1/2}} &= \frac{2^{\nu+1/2}}{\Gamma(\nu + 1)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(u, v)}{n!} \\ & \int_0^{\infty} t^{\mu+\nu+n} e^{-(y+u)t-(z+v)t^2} {}_1F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xyt) \\ & {}_1F_1(\alpha + \beta + 1, \alpha + 1; -Xzt^2) dt \end{aligned}$$

which further for  $X=0$  reduces to

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, z|0)}{x^{\nu+1/2}} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{V_{\mu,\nu}(x, y, z)}{x^{\nu+1/2}} \\ &= \frac{2^{\nu+1/2}}{\Gamma(\nu + 1)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(u, v)}{n!} \int_0^{\infty} t^{\mu+\nu+n} e^{-(y+u)t-(z+v)t^2} dt \end{aligned} \tag{4.6}$$

Now in (4.6), using [Erdelyi, et al. (1954), 146(24)]

$$\int_0^\infty t^\sigma e^{-yt-zt^2} dt = 2^{(\sigma+1)/2} \Gamma(\sigma+1) e^{y^2/8z} D_{-\sigma-1} \left( \sqrt{\frac{y}{2z}} \right) \quad (\text{Re}(\sigma+1) > 0, \text{Re } y > 0)$$

where  $D_\nu(x)$  is parabolic cylinder function [Prudnikov, et al. (1986)], we have

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{V_{\mu,\nu}(x, y, z)}{x^{\nu+1/2}} = \frac{2^{\nu+1/2} e^{(y+u)^2/8(z+v)}}{\Gamma(\nu+1)} \sum_{n=0}^\infty \frac{2^{n/2} (\mu+\nu+1)_n}{n!} \quad (4.7)$$

$$H_n(u, v) D_{-\mu-\nu-n-1} \left( \sqrt{\frac{y+u}{2(z+v)}} \right)$$

A reduction of interest involves the case of replacing  $y$  by  $y-u$ ,  $z$  by  $z-v$  and  $\mu$  by  $\mu-v$ , and we obtain a known result of Pathan and Shahwan [10] (for  $m=2$ ) in its correct form

$$\int_0^\infty t^\mu e^{-(y-u)t-(z-v)t^2} dt = \Gamma(\mu+1) e^{\frac{y^2}{8z}} \sum_{n=0}^\infty \frac{2^{\frac{\mu+n+1}{2}} (\mu+1)_n}{n!} \quad (4.8)$$

$$H_n(u, v) D_{-\mu-n-1} \left( \sqrt{\frac{y}{2z}} \right)$$

### Connections

We consider the following two integrals

$$I_1 = \sqrt{\frac{x}{2}} \int_0^\infty t^\mu e^{-yt-zt^r} {}_1F_1(\alpha+\beta+1, \alpha+1; -Xyt) {}_1F_1(\alpha+\beta+1, \alpha+1; -Xzt^r) H_\nu(xt) dt \quad (5.1)$$

where  $H_\nu(x)$  are Struve functions [Luke (1969), p.55(8)],  $x, y, z, X \in \mathbb{R}^+, r > 1, \text{Re}(\alpha) > -1$  and  $\text{Re}(\mu+\nu) > -1$ .

$$I_2 = \sqrt{\frac{x}{2}} \int_0^\infty t^\mu e^{-yt-zt^r} {}_1F_1(\alpha+\beta+1, \alpha+1; -Xyt) {}_1F_1(\alpha+\beta+1, \alpha+1; -Xzt^r) s_{\lambda,\nu}(xt) dt \quad (5.2)$$

where  $s_{\lambda,\nu}(x)$  are Lommel functions [Luke (1969), p.54(9.4.5)(3)],  $x, y, z, X \in \mathbb{R}^+, r > 1, \text{Re}(\alpha) > -1$  and  $\text{Re}(\mu+\nu) > -1$ .

To evaluate these two integrals, we will apply the following two results [Luke (1969), p.55(8)] and [Luke (1969), p.54(9.4.5)(3)]

$$H_\nu(x) = \left(\frac{x}{2\pi}\right)^{1/2} \sum_{n=0}^\infty \frac{(x/2)^n}{n!(n+1/2)} J_{n+\nu+1/2} \quad (5.3)$$

$$s_{\lambda,\nu}(x) = \Gamma\left(\frac{\lambda+\nu+1}{2}\right) \frac{x^{(\lambda-\nu+1)/2}}{2^{(\lambda+\nu-1)/2}} \sum_{n=0}^\infty \frac{(x/2)^n}{n!(2n+\lambda-\nu+1)} J_{n+(\lambda-\nu+1)/2} \quad (5.4)$$

Making appropriate substitution of  $H_\nu(x)$  and  $s_{\lambda,\nu}(x)$  from these two results in (5.1) and (5.2), we get

$$I_1 = \left(\frac{x}{2\pi}\right)^{1/2} \sum_{n=0}^\infty \frac{x^n}{2^n n!(n+1/2)} \Phi_{\mu+n+1/2, \nu+n+1/2, r}^{\alpha, \beta}(x, y, z|X) \quad (5.5)$$

$$I_2 = \Gamma\left(\frac{\lambda+\nu+1}{2}\right) \frac{x^{(\lambda-\nu+1)/2}}{2^{(\lambda+\nu-1)/2}} \sum_{n=0}^\infty \frac{x^n}{2^n n!(2n+\lambda-\nu+1)} \Phi_{\mu+n+(\lambda-\nu+1)/2, n+(\lambda-\nu+1)/2, r}^{\alpha, \beta}(x, y, z|X) \quad (5.6)$$

For  $X=0$ , (5.1) and (5.2) reduce to

$$\int_0^\infty t^\mu e^{-yt-zt^r} H_\nu(xt) dt = \left(\frac{x}{2\pi}\right)^{1/2} \sum_{n=0}^\infty \frac{x^n}{2^n n!(n+1/2)} V_{\mu+n+1/2, \nu+n+1/2, r}(x, y, z) \quad (5.7)$$

$$\sum_{n=0}^\infty \frac{x^n}{2^n n!(2n+\lambda-\nu+1)} V_{\mu+n+(\lambda-\nu+1)/2, n+(\lambda-\nu+1)/2, r}(x, y, z) \quad (5.8)$$

Setting  $r=2$  and  $z=1/4$  in (5.7) and comparing with a known result of [Pathan, et al. (2006), p.78(2.3)], we get

$$\sqrt{\frac{x}{2}} \int_0^\infty t^\mu e^{-yt-\frac{1}{4}t^2} {}_1F_2(1, 3/2, 1+\nu; -\frac{x^2 t^2}{4}) dt = \left(\frac{x}{2\pi}\right)^{1/2} \sum_{n=0}^\infty \frac{x^n}{2^n n!(n+1/2)} V_{\mu+n+1/2, \nu+n+1/2}(x, y) \quad (5.9)$$

$$= \Gamma(\mu+1) x^{\frac{1}{2}} 2^{\frac{\mu}{2}} \sum_{n=0}^\infty \frac{(\mu+1)_n (-1)^n x^{2n}}{(3/2)_n (\nu+1)_n 2^n} e^{\frac{y^2}{2}} D_{-\mu-2n-1}(y\sqrt{2}) \quad (5.10)$$

Setting  $r=2$  in (5.8) and using [Prudnikov, et al. (1986), p.108], we are led to another possibility of dening the Voigt function in the form of Appell function. Thus we have

$$I_3 = \int_0^\infty t^\mu e^{-yt-zt^2} s_{\lambda,\nu}(xt) dt = \frac{x^{\lambda+1} y^{-a}}{(\lambda+1)^2 - \nu^2} \sum_{r=0}^\infty \frac{(-z)^r \Gamma(a+2r)}{r! y^{2r}} {}_3F_2\left(1, \frac{a}{2} + r, \frac{a+1}{2} + r; \frac{3+\lambda-\nu}{2}, \frac{3+\lambda+\nu}{2}; -\frac{x^2}{y^2}\right) = \Gamma\left(\frac{\lambda+\nu+1}{2}\right) \frac{x^{(\lambda-\nu)/2}}{2^{(\lambda+\nu-2)/2}} \sum_{n=0}^\infty \frac{x^n}{2^n n!(2n+\lambda-\nu+1)} V_{\mu+n+(\lambda-\nu+1)/2, n+(\lambda-\nu+1)/2, r}(x, y, z) \quad (5.11)$$

where  $a = \lambda + \mu + 1$ .



