



ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

80  
Años  
1936 - 2016

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

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 41 • Número 159 • Págs. 149-268 • Abril - Junio de 2017 • Bogotá - Colombia





ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

80  
Años  
1936 - 2016

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

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 41 • Número 159 • Págs. 149-268 • Abril - Junio de 2017 • 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

#### 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

Hernando Ariza Calderón, Doctor  
Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

Edgar González, Ph. D.  
Pontificia Universidad Javeriana,  
Bogotá, Colombia

Guillermo González, Ph. D.  
Universidad Industrial de Santander,  
Bucaramanga, Colombia

### **Ciencias Naturales**

José Luis Fernández Alonso, Doctor  
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de  
Investigaciones Científicas, Madrid, España

Jaime Cantera, Doctorat d'Etat  
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Gabriel Roldán, Dr. rer. nat.  
Universidad Católica de Oriente,  
Rionegro, Antioquia, Colombia

Carlos Daniel Cadena Ordoñez, Ph. D.  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Patricia Chacón de Ulloa, Ph. D.  
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Sandra Baena Garzón, Ph. D.  
Pontificia Universidad Javeriana,  
Bogotá, Colombia

Néstor Hernando Campos Campos, Dr. rer. nat.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Caribe, Colombia

Martha Patricia Ramírez Pinilla, Ph. D.  
Universidad Industrial de Santander,  
Bucaramanga, Colombia

Fabio Castaño-Zapata, Ph. D.  
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

### **Ciencias Químicas**

Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

Moisés Wasserman Lerner, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

Myriam Sánchez de Gómez, M.Sc.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

Fernando Martínez, Docteur en Chimie  
Universidad Industrial de Santander,  
Bucaramanga, Colombia

Betty Lucy López Osorio, Ph. D.  
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ligia Sierra, Ph. D.  
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Luz Marina Jaramillo, Ph. D.  
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Edgar Páez, Ph. D.  
Universidad Industrial de Santander,  
Bucaramanga, Colombia

Luis Fernando Echeverry, Ph. D.  
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

### **Ciencias de la tierra**

Germán Poveda Jaramillo, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Medellín, Colombia

Carlos Alberto Vargas, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.  
Smithsonian Tropical Research Institute,  
Panamá

José Daniel Pabón, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Bogotá, Colombia

### **Matemáticas**

Jorge Ivan Cossio Betancur, Ph. D.  
Universidad Nacional de Colombia,  
Medellín, Colombia

Luis Español González, Doctor  
Universidad de la Rioja, España

Jaime Ignacio Lesmes Camacho, Dr. phil. nat.  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Luis Carlos Arboleda, Doctor  
Universidad del Valle, Cali, Colombia

José R. Quintero, Ph. D.  
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Alf Onshuus, Ph. D.  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

---

## **Comité científico internacional**

Ángela María Guzmán, Ph. D.  
University of Central Florida,  
Orlando, Estados Unidos

Antoine M. Cleef, Ph. D.  
University of Amsterdam,  
The Netherlands

Rodolfo Castillo, Ph. D.  
Fort Lauderdale, Florida, USA

Carlos Jiménez, Ph. D.  
Universidad de La Coruña, España

Gioconda San Blas, Ph. D.  
Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas  
y Naturales, Caracas, Venezuela

Alfonso Castro, Ph. D.  
Harvey Mudd College, Claremont, CA,  
USA

José Rubens Pirani, Ph. D.  
Universidade de São Paulo, Brasil

Wolfgang Gieren, Ph. D.  
Universidad de Concepción, Chile

Pedro Joseph Natham, Ph. D.  
Centro de Investigación y de  
Estudios Avanzados, Instituto  
Politécnico Nacional, México

---

## 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

---

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

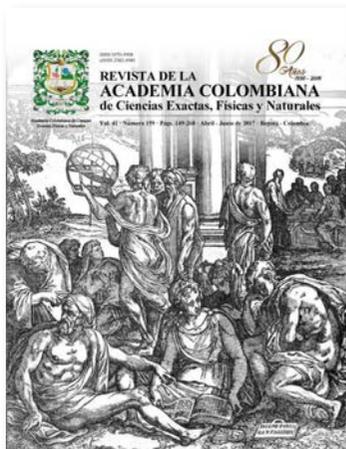
Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