**Voigt function and numbers**

First we consider a number which we denote by  $A_k$  with a generating function

$$\sum_{k=0}^{\infty} A_k \frac{t^k}{k!} = (1+t)^{-\alpha} (1+t^2)^{-\beta} \tag{6.1}$$

The series expansion for  $A_k$  is

$$A_k = k! \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{k}{2} \rfloor} \frac{(-1)^{k+m} (\alpha)_{k-2m} (\beta)_m}{(k-2m)! m!}$$

On comparing (6.1) with (1.14), we find that the number  $A_k$  and Lagrange-Hermite numbers are related as

$$A_k = k! h_k^{(\alpha, \beta)}(-1, -1)$$

Moreover from (6.1), we can obtain the following two Laplace transforms

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} \frac{t^{\mu} e^{-yt} J_{\nu}(xt)}{(1+t)^{\alpha} (1+t^2)^{\beta}} dt \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A_k}{k!} \left[ \frac{\Gamma(\mu + \nu + k + 1)}{y^{\mu + \nu + k + 1}} \left(\frac{x}{2}\right)^{\nu} \right. \\ & \left. \left(\frac{y^2}{x^2 + y^2}\right)^{\mu + \nu + 1/2} {}_2F_1\left(\frac{\nu - \mu - k + 1}{2}, \frac{\nu - \mu - k}{2}; \nu + 1; -\frac{x^2}{y^2}\right) \right] \end{aligned} \tag{6.2}$$

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} \frac{t^{\mu} e^{-yt} \ln t}{(1+t)^{\alpha} (1+t^2)^{\beta}} dt = \\ & \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A_k}{k!} \frac{\Gamma(\mu + k + 1)}{y^{\mu + k + 1}} [\Psi(\mu + k + 1) - \ln y] \end{aligned} \tag{6.3}$$

where  $\Psi$  is logarithmic derivative of  $\Gamma$  function [Andrews, et al. (1999)].

Now we start with a result [Srivastava, et al. (1984), p.84 (15)] for Laguerre polynomials

$$e^{-yt} = (1+t)^{-\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} L_n^{(\alpha-n)}(y) t^n$$

which on replacing  $t$  by  $t^2$ ,  $\alpha$  by  $\beta$  and  $y$  by  $z$  gives

$$e^{-zt^2} = (1+t^2)^{-\beta} \sum_{m=0}^{\infty} L_m^{(\beta-m)}(z) t^{2m}$$

On multiplying these two results yields

$$\begin{aligned} e^{-yt-zt^2} &= (1+t)^{-\alpha} (1+t^2)^{-\beta} \\ & \sum_{n,m=0}^{\infty} L_n^{(\alpha-n)}(y) L_m^{(\beta-m)}(z) t^{n+2m} \end{aligned} \tag{6.4}$$

which is equivalent to

$$\frac{e^{-yt-zt^2}}{(1+t)^{-\alpha} (1+t^2)^{-\beta}} = \sum_{n,m=0}^{\infty} L_n^{(\alpha-n)}(y) L_m^{(\beta-m)}(z) t^{n+2m} \tag{6.5}$$

Using (6.1) and (1.10) in (6.4) gives

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{\infty} H_n(-y, -z) \frac{t^n}{n!} = \\ & \sum_{k=0}^{\infty} A_k \frac{t^k}{k!} \sum_{n,m=0}^{\infty} L_n^{(\alpha-n)}(y) L_m^{(\beta-m)}(z) t^{n+2m} \end{aligned} \tag{6.6}$$

Comparing the coefficients of  $t^n$  on both the sides of (6.6), we get the the following representation of Hermite polynomials in the form

$$\begin{aligned} H_n(-y, -z) &= \\ n! \sum_{k=0}^n \frac{A_k}{k!} \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n-k}{2} \rfloor} L_{n-k-2m}^{(\alpha-n-k-2m)}(y) L_m^{(\beta-m)}(z) \end{aligned} \tag{6.7}$$

In view of the result (1.12) expressed for Hermite numbers  $H_n$ , for  $y = z = 0$ , (6.7) gives

$$\begin{aligned} H_n &= \begin{cases} 0, & \text{if } n \text{ is odd} \\ \frac{(-1)^{n/2} n!}{(\frac{n}{2})!}, & \text{if } n \text{ is even} \end{cases} \\ &= \begin{cases} 0, & \text{if } n \text{ is odd} \\ \sum_{k=0}^n \frac{A_k}{k!} \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n-k}{2} \rfloor} \frac{(\alpha-n-k-2m+1)_n (\beta-m+1)_m}{m!}, & \text{if } n \text{ is even} \end{cases} \end{aligned} \tag{6.8}$$

Now we turn to the derivation of the representation of voigt function from (6.7). Multiply both the sides of (6.4) by  $t^{\mu} e^{-y_1 t - z_1 t^2} J_{\nu}(xt)$  and integrate with respect to  $t$  from 0 to  $\infty$  to get

$$\begin{aligned} V_{\mu, \nu}(x, y + y_1, z + z_1) &= \\ & \sqrt{\frac{x}{2}} \sum_{n,m=0}^{\infty} L_n^{(\alpha-n)}(y) L_m^{(\beta-m)}(z) \\ & \int_0^{\infty} \frac{t^{\mu+n+2m} e^{-y_1 t - z_1 t^2} J_{\nu}(xt)}{(1+t)^{\alpha} (1+t^2)^{\beta}} dt \end{aligned} \tag{6.9}$$

which on using (6.1) gives

$$\begin{aligned} V_{\mu, \nu}(x, y + y_1, z + z_1) &= \\ & \sum_{k,n,m=0}^{\infty} \frac{A_k}{k!} L_n^{(\alpha-n)}(y) L_m^{(\beta-m)}(z) V_{\mu+n+k+2m, \nu}(x, y_1, z_1) \end{aligned} \tag{6.10}$$

For  $y = z = 0$ , (6.9) gives an interesting relation between Voigt functions in the form

$$\begin{aligned} V_{\mu, \nu}(x, y_1, z_1) &= \\ & \sum_{k,n,m=0}^{\infty} \frac{A_k (\alpha - n + 1)_n (\beta - m + 1)_m}{k! n! m!} V_{\mu+n+k+2m, \nu}(x, y_1, z_1) \end{aligned} \tag{6.11}$$

Yet, another immediate consequence of (6.9) is obtained by taking  $y_1 = y = z_1 = 0$  and applying (6.2). Thus we have

$$V_{\mu,\nu}(x, 2y, z) = \left(\frac{x}{2}\right)^{\nu+1/2} \sum_{n,m,k=0}^{\infty} L_n^{(\alpha-n)}(y)L_m^{(\beta-m)}(z) \frac{A_k}{k!} \left[ \frac{\Gamma(\mu+n+2m+\nu+k+1)}{y^{\mu+n+2m+\nu+k+1}} \left(\frac{y^2}{x^2+y^2}\right)^{\mu+n+2m+\nu+1/2} \right. \\ \left. {}_2F_1\left(\frac{\nu-\mu-n-2m-k+1}{2}, \frac{\nu-\mu-n-2m-k}{2}; \nu+1; -\frac{x^2}{y^2}\right) \right] \quad (6.12)$$

By setting  $z=0$  in (6.4) and multiplying both the sides by  $t^\mu e^{-\gamma t} \ln t$ , integrating with respect to  $t$  from  $0$  to  $\infty$  and using (6.3) and [Erdelyi, *et al.* (1954), p.148(4)]

$$\int_0^\infty t^\mu e^{-\gamma t} \ln t dt = \frac{\Gamma(\mu+1)}{\gamma^{\mu+1}} [\Psi(\mu+1) - \ln \gamma],$$

we get

$$\sum_{k,n,m=0}^{\infty} \frac{A_k(\beta-m+1)_m}{k!m!} \frac{(\mu+1)_{n+2m+k}}{y^{n+2m+k}} L_n^{(\alpha-n)}(y) [\Psi(\mu+n+2m+k+1) - \ln y] \\ = [\Psi(\mu+1) - \ln 2y] \quad (6.13)$$

where  $\Psi$  is logarithmic derivative of  $\Gamma$  function [Srivastava, *et al.* (1984)].

If, in (6.5), we set  $\alpha = \beta = 1$ , multiply both the sides by  $t^\mu e^{-\gamma t - zt^2} J_\nu(xt)$  and integrate with respect to  $t$  from  $0$  to  $\infty$ , we get a generalization of (6.10) in the form

$$\sum_{n,m=0}^{\infty} L_n^{(1-n)}(y)L_m^{(1-m)}(z)V_{\mu+n+2m,\nu}(x, y, z) \\ = V_{\mu,\nu}(x, 2y, 2z) + V_{\mu+1,\nu}(x, 2y, 2z) \\ + V_{\mu+2,\nu}(x, 2y, 2z) + V_{\mu+3,\nu}(x, 2y, 2z)$$

### Some useful consequences of Lagrange-Hermite polynomials.

Now we start with a result [Srivastava, *et al.* (1984), p.84 (15)] for Laguerre polynomials written in a slightly different form

$$e^{-x_1yt} = (1-x_1t)^{-\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} L_n^{(\alpha-n)}(y)(-x_1t)^n$$

which on replacing  $t$  by  $t^2$ ,  $\alpha$  by  $\beta$ ,  $x_1$  by  $x_1$  and  $y$  by  $z$  gives

$$e^{-x_2zt^2} = (1-x_2t^2)^{-\beta} \sum_{m=0}^{\infty} L_m^{(\beta-m)}(z)(-x_2t^2)^m$$

On multiplying these two results and adjusting the variables yields

$$e^{yt+zt^2} = (1-x_1t)^{-\alpha} (1-x_2t^2)^{-\beta} \sum_{n,m=0}^{\infty} (-1)^{n+m} x_1^n x_2^m L_n^{(\alpha-n)}\left(\frac{y}{x_1}\right) L_m^{(\beta-m)}\left(\frac{z}{x_2}\right) t^{n+2m} \quad (7.1)$$

which is equivalent to

$$1 = \frac{e^{-yt-zt^2}}{(1-x_1t)^\alpha (1-x_2t^2)^\beta} \sum_{n,m=0}^{\infty} (-1)^{n+m} x_1^n x_2^m L_n^{(\alpha-n)}\left(\frac{y}{x_1}\right) L_m^{(\beta-m)}\left(\frac{z}{x_2}\right) t^{n+2m} \quad (7.2)$$

Using the definition of Lagrange-Hermite polynomials  $h_k^{(\alpha_1, \alpha_2)}(x_1, x_2)$  given by (1.14) in (7.2), we get

$$1 = e^{-yt-zt^2} \sum_{k,n,m=0}^{\infty} (-1)^{n+m} x_1^n x_2^m h_k^{(\alpha, \beta)}(x_1, x_2) L_n^{(\alpha-n)}\left(\frac{y}{x_1}\right) L_m^{(\beta-m)}\left(\frac{z}{x_2}\right) t^{k+n+2m}$$

which on replacing  $n$  by  $n-2m$  gives

$$e^{yt+zt^2} = \sum_{k,n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} (-1)^{n-m} x_1^{n-2m} x_2^m h_{n-2m}^{(\alpha, \beta)}(x_1, x_2) L_{n-2m}^{(\alpha-n+2m)}\left(\frac{y}{x_1}\right) L_m^{(\beta-m)}\left(\frac{z}{x_2}\right) t^{k+n} \quad (7.4)$$

Again applying the definition of Hermite polynomials given by (1.10) in (7.4), replacing  $n$  by  $n-k$  and comparing the coefficients of  $t^n$ , we get the following representation of  $H_n(y, z)$

$$H_n(y, z) = n! \sum_{k=0}^n \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n-k}{2} \rfloor} (-1)^{n-k-m} x_1^{n-k-2m} x_2^m h_{n-k-2m}^{(\alpha, \beta)}(x_1, x_2) L_{n-k-2m}^{(\alpha-n+k-2m)}\left(\frac{y}{x_1}\right) L_m^{(\beta-m)}\left(\frac{z}{x_2}\right) \quad (7.5)$$

which reduces to (6.7) when we take  $x_1 = x_2 = 1$  and use  $A_k = k! h_k^{(\alpha, \beta)}(-1, -1)$ .

It is also fairly straightforward to get a representation of generalized Voigt function  $V_{\mu,\nu}$  by appealing (7.3). We multiply both the sides by  $t^\mu e^{-\gamma t - zt^2} J_\nu(xt)$  and integrate with respect to  $t$  from  $0$  to  $\infty$ . Thus we get

$$V_{\mu,\nu}(x, y_1, z_1) = \sum_{k,n,m=0}^{\infty} (-1)^{n+m} x_1^n x_2^m h_k^{(\alpha, \beta)}(x_1, x_2) L_n^{(\alpha-n)}\left(\frac{y}{x_1}\right) L_m^{(\beta-m)}\left(\frac{z}{x_2}\right) V_{\mu+k+n+2m,\nu}(x, y+y_1, z+z_1) \quad (7.6)$$

On the other hand, multiplying both the sides of (7.4) by

$$t^\mu e_1^{-2yt-2zt^2} {}_1F_1(\alpha+\beta+1, \alpha+1; -Xyt) {}_1F_1(\alpha+\beta+1, \alpha+1; -Xzt^2) J_\nu(xt)$$

and integrating with respect to  $t$  from 0 to  $\infty$  and then using (2.2), we get a generalization of (6.10) in the form

$$\Omega_{\mu,\nu}^{\alpha,\beta}(x, y, z|X) = \sum_{k,n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} (-1)^{n-m} x_1^{n-2m} x_2^m h_{n-2m}^{(\alpha,\beta)}(x_1, x_2) \quad (7.7)$$

$$L_{n-2m}^{(\alpha-n-2m)}\left(\frac{y}{x_1}\right) L_m^{(\beta-m)}\left(\frac{z}{x_2}\right) \Omega_{\mu+k+n,\nu}^{\alpha,\beta}(x, 2y, 2z|\frac{1}{2}X)$$

## References

- Altin, A, Erkus, E.** (2006). On a multivariable extension of the Lagrange-Hermite polynomials, *Integral Transforms Spec. Funct.*, **17**: 239-244.
- Andrews, GE, Askey, R, Roy, R.** (1999). *Special Functions*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Chan, WChC, Chyan, ChJ, Srivastava, HM.** (2001). The Lagrange Polynomials in Several Variables, *Integral Transforms Spec. Funct.* **12** (2): 139-148.
- Dattoil, G, Ricci, PE, Cesarano, C.** (2003). The Lagrange polynomials the associated generalizations, and the umbral calculus, *Integral Transforms Spec. Funct.* **14**: 181-186.
- Erdelyi, A. et al.** (1954). *Tables of Integral Transforms*, Vol. I. Mc Graw Hill, New York, Toronto, London.
- Gould, HW, Hopper, AT.** (1962). Operational formulas connected with two generalizations of Hermite polynomials, *Duke Math. J.* **29**: 51-63.
- Klusch, D.** (1991). Astrophysical Spectroscopy and neutron reactions, *Integral transforms and Voigt functions*, *Astrophys. Space Sci.* **175**: 229-240.
- Luke, YL.** (1969). *The Special Functions and their approximations*, Academic Press, New York, London.
- Pathan, MA, Kamarujjama, M, Khurshed Alam M.** (2003). Multiindices and multivariable presentations of Voigt Functions, *J. Comput. Appl. Math.* **160**: 251-257.
- Pathan, MA, Shahwan, MJS.** (2006). New representations of the Voigt Functions, *Demonstratio Math.* **39**: 75-80.
- Prudnikov, AP, et al.** (1986). *Integral and Series*, Vol. 2, Special Functions, Gordon and Breach Sciences Publisher, New York.
- Srivastava, HM, Joshi, CM.** (1967). Certain double Whittaker transforms of generalized hypergeometric functions, *Yokohama Math. J.* **15**: 19-31.
- Srivastava, HM, Manocha, HL.** (1984). *A Treatise on Generating Functions*, Ellis Horwood Limited, Chichester.
- Srivastava, HM, Miller, EA.** (1987). A Unied presentation of the Voigt functions, *Astrophys Space Sci.* **135**: 111-115.
- Srivastava, HM, Pathan, MA, Kamarujjama, M.** (1998). Some unied presentations of the generalized Voigt functions, *Comm. Appl. Anal.* **2**: 49-64.
- Yang S.** (1994). A unication of the Voigt functions, *Int.J.Math. Educ.Sci.Technol.* **25**: 845-851.

## José Luis Villaveces Cardoso

1945-2019



El pasado 16 de enero José Luis Villaveces dejó este mundo. A muchos de quienes compartimos espacios con él nos apena saber que hemos de renunciar tan pronto a su presencia. Es difícil decir algo diferente de lo que la mayoría de la comunidad académica de nuestro país conoce de tiempo atrás o ha leído en las múltiples manifestaciones de aprecio que siguieron a su fallecimiento. Sin embargo, para quienes llegamos al Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia a principios de la década de los 80, José Luis comenzó siendo un profesor recién llegado de Europa, que calzaba botas de alpinista, y muy pronto se convirtió en uno de nuestros profesores más queridos.