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



### Portada

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

*Giardino di Pensieri*, El jardín del pensamiento. Fecha: 1540

Grabado en madera diseñado por Giuseppe Salviati (Giuseppe Porta, *Il Salviati*) (Castelnuovo di Garfagnana ca. 1520–Venecia, Italia ca. 1575)

Original de Marco Dente (Rávena, Italia 1490-Roma, Italia 1527)

Dimensiones: 23,9 x 19,3 cm

Colección del Museo Metropolitano de Arte, Nueva York, Estados Unidos (The MET)

Autorizada su reproducción el 19 de diciembre de 2016



ISSN 0370-3908  
eISSN 2382-4980

80  
Años  
1936 - 2016

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

Academia Colombiana de Ciencias  
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 41 • Número 159 • Págs. 149-268 • Abril - Junio de 2017 • Bogotá - Colombia

## Contenido - Contents

### Ciencias Físicas Physical Sciences

- Production and structural, electrical and magnetic characterization of a composite material based on powdered magnetite and high density polyethylene** **OA**  
Producción y caracterización estructural, eléctrica y magnética de un material compuesto a base de magnetita pulverizada y polietileno de alta densidad  
*Andrés Orlando Garzón, David A. Landínez, Jairo Roa-Rojas, Fabio. E. Fajardo-Tolosa, Gabriel Peña-Rodríguez, C.A. Parra-Vargas* ..... 154
- Properties of the HPHT diamond when used as a soft X-Ray detector** **OA**  
Propiedades del diamante HPHT cuando es usado como detector de rayos x de baja intensidad  
*Rodrigo Meléndrez-Amavizca, Mercedes Díaz-Lagos, Segundo Agustín Martínez-Ovalle* ..... 168
- La interdisciplinariedad en la ciencia del rayo** **AP**  
The interdisciplinarity of lightning  
*Horacio Torres-Sánchez* ..... 174

### Ciencias Naturales Natural Sciences

- Diferenciación temporal del perfil genético de la población de gatos de Cali, Colombia, en las últimas décadas** **AO**  
Temporal differentiation of the genetic profiles of the cat population in Cali, Colombia, during the last decades  
*Andrés F. Peña-Cruz, Angie Patiño-Montoya* ..... 187
- Aspectos bioecológicos de la ostra de agua dulce *Acostaea rivoli* (Mollusca, Etheriidae) en el río Opia, Tolima, Colombia** **AO**  
Bioecological aspects of the freshwater oyster *Acostaea rivoli* (Mollusca, Etheriidae) in the Opia river, Tolima, Colombia  
*Nohora Efigenia Gutiérrez-Hoyos, Edwin Orlando Lopez, Gladys Reinoso-Florez, Jesús Manuel Vásquez-Ramos, Francisco Villa-Navarro* ..... 192
- Biodiversidad íctica de los mares colombianos: riqueza amenazada** **AP**  
Fish biodiversity of Colombian seas: threaten richness  
*Arturo Acero P., Andrea Polanco F.* ..... 200

**Ciencias  
Naturales**

Natural Sciences

**Environmental Scanning Electron Microscopy of the Infection Process of *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* in Seedlings of Passionfruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*)** **AO**

Microscopía electrónica de barrido ambiental del proceso de infección de *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* en plántulas de maracuyá (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*)

*Jacobo Robledo-Buriticá, Carolina Ángel-García, Jairo Castaño-Zapata* ..... 213

**Ciencias  
Químicas**

Chemical Sciences

**Efecto del contenido de oxígeno y metano en la cinética de oxidación de un carbonizado de carbón** **AO**

Effect of oxygen and methane on the oxidation kinetics of coal char

*Jennifer Laverde- Múnera, Pedro Nel Alvarado-Torres, Wilson Ruiz- Machado* ..... 221

**Ciencias  
de la Tierra**

Earth Sciences

**Petrogénesis de venas de cuarzo y cianita en rocas metapelíticas de la formación Silgará, región central del macizo de Santander en los Andes colombianos** **AO**

Petrogenesis of quartz-kyanite veins in metapelitic rocks of the Silgará Formation, central Santander Massif (Colombian Andes)