Ya nos enteraríamos de que se había graduado poco más de diez años atrás, que pronto se había interesado por la

fisicoquímica, que buscó nuevos horizontes en el entonces muy joven campo de la química cuántica, lo que lo llevó al grupo de Química Cuántica de la Universidad de Uppsala (el primero que así se denominó en el mundo), y que regresaba de hacer su doctorado en Bélgica en ese campo. Sus inquietudes sobre la estructura de las moléculas, la epistemología y la historia de la ciencia y su enseñanza, le llevaron a convocar a un grupo de colegas y estudiantes que pronto se conocerían como los cazadores del electrón perdido.

Como profesor siempre escuchaba atento las preguntas y respondía ofreciendo una mirada alternativa, cuando no irreverente y provocadora. Un verdadero Sócrates en acción, tuvimos que reconocer. Sus inquietudes pedagógicas darían lugar a una imparable reacción que movilizó un profundo cambio en los planes de estudio, no solo de su carrera, sino de toda la Universidad Nacional de Colombia. No satisfecho con lo que se podía hacer desde la carrera de Química, pronto se embarcó en la creación del primer programa doctoral en ciencias de nuestro país, muestra de su confianza en que la investigación podía dar mucho más a nuestra sociedad. Con la creación del doctorado en química nació también una nueva inquietud intelectual, la química matemática, campo al cual dedicó sus investigaciones desde entonces.

Como gestor de ciencia y educación su influencia no fue menor. Su acción se inició en la dirección de investigaciones de la Universidad Nacional y pronto alcanzó una escala mayor. Entre sus muchísimos logros en este campo basta con recordar algunos hitos: la formalización de los grupos

de investigación cuando fue subdirector de Colciencias, la prohibición de expulsar a las adolescentes embarazadas de los colegios cuando fue Secretario Distrital de Educación, y la medición y contextualización del quehacer investigativo desde el Observatorio de Ciencia y Tecnología, espacios donde también creó escuela como el gran maestro que nunca dejó de ser. Todo ello constituye un ejercicio de honestidad intelectual al servicio de la sociedad.

Quienes tuvimos la oportunidad de conocerlo personalmente muy difícilmente podremos olvidar a aquel lector acucioso y profundamente crítico, los libros que nos obsequiaba, las exóticas lecturas sugeridas y esos grandes relatos que procuraban tejer relaciones entre los tópicos más diversos para ofrecer una estructura compleja que permitiese ver holísticamente la naturaleza y la sociedad. Sin esos mapas grandiosos nos deja José Luis.

**Edgar Eduardo Daza**

Universidad Nacional de Colombia

Durante la sesión solemne especial de celebración del 83 aniversario del establecimiento de la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales**, realizada el martes 28 de mayo de 2019, se posesionaron como miembros honorarios los académicos de número doctores Jaime Ignacio Lesmes Camacho y Carlos Eduardo Vasco Uribe y los doctores Hernán Jaramillo Salazar, Fernando Chaparro Osorio y Clemente Forero Pineda.

Compartimos las palabras del doctor Enrique Forero, presidente de la Academia y del doctor Clemente Forero Pineda en nombre de tres de los homenajeados. Los académicos de número, doctores Lesmes y Vasco, recibieron su condecoración con un breve agradecimiento personal.

### Palabras del doctor Enrique Forero Presidente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Señora Subdirectora de Colciencias, Dra. Sonia Monroy

Dr. Jeremy McNeil, co-chair, Presidentes y representantes de las Academias miembros de la Red Interamericana de Academias de Ciencias,

Dr. David Rubio, Presidente y demás Presidentes y delegados de las instituciones miembros del Colegio Máximo de las Academias de Colombia

Señores rectores de Universidades colombianas

Estimados miembros de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Dr. Francisco Marcellán, miembro de la Academia que nos visita desde España

Dr. Plutarco Cala, miembro de la Academia que nos visita desde los países escandinavos

Invitados especiales

Señoras y señores

**Colaboración es la palabra que quiero enfatizar hoy.** Porque todo lo que está ocurriendo en estos siete días apunta a la colaboración.

El trabajo que todos hacemos está dirigido a construir un mundo mejor, más equitativo para nosotros y para las futuras generaciones. Un mundo en el que la ciencia, la tecnología y la educación ocupen un lugar preponderante en las decisiones de los gobiernos y de los entes internacionales.

Todo lo que nosotros hacemos encaja perfectamente en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, así, al comenzar, no hubiera sido esa la intención.

**La Red Interamericana de Academias de Ciencias**, al igual que todas las Academias que hacen parte de la Inter Academy Partnership, tiene cinco programas bandera: Energía, Agua, Educación, Mujeres en Ciencia y Nutrición y Seguridad Alimentaria. El efecto que estos esfuerzos

conjuntos de colaboración entre centenares de científicos de todos los países, tenga en el desarrollo de políticas públicas, puede ser muy importante.

**El Colegio Máximo de las Academias de Colombia** viene trabajando en proyectos conjuntos desde hace varios años. Nuevamente, la palabra colaboración adquiere gran valor, pues es considerable el impacto que hemos tenido en lograr la comprensión de los entes gubernamentales, y en alguna medida de la sociedad, sobre la inmensa capacidad de las Academias para contribuir a la búsqueda de soluciones a problemas en prácticamente todas las áreas estratégicas para el país, tales como salud, educación, ciencia y tecnología, historia, geografía, economía, ingeniería, jurisprudencia, arquitectura y arte.

La Academia viene colaborando estrechamente con la **Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia** en distintas iniciativas, particularmente en lo relacionado con la construcción de política pública en Ciencia y Tecnología.

La Academia ha creado **lazos de colaboración con 15 de las más importantes universidades del país**. Representantes de prácticamente todas ellas nos han acompañado en varias de las actividades de los últimos días. Uno ejemplo es el apoyo incondicional que hemos recibido de la Universidad Central de Bogotá para la realización de este aniversario de la Academia.

La Academia está interesada en crear lazos de colaboración entre científicos colombianos. Ya los lazos entre los Académicos están creados. Ahora hemos decidido acercarnos a las nuevas generaciones a nuestras actividades y hemos establecido un grupo que estamos llamando **Academia Joven**. Aquí están varios de ellos y les ruego que se pongan de pie. Es un paso importante para la Academia y para el país.

Para cumplir uno de nuestros objetivos, también reconocemos a quienes han hecho contribuciones a la ciencia, a la educación y a la Academia, y han colaborado entre ellos y con nosotros. Por esa razón, hoy exaltamos a la categoría de Miembro Honorario, máxima distinción que otorga la Academia, a cinco destacados científicos e intelectuales colombianos.

La presencia en Colombia de tres científicos provenientes de Australia y dos de China Popular, es el resultado de la iniciativa liderada por el Académico Edgar González, con el apoyo de la Cancillería colombiana y Colciencias, de establecer vínculos entre Colombia y los países de la cuenca del Pacífico para enfrentar problemas conjuntos. Actualmente se está iniciando trabajo en el problema de la contaminación de aguas por metales pesados, un problema muy grave en varios de nuestros países. Una visita de trabajo que realizamos el Académico Gabriel Roldán y yo el año pasado a China Popular y Australia, tuvo como objetivo dar seguimiento a esa iniciativa, y la visita de los doctores Zhixiang Wei, Hongjun Xiao, Saul Cunningham, Alex Held y Jenny Graves es uno de los resultados tangibles.

Trabajando juntos, compartiendo experiencias, conversando, reconociendo y aceptando diferencias y semejanzas, colaborando, vamos a hacer de este un mundo mejor.

La presencia de todos ustedes, compartiendo con nosotros ésta celebración, nos llena de optimismo en el presente y el futuro de Colombia y de todos los países aquí representados.

Muchas gracias. ■

---

### **Agradecimiento de Hernán Jaramillo Salazar, Fernando Chaparro Osorio y Clemente Forero Pineda a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.**

Por Clemente Forero Pineda

En nombre de Fernando Chaparro Osorio, Hernán Jaramillo Salazar y en mi nombre, quiero expresar nuestro profundo agradecimiento a la Academia por habernos dado la inmensa distinción de hacernos miembros honorarios de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. La Academia es una institución cuyas raíces se remontan a la Independencia y cuya historia ha ido de la mano de la de la ciencia y la construcción de la nación colombiana. Es un inmenso honor que recibimos hoy, con modestia, tres personas que provenimos de las ciencias sociales y que le hemos dedicado una parte importante de nuestras vidas a comprender y también a promover el fenómeno de la ciencia en Colombia.

Me atrevo a afirmar que, al honrarnos de una manera que nos enorgullece, la Academia está hoy reconociendo el establecimiento y la consolidación en nuestro país de un nuevo campo del saber, el que estudia la economía y la sociología de la ciencia y reflexiona acerca de las políticas de ciencia, tecnología e innovación y sus impactos en la sociedad.

Permítanme decir inicialmente algunas palabras sobre mis admirados compañeros, Fernando y Hernán. No hablaré de sus currículos sino de su contribución a la consolidación de

esta comunidad académica, hoy próspera y poblada por un buen número de mentes jóvenes, la de los estudios sociales de la ciencia y la innovación. También pienso referirme a las preguntas centrales que nos hemos hecho en nuestra vida como investigadores y a los principios que nos animan. No será fácil resumir vidas tan plenas como las que ellos han tenido, especialmente porque hemos compartido mucho y hemos remado por los mismos ríos.

Fernando Chaparro fue alumno de Robert K. Merton, uno de los primeros y, a mi modo de ver, el más grande sociólogo del conocimiento. Merton fue el inspirador de Garfield, el creador del ISI, y fue también quien definió cuatro principios del ethos del científico, hoy un poco olvidados pero más necesarios que nunca: el comunalismo, por el cual se acepta que el gran reservorio del conocimiento científico es de todos; el universalismo, que proclama la validez de la ciencia más allá del estatus sociopolítico o la nacionalidad de sus participantes; el desprendimiento, que pone ese objetivo común de toda la humanidad que es la ciencia por encima de cualquier interés; y el escepticismo organizado, que somete a escrutinio crítico cualquier planteamiento, antes de aceptarlo, venga de donde venga.

Fernando Chaparro ha sido testigo, desde sus inicios, de la historia de las políticas de ciencia y tecnología de América Latina; su vida se ha entrelazado con estas políticas. A través de otro de sus maestros de Princeton, el uruguayo Máximo Halty, accedió al grupo que inicialmente lideraron Jorge Sábato, cuyo triángulo (Estado, academia, sectores productivos) todos conocemos, pero cuyo papel en la gestación de las políticas de ciencia y tecnología de América Latina es a veces ignorado; Amilcar Herrera, y el propio Máximo Halty. Al lado de Francisco Sagasti y de Jorge Katz, Fernando se alimentó de la grandeza de quienes por primera vez formularon y desarrollaron la idea de que América Latina tenía especificidades que ameritaban políticas específicas, y se integró a ese grupo de líderes pensadores. De la mano de la OEA y de esos ilustres maestros, Fernando promovió las primeras redes latinoamericanas de investigadores en varios campos: física, ciencias del mar, energía atómica. Fruto de esa ola que recorrió América Latina fue la monumental obra en varios volúmenes y en dos idiomas, promovida por Alberto Ospina, “Visión Latinoamericana sobre Ciencia y Tecnología en el Desarrollo” de abril de 1972, que reunió a un amplísimo abanico de pensadores de nuestro continente sobre el tema. Con base en esas reflexiones colectivas, Fernando contribuyó de manera crítica a la consolidación y fundamentación de la escuela de Colciencias, esa que siempre ha dejado huella imborrable en todos quienes hemos pasado por allí.

Un interrogante fundamental ha permanecido en la mente del Fernando Chaparro investigador a lo largo de su vida. Desde su tesis doctoral, Fernando viene preguntándose ¿cómo se forman las comunidades científicas? Y su interés se centra no tanto en las instituciones y organizaciones de

la ciencia como en las redes sociales que son el fundamento de la dinámica de la ciencia y de sus comunidades. Tierra y mar han sido los principales campos en donde Fernando ha investigado, ha experimentado y ha actuado en la formación de estas comunidades. Corolario de esta reflexión es la desconfianza que los tres compartimos con respecto a las ubicaciones institucionales del organismo de ciencia y tecnología. La ubicación institucional cuenta, pero no es lo determinante.

De estas reflexiones e investigaciones de Fernando se derivan tres ideas fuerza que han guiado su accionar como líder de procesos de investigación desde distintas posiciones: en primer lugar, la importancia de desarrollar una capacidad de análisis estratégico y prospectivo; en segundo lugar, el investigador y los grupos de investigación, más que las organizaciones, están en el centro de la dinámica de la ciencia y de la innovación; y en tercer lugar, si bien en el nivel macro la ciencia es la base de los procesos de innovación, en el nivel de la empresa o de la comunidad se da una interacción de doble vía muy fuerte entre el conocimiento científico y el conocimiento empírico tradicional para generar tanto la innovación de base tecnológica como la innovación social, una enseñanza de alguien a quien ambos reconocemos como nuestro maestro, Orlando Fals Borda.

Hablar de Hernán Jaramillo Salazar es aún más difícil, por la amistad que nos une desde hace décadas. Nos divierte recordar cuando, muy jóvenes, armábamos en su casa los domingos en la mañana mi columna de *El Espectador* de los lunes, *El país de las maravillas*; o las noches en blanco jugando series de 21 partidas de ajedrez.

No conozco a nadie que quiera tanto a la Universidad de Antioquia como Hernán. Y lo reconoce: la Universidad de Antioquia le dio la capacidad de pensar, de argumentar y de relacionar. Y es que esa ha sido su vida: mirar el mundo desde un ángulo distinto.

Aunque en algún momento Hernán fue un brillante estudiante de mi curso de Teoría Económica en la recién creada maestría en Economía de la Universidad Nacional, Hernán hizo su maestría y su doctorado por cuenta propia. Es también el único colombiano que ha recibido una Mención de Honor como *mejor docente universitario de Economía* en el concurso del diario Portafolio, sin haber dictado una sola clase, excepto cuando era estudiante de pregrado y sin graduarse lo nombraron profesor asistente de la Universidad de Antioquia. ¿Cómo explicar esa mención de honor? Lo cierto es que no le faltan méritos para ser considerado el mejor formador de jóvenes, porque eso es lo que siempre ha sido como investigador: un formador de vocaciones científicas; un potenciador del ánimo investigador de sus discípulos, que han sido muchos; y un inspirador del entusiasmo de hacer ciencia entre sus colegas profesores. Hernán demuestra con su vida que para ser un verdadero maestro no se necesita dictar clase. Su papel en la promoción

del programa de Jóvenes Investigadores, acompañando a la gran maestra Ángela Restrepo, fue definitivo. Cuando se retiró de la decanatura del Rosario y se le nombró profesor honorario (otra vez sin dictar clases) los profesores de la Facultad de Economía le agradecieron por “orientarnos en un viaje en que el futuro ingresa todos los días a un salón de clase y por identificar y potenciar las capacidades individuales y consolidar un equipo y un proyecto de vida”. Durante 16 años había aprendido a hacer y a promover la investigación de la mano de Fernando Chaparro en el CIID. Una obra suya, en coautoría con Hernando Gómez Buendía, *37 modos de hacer ciencia*, es considerada un verdadero tratado de antropología y economía de la ciencia en un país en desarrollo.

Tengo el privilegio de poder decir que hemos hecho algunas cosas juntos. Participamos con José Luis Villaveces y otras personas, en el proyecto de *Ciencia y Tecnología para una Sociedad Abierta*, una respuesta intelectual al cambio de modelo de crecimiento económico, como él lo interpreta. Escribimos un artículo que se publicó en árabe, en ruso y en tres idiomas más. Incursionamos en algunas reflexiones teóricas sobre el capital conocimiento, que le dejaron insatisfecho y luego lo llevaron a sus trabajos más importantes, en donde la medición de la actividad científica fue fundamental.

Con Hernán compartimos las amistades de dos grandes de la ciencia en Colombia, dos renacentistas que nunca encontraron fronteras entre la ciencia, las artes, la cultura y la sociedad: José Luis Villaveces Cardoso y Manuel Ramírez Gómez. Cuánta falta nos hacen esas dos brillantes figuras.

Hernán Jaramillo es un crítico certero de las políticas de ciencia y tecnología de nuestros gobiernos. Alguna vez se preguntó si era necesario un nuevo contrato social entre ciencia e innovación, como lo plantea Gibbons, y concluyó que la dificultad de este país es que siempre le toca construir lo nuevo, sin haber construido lo viejo. Hernán también acierta cuando dice que la ciencia es una apuesta improbable, pero es una apuesta a la que vale la pena entregarle la vida.

Para mí es un honor compartir con ellos. Si miro en retrospectiva mis investigaciones, me doy cuenta de que a todas las anima una única inquietud: lo público y la contradicción entre los intereses particulares y los intereses generales. En el curso de *Historia, Tecnología y Sociedad*, que dictaba Paul David en mi época de estudiante, me propuso analizar las razones por las cuales los ejidos ingleses, esas tierras que los aldeanos compartían para el pastoreo, pasaron a ser lotes privados y cercados. Al construir un modelo que explicaba esta primitiva privatización, entendí para qué servía y cómo funcionaba la economía. Mi disertación y desde allí temas tan diversos como el acceso a la ciencia de los países en desarrollo, la propiedad intelectual, la cooperación de los productores en zonas de violencia, las redes de innovación de las organizaciones, las

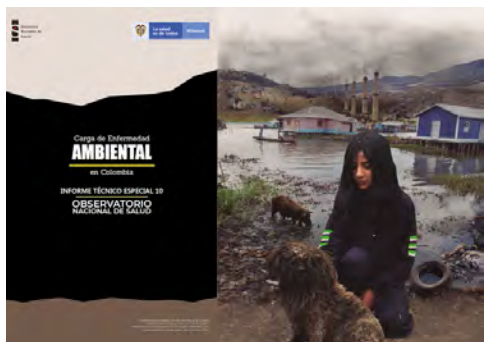


redes internacionales de científicos y los comportamientos de cooperación han sido enfocados desde la dualidad de lo público y lo privado. Una preocupación central que ha motivado una parte importante de mis investigaciones, y ha inspirado mis cursos de Gestión de lo Público, se origina en los crecientes “anticomunes” del conocimiento, es decir, la apropiación privada excesiva del conocimiento que, en vez de estimular la investigación y la innovación, las entorpece. Esto tal vez les explica por qué me extendí en presentar los principios de Merton: comunalidad, universalidad, desprendimiento y escepticismo organizado. La defensa de estos principios, estoy convencido, es indispensable para mantener y hacer crecer el gran espacio público de la ciencia. Otra preocupación que cada día se hace más apremiante proviene de observar que el conocimiento está en manos de unos pocos en el mundo y especialmente en nuestro país. La utopía que acariciamos en algún momento los autores de *Ciencia y Tecnología para una Sociedad Abierta* era que cualquier colombiano, estuviera donde estuviera y sin distingo de estrato, accediera al conocimiento hasta donde lo deseara.

Con Hernán y con Fernando hemos dado muchas batallas juntos, en las que muchos de los presentes nos han acompañado. Nos hemos enfrentado a los dragones que asolan los espacios de la ciencia de Colombia desde los escritorios donde se dictan las políticas económicas de nuestro país. Algunas veces hemos podido neutralizar estos dragones, pero surgen de nuevo de sus propias cenizas.

Ganamos la batalla por los doctorados nacionales. Nos hemos enfrentado a la idea de que este país no necesita hacer ciencia; que podemos comprar cualquier tecnología que se requiera; que el conocimiento tecnológico se encuentra disponible libremente para el que quiera usarlo y que, por lo tanto, la actividad científica y de investigación local es inútil. Hemos confrontado la ideología según la cual el desarrollo del país puede apoyarse exclusivamente en la copia de lo que otros hacen; y luchado contra el convencimiento de que el Estado no tiene por qué gastar en ciencia e innovación, pues el mercado nos llevará a niveles óptimos de investigación y desarrollo; hemos combatido la visión de que las políticas de competitividad pueden orientar la investigación en todos los sectores, incluidos el de la salud y el del medio ambiente, y también la investigación básica; también hemos interpelado a quienes creen que la mejor política de ciencia y tecnología es no tener política de ciencia y tecnología, y a quienes sostienen que la ciencia sólo se justifica si produce réditos en el corto plazo.

Muchas gracias, señores académicos, señor presidente de la Academia y todos los que han compartido su sabiduría con nosotros a través de los años, por esta distinción que nos llena de alegría y nos compromete. También queremos expresar nuestro especial agradecimiento a Beatriz Elena, Adriana e Ingrid; y a Juliana, Alejandra, Natalia, Mónica, Manu, Maruía y Simón, quienes han entendido, aprecian y valoran nuestro compromiso con el conocimiento y con nuestro país.



### Carga de enfermedad ambiental en Colombia

Informe técnico especial 10  
Observatorio Nacional de Salud  
Instituto Nacional de Salud

<http://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10%20Carga%20de%20enfermedad%20ambiental%20en%20Colombia.pdf>

Señores

Comité Editorial

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

Estimados editores:

He leído con atención el informe sobre la “Carga de enfermedad ambiental en Colombia” recientemente difundido por el Observatorio Nacional de Salud (ONS) del Instituto Nacional de Salud, el cual me ha suscitado los siguientes comentarios. El documento se inicia resaltando como ejemplos de deterioro de un ecosistema los casos de la Ciénaga Grande de Santa Marta y el del río Atrato, declarado como sujeto de derechos por la Corte Constitucional. En este contexto se menciona la complejidad que entraña establecer “con claridad las relaciones causa-efecto entre las condiciones ambientales y desenlaces en salud”, reconociendo que no es la única forma de “abordar la relación ambiente y salud” y proponiendo la utilización de un método innovador para la estimación de la carga de enfermedad asociada con factores de riesgo ambiental.

El informe es reiterativo en reconocer “la complejidad de la relación entre ambiente y salud o salud ambiental” y cita lagunas sentencias de la Corte Constitucional que mencionan “aspectos como el modelo de vida y desarrollo, el tejido social y las practicas ancestrales”, señalando que muchas veces no se menciona explícitamente la relación entre ambiente y salud, por lo que esta debe inferirse. En el documento se define la salud ambiental en términos de la “interdependencia entre cultura (humanos) y la naturaleza (ecosistemas), como generadora de riqueza, a través del sostén de todas las formas de vida” y se menciona la necesidad de “superar la mirada de riesgo o peligro”, y se insiste en la definición de ecosistemas y servicios eco-sistémicos como “soporte de vida de todas las especies del planeta, y por tanto, el goce de la salud”.

En este sentido, en el documento se hace un recorrido por otros enfoques, como el de promoción de la salud, el histórico y social y el del “movimiento de justicia ambiental” y de equidad de género. Se acoge el concepto de “sustentabilidad”, pero no se hace diferencia con el de “sostenibilidad”, cuando son dos conceptos diferentes, ya que el primero es más histórico y social en tanto que el segundo responde al modelo de riesgo. Asimismo, se alude al concepto de “buen vivir”, aunque restringido, ya que se lo conceptualiza como la “calidad de vida de las personas y el respeto por la naturaleza, lo cual implica una nueva forma de concebir la relación con la naturaleza, que asegure el bienestar de las personas y la supervivencia de las especies...”. El concepto de buen vivir se aparta de los discursos que celebran el crecimiento económico o el consumo material como indicadores de bienestar y alaban la obsesión con la rentabilidad o el consumo. Sus apelaciones a la calidad de vida discurren por otros caminos y, además, incluyen tanto a las personas como a la naturaleza. De esta manera, “se abren las puertas a otras formas de hablar, escribir o pensar nuestro mundo”.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Eduardo Gudynas, Buen vivir: Germinando alternativas al desarrollo, <http://www.gudynas.com/publicaciones/articulos/GudynasBuenVivirGerminandoALA111.pdf>

Además, en el informe se hace un resumen de los enfoques y los métodos para abordar la salud ambiental: el enfoque de riesgo, el de los factores sociales determinantes de la salud que postula la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el de la determinación social o aproximación histórica-social. También se menciona el “modelo de las fuerzas motrices”, el cual no es en realidad un enfoque sino una metodología que bascula entre el enfoque de riesgo y el modelo de factores determinantes de la OMS. En el informe del ONS se establecen unos campos de acción y, a pesar del recorrido que se hace por los diferentes enfoques y modelos de la relación entre ambiente y salud, se acoge de nuevo el enfoque de riesgo a partir de las amenazas a la salud que pueden venir de los “riesgos tradicionales”, relacionados con la pobreza y la falta de desarrollo, y de unos “riesgos modernos” dados por un “desarrollo rápido, un insostenible consumo de recursos naturales y una carente vigilancia de la salud y el medio ambiente”, aspectos que corresponden a los campos de acción definidos en el Plan Decenal de Salud Pública, 2012-2021: agua y saneamiento; aire; zoonosis; vectores; residuos peligrosos y sustancias químicas; entornos saludables, y aspectos ambientales globales, como la nanotecnología y el cambio climático.

Para el informe se hizo una revisión de la literatura sobre las consecuencias en salud asociadas con los factores de riesgo ambiental en Colombia y los hallados según los criterios del estudio de Carga Global de la Enfermedad, entre ellos, el agua potable, el saneamiento, el lavado de manos, el material en partículas, la contaminación del aire en el domicilio, el ozono ambiental, el radón y el plomo. Como ya se mencionó, se hace una descripción del caso de la Ciénaga Grande de Santa Marta con una descripción cualitativa de la problemática sin un ordenador específico que siga el modelo de determinantes estructurales e intermedios o las seis categorías de la metodología de las fuerzas motrices. Tampoco se mencionan cifras de morbilidad y mortalidad o de la calidad de vida en los municipios y territorios afectados. En cuanto a la respuesta institucional, se menciona que la “orientación de las acciones por parte del Estado ha estado restringida al accionar de las autoridades ambientales y esto da cuenta de la falta de planeación e integración, así como de la necesidad de acciones intersectoriales”, pero no se hace referencia a las acciones de los gobiernos nacional, departamentales ni municipales afectados.

En el informe se hace una revisión sobre el impacto del cambio climático en la salud y su efecto en la comunidad afrocolombiana en el área del Consejo Comunitario Bajo Mira y Frontera del municipio de Tumaco en el departamento de Nariño. En cuanto a la situación de la Ciénaga, en su análisis no se utiliza un ordenador conceptual explícito y este es muy restringido en la referencia a las categorías, por ejemplo, no se recurre a la metodología de fuerzas motrices ni se presentan indicadores para cada una de ellas.

El análisis de “carga de enfermedad ambiental” se hace desde el enfoque de riesgo en las categorías del aire, el agua y otros (radón, plomo en sangre y plomo en hueso). Se usa la metodología del Estudio de Carga Global de Enfermedad ya mencionado, en la cual se establecen los factores de riesgo ambiental y las situaciones de salud. Se analizaron los siguientes resultados en salud: enfermedad diarreica aguda, infecciones respiratorias agudas bajas, enfermedad isquémica del corazón, evento cerebrovascular, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), cáncer de pulmón, enfermedad renal crónica, discapacidad intelectual idiopática y cataratas.

Los factores de riesgo establecidos se cruzaron con los posibles resultados en salud, por ejemplo, la enfermedad diarreica aguda, la enfermedad cardiovascular y la EPOC con la calidad del aire.

Según el informe, en el 2016 se presentaron 17.549 muertes atribuibles a alguno de los factores de riesgo ambiental, que representan un 8 % del total de las muertes en ese año. Si se redujera al mínimo la exposición a estos factores de riesgo, se

evitaría el 18,1 % de las muertes o el 19,0 % de la carga de enfermedad en años de vida saludable perdidos, cuyas tasas más altas se registraron en los departamentos de Quindío, Risaralda, Meta, Atlántico, Norte de Santander y Chocó.

Según los factores de riesgo, la pérdida de años de vida saludable fue mayor por la mala calidad del aire, seguida por la del agua y la de otros factores estudiados. En el caso de la calidad del aire y su relación con la enfermedad isquémica del corazón, la fracción atribuible a las partículas en suspensión de menos de 2,5 micras (PM 2,5) en la carga total de esta enfermedad fue de 15,8 % a nivel nacional y con la EPOC, fue de 17,5 %. En cuanto a la infección respiratoria aguda y la pérdida de años de vida saludables, la fracción atribuible fue de 13,7 % y la de la enfermedad cerebrovascular fue de 12,5 %. En cuanto al cáncer de pulmón, esta fue de 2,6 %.

En el caso del agua y su relación con la enfermedad diarreica, la fracción de mortalidad atribuible fue de 51,1 %. En cuanto a los otros factores, llama la atención que el 11,3 % de las muertes por cáncer de pulmón se atribuyeron al radón.

También se hizo un análisis de la respuesta institucional del Estado y se concluyó que prevalece una “persistente institucionalidad sectorial”, es decir, se sigue mirando el ambiente desde cada sector sin un ejercicio de gobernanza que supere la visión sectorial y comprometa la participación comunitaria, social y ciudadana. No se menciona en este contexto a la academia.

Cabe recordar que la política integral de salud ambiental (PISA) fue un lineamiento del CONPES 3550 del 2008 que hasta el momento sigue en la etapa de “formulación”, lo cual se ha reflejado en la ausencia de una postura concreta por parte del Estado frente a temas como la prohibición del asbesto y la reanudación de la fumigación con glifosato. En el documento no presenta una mirada crítica sobre cómo va la implementación de espacios como el Consejo Nacional de Salud Ambiental, el cual se sigue planteando en un nivel técnico y no estratégico en el gobierno nacional y en sus equivalentes departamentales y municipales.

El informe es el resultado de un ejercicio muy importante, centrado en el enfoque de riesgo, pero con limitaciones, como en el caso de la enfermedad cardiovascular, con respecto a la cual, y desde una perspectiva más amplia, podrían contemplarse, además el riesgo proximal por la calidad de aire, la dieta, la actividad física, el consumo de cigarrillo y de alcohol, entre otros. Por ejemplo, la fracción prevenible por uso de cigarrillo en el cáncer de pulmón es casi del 60 %, sin embargo, en este estudio se atribuye más el radón y no se menciona el combustible fósil fuente de benzopirenos. La metodología de riesgo puede resultar en subestimaciones de la carga de enfermedad debida al ambiente si se utiliza una visión centrada en factores de riesgo proximales y no en factores determinantes estructurales (contextos) e intermedios (modos de Vida). En este sentido, una buena aproximación al problema sería desde la metodología de fuerzas motrices.

Las recomendaciones del informe podrían haber sido más contundentes: por ejemplo, se establece como principal factor de riesgo el aire, pero en las tres recomendaciones dadas no se menciona la necesidad de disminuir las fuentes de emisión de material en partículas, la posibilidad de eliminar el uso de combustibles fósiles en un futuro y el cumplimiento de los planes territoriales de descontaminación del aire.

**Luis Jorge Hernández F MD PhD**

Profesor asociado Facultad de Medicina  
Universidad de los Andes  
luishern@uniandes.edu.co

Señores

Comité Editorial

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

**Respuesta a Comentarios al Estudio de Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia del Observatorio Nacional de Salud**

Estimada editora:

Hemos revisado con atención la carta al editor enviada por el Dr. Luis Jorge Hernández y publicada en el presente número de la Revista de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en referencia al Informe de Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia (Observatorio Nacional de Salud - Instituto Nacional de Salud, 2018), del cual somos autores; por lo que queremos aportar algunos elementos a la discusión en aras de generar recomendaciones de política pública de mayor impacto que atiendan el importante problema de salud pública que significa la compleja relación ambiente y salud.

La lectura juiciosa que hace el Dr. Hernández reconoce el intento que hicimos de mostrar un panorama amplio sobre la relación salud y ambiente y las implicaciones para su estudio. En esta medida acudimos a hechos relativamente recientes, como la sentencia T-622 de 2016 de la Corte Constitucional, que declara el río Atrato como sujeto de derechos, para ejemplificar la complejidad de la relación salud y ambiente, partiendo de reconocer que nuestros lectores no necesariamente son expertos en la materia.

En esa medida en el segundo capítulo del informe, se pretendió hacer un balance sintético sobre la noción de salud ambiental, los campos específicos de acción, la forma de aproximarse al conocimiento de la relación y, finalmente, se expuso algunos de los retos actuales que implica el estudio de dicha relación en el contexto del país. Esto a partir de un diálogo con diversos autores y textos de importancia. En tal medida, no se pretendió cubrir la totalidad de los elementos que pueden hacer parte de esta temática, por lo que algunos temas, como el de la sustentabilidad, o el buen vivir a los que el autor hace referencia, no se abordan de la manera extensa, pues no eran el objeto central de la argumentación.

Por otro lado, es posible que se haya incurrido en alguna imprecisión semántica, como en el caso de lo que llamamos enfoque o modelo de fuerzas motrices y que, el autor aclara, se trata en realidad de una metodología. Al respecto, esta misma imprecisión se encuentra en diferentes textos de otros autores donde de manera indistinta se hacen estas denominaciones, por lo que este error fue involuntario y agradecemos la aclaración. Sin embargo, la descripción hecha de la metodología está ajustado al planteamiento que hacen los autores de referencia.

Si bien es cierto, la estimación de la carga de enfermedad ambiental está centrada en factores de riesgo, no podemos olvidar que se requiere de información que permita establecer algunos indicadores que puedan usarse para hacer comparaciones y ser seguidos en el tiempo. Para estos propósitos los estudios de carga de enfermedad son una herramienta útil. Este tipo de abordajes permiten medir y comparar la salud de poblaciones o de grupos sociales afectados por problemáticas ambientales; analizar la evolución de los efectos sobre la salud de estos problemas; medir y comparar la importancia de diferentes factores de riesgo en un momento dado, permitiendo dar una indicación de los contaminantes y las rutas de exposición que producen la mayor carga sanitaria en la población estudiada. Por lo tanto, estos resultados se pueden utilizar para orientar intervenciones y evaluar el impacto de aquellas implementadas (Gibson, 2013; Schütz, Hacon, Silva, Moreno Sánchez, & Nagatani, 2008).

Los estudios de caso de la Ciénaga Grande de Santa Marta y el Consejo Comunitario de Bajo Mira y Frontera en Tumaco, que siguieron enfoques cualitativos, buscan profundizar en la comprensión de dichos impactos desde las voces de las comunidades. Estos plantean un concepto de salud asociado con el bienestar, desde una mirada de la relación salud y ambiente que involucran el análisis del contexto social, político, económico y cultural centrado en el territorio, y tratan de superar la mirada reduccionista del enfoque de riesgo.

En esta medida el estudio de caso de la Ciénaga Grande de Santa Marta, que se centra en un análisis desde los servicios ecosistémicos, pone de manifiesto importantes elementos relacionados con las afectaciones del deterioro ambiental de la ecorregión en la salud y la calidad de vida de los pobladores de la región, así como aspectos asociados con las causas del deterioro que están vinculadas al modelo de desarrollo económico y la respuesta social. De tal manera, consideramos que se muestra un análisis sintético y comprehensivo del fenómeno, a pesar de no acudir al modelo de fuerzas motrices sugerido por el autor. Consideramos que estudios de este tipo que acudan a enfoques, modelos o metodologías integradoras de la realidad siguen siendo necesarios y permitirían ampliar la discusión sobre las intervenciones que se requieren para mejorar la salud y calidad de vida de estas poblaciones, por lo que es preciso seguir impulsándolos.

La respuesta institucional se analizó desde el análisis normativo, en el marco de la Política Integral en Salud Ambiental (PISA), incluyendo la sistematización de la experiencia intersectorial en el Consejo Territorial de Salud Ambiental (COTSA) de Cali. En esa media se ponen en contexto las directrices de políticas nacionales en la materia y se analiza una experiencia local que integra tanto políticas nacionales como locales. El análisis de espacios como el Consejo Nacional de Salud Ambiental, que menciona el autor, no se planteó desde el inicio como objeto de análisis, dado que se optó por el análisis de una experiencia local. No dudamos que más estudios son necesarios al respecto, para hacer seguimiento a la respuesta del propio Estado y sus instituciones, en busca de un mayor bienestar de la población.

Las recomendaciones de política pública se orientan al control de los factores de riesgo y la articulación de espacios de acción intersectorial tanto del nivel nacional como locales. Siendo precisamente este último escenario donde ha sido más limitada la implementación de los instrumentos normativos diseñados en el país. Las recomendaciones generadas se identificaron de la literatura y experiencias internacionales y, en su mayoría, implican profundas reflexiones y discusiones de cambios estructurales y normativos. Todas ellas tienen en cuenta los resultados obtenidos de los propios análisis y las particularidades de nuestro país. Animamos a los lectores a revisar el informe a profundidad y reflexionar sobre la posibilidad de aplicación de los cambios necesarios para que sea el ambiente una fuente de bienestar de las próximas generaciones.

**Karol Patricia Cotes-Cantillo**

Investigadora, Observatorio Nacional de Salud, Instituto Nacional de Salud  
[kcotes@ins.gov.co](mailto:kcotes@ins.gov.co)

**Carlos Castañeda-Orjuela**

Director Observatorio Nacional de Salud, Instituto Nacional de Salud  
[ccastanedao@ins.gov.co](mailto:ccastanedao@ins.gov.co)

## Referencias

- Gibson, J. M.** (2013). *Environmental Burden of Disease Assessment*. *Environmental Burden of Disease Assessment*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Observatorio Nacional de Salud - Instituto Nacional de Salud.** (2018). *Informe de Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia* (Décimo In). Bogotá D. C.: Instituto Nacional de Salud. Retrieved from [http://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10 Carga de enfermedad ambiental en Colombia.pdf](http://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10%20Carga%20de%20enfermedad%20ambiental%20en%20Colombia.pdf)
- Schütz, G., Hacon, S., Silva, H., Moreno Sánchez, A. R., & Nagatani, K.** (2008). Principales marcos conceptuales aplicados para la evaluación de la salud ambiental mediante indicadores en América Latina y el Caribe. *Revista Panamericana de Salud Pública*. <https://doi.org/10.1590/s1020-49892008001000008>





Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis.  
Nat. Vol 42(165), 2018

**Mesa, O. J.** (2018). Cuatro modelos de redes de drenaje. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **42** (165): 379-391. Octubre-diciembre de 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.641>

En la página 387, segunda columna dice:

$$E[A_{\omega}^h] = R_A^{\omega-k} E[A_k^h].$$

Debe decir:

$$E[A_{\omega}^h] = R_A^{(\omega-k)h} E[A_k^h].$$



## Enfoque y alcance

---

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias biomédicas, ciencias del comportamiento (filosofía, psicología, antropología, sociología), ciencias físicas, ciencias naturales (biología, microbiología, botánica, zoología, ecología) ciencias químicas, ciencias de la tierra (geología, medio ambiente) y matemáticas.

Está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (*International Center for Scientific Research*), *Current Mathematical Publications*, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, *Zentralblatt für Mathematik*, *Zoological Record*. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 41 volúmenes.

## Proceso de evaluación por pares

---

Se recibirán solo los manuscritos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los manuscritos serán evaluados en primera instancia por el editor y los editores asociados de la disciplina correspondiente.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, quienes evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración aproximada de 90 días.

Los pares académicos pueden adoptar alguna de las siguientes tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a un tercer evaluador.

En cualquiera de los casos, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo dentro de las cuatro semanas siguientes. Además, deberá enviar un documento en el que responderá, una a una, todas las observaciones señaladas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, se entenderá que los

autores han retirado el manuscrito en su forma actual y, si se remitiera de nuevo, el Comité Editorial de la Revista lo considerará como un nuevo trabajo.

Los trabajos que sean aceptados se considerarán como propiedad de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales** y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

## Ética de la publicación

---

La **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACCEFYN)**, acoge la normatividad internacional definida por el *Committee on Publication Ethics* (COPE). Algunas normas se pueden consultar en:

COPE guidelines on good publication practice:  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct:  
<https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

Ver documento pdf (anexo)

## Política de acceso abierto

---

La página web de la Revista ([www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co)) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, el acceso y la difusión de la producción científica.

## Directrices para autores

---

### Tipología de los artículos publicados en la Revista

**Artículos originales o artículos de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene los siguientes apartes importantes: introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

**Artículos cortos:** documentos breves que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica y, que, por lo general, requieren de una pronta difusión.

**Artículos de posesión o artículos de revisión de tema:** documentos resultantes de una investigación donde se analizan crítica y sistemáticamente, a la par que se integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, centradas en un campo de la ciencia o la tecnología, con el fin de dar cuenta de sus avances y sus tendencias de

desarrollo. Presentar un artículo de revisión constituye un requisito para que un Académico pueda posesionarse como miembro correspondiente o de número.

**Cartas al editor:** posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

**Comentarios bibliográficos:** son escritos críticos breves sobre libros recientes publicados en las disciplinas de interés de la Revista.

#### Corrección de los autores

#### Fe de erratas

#### Indicaciones a los autores

---

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales y de alto nivel, escritos en inglés o español, y que traten sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedarán como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo la internet. (Ver transferencia derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia aceptará mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original, que no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado para aparecer en otra publicación impresa o electrónica y que, además, ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista. Igualmente, que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad. (Ver formatos declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.racefyn.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.racefyn.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 arábica 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.
- 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 (Key words).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y a las 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 JPEG o PNG.

## 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



## 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, Online Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Within the Colombian citation system, the journal is register in Publindex (The Journal index Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias).

The journal's website ([www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co)) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

## Peer Review Process

---

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

## Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

---

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct:

<https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

See document pdf (annex)

## Open access policy

---

The journal enables open access to published articles via its website ([www.raccefyn.co](http://www.raccefyn.co)) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

## Author Guidelines

---

**Research articles.** A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

**Brief articles.** Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

**Inaugural articles or Review articles.** Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

**Letters to the editor.** Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

**Book reviews.** Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

## Authors correction

## Errata

## Information for Authors

---

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English in an area related to the **Exact, Physical or Natural Sciences**. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
  2. The corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
  3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see <http://www.icmje.org/> for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
  4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.
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 tiff format.

## 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.

## 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*. Worldwide 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 tiff format.

### 3. Structure of the article

The following sections are to be included:

1. An abstract should be included in both Spanish and English.
2. Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
3. Introduction.
4. Materials and methods.
5. Results and Discussion for short communications.
6. Discussion.
7. Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
8. Declaration of conflict of interest.

### 4. Additional information: Figures

- Each figure is included in a separate page in jpg or tiff format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o PNG 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.