*Carlos A. Ríos R., Luis Carlos Mantilla F., Oscar M. Castellanos A.* ..... 230

**Matemáticas**

Mathematics

**Caldas y el gran cometa de 1807** **C**

Caldas and the great comet of 1807

*J. Gregorio Portilla* ..... 244

**In Memoriam**

In Memoriam de un gran Maestro, Jorge Martínez Collantes ..... 253

Víctor Albis González ..... 255

**Enfoque y alcance**

Focus and Scope ..... 258

# Production and structural, electrical and magnetic characterization of a composite material based on powdered magnetite and high density polyethylene

Andrés Orlando Garzón<sup>1,\*</sup>, David A. Landínez<sup>1</sup>, Jairo Roa-Rojas<sup>1</sup>,  
Fabio. E. Fajardo-Tolosa<sup>2</sup>, Gabriel Peña-Rodríguez<sup>3</sup>, C.A. Parra-Vargas<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Grupo de Estudios de Materiales – GEMA, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

<sup>3</sup>Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica, Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia

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

## Abstract

This work describes the production and characterization of a composite material based on magnetite filled HDPE, which is commonly known for its magnetic properties. Composites of this kind are used in different applications such as microwave absorption, transducers and biomedical applications like drug delivery, organs tagging, etc. The samples were produced according to different volume ratios of magnetite and HDPE. The semiquantitative analysis conducted by XRD revealed the presence of hematite within the mineral magnetite used as a filler in the composites. The crystallinity degree was calculated through X-ray diffraction tests. The XRD results showed how there is an amorphous-crystalline transition due to the magnetite increasing content. The crystallinity percent ( $\chi_c$ ) for samples filled with 40% of magnetite volume was 90% while the ( $\chi_c$ ) for samples filled with 10% of magnetite volume was 80%. Which may be related to the increased magnetite particles into the plastic matrix for reinforcement contents up to 30% by volume, as evidenced in the images obtained through scanning electron microscopy (SEM). The samples were electrically characterized through volume resistivity measurements and electric polarization. The results showed that for ratios less than the 20% of magnetite there is no substantial reduction in the resistivity of the composite samples compared to the unfilled HDPE samples, but for magnetite ratios above 30% the composite samples showed a substantial reduction of six orders of magnitude in their volumetric resistivity. The electric polarization showed how the composite material undergoes a transition, going from an insulating material (for samples with 10% of magnetite volume) to a resistive material where the current and voltage are in phase (for samples with 30% and 40% of magnetite volume). The magnetization curves showed that the saturation magnetization (from 17,3 to 60,5 emu/g) and remanence (from 0,94 to 5 emu/g) increase in samples with high magnetite contents. The presence of the hematite phase in the samples could have affected the magnetization saturation and the remanence values in the hysteresis curves. Magnetization curves as a function of temperature showed the Verwey samples transition around the 120K and confirmed that the magnetization increases as the magnetite volume within the matrix increases. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** High density polyethylene; Magnetite; Plastic composites, Structural properties electric properties; Magnetic properties.

**Producción y caracterización estructural, eléctrica y magnética de un material compuesto a base de magnetita pulverizada y polietileno de alta densidad.**

## Resumen

Se describe la producción y caracterización de un material compuesto basado en matrices de polietileno de alta densidad (HDPE) reforzadas con magnetita pulverizada. Compuestos de este tipo son usados para diferentes aplicaciones como la fabricación de escudos de absorción electromagnética, transductores, entrega focalizada de medicamentos, marcación de órganos, etc. Las muestras fueron producidas de acuerdo a diferentes proporciones en volumen de magnetita y HDPE. Los análisis semicuantitativos llevados a cabo por medio de DRX dejan en evidencia la presencia de hematita al interior de la magnetita mineral usada como refuerzo del compuesto. El porcentaje de cristalinidad de los compuestos se calculó a través de difracción de rayos X. Los resultados de la difracción mostraron una transición amorfo-cristalino del compuesto, debida al creciente contenido de magnetita al interior de la matriz. El porcentaje de cristalinidad ( $\chi_c$ ) de las muestras reforzadas con un 40% en volumen de magnetita fue del 90% mientras que para las muestras reforzadas con el 10% en volumen la cristalinidad fue del 80%. Esto puede

\*Corresponding autor:

Andrés Orlando Garzón, [aogarzonp@unal.edu.co](mailto:aogarzonp@unal.edu.co); **Received:** October 14, 2016; **Accepted:** March 29, 2017

estar ligado a la mayor proliferación de partículas de magnetita al interior de la matriz plástica para contenidos de refuerzo superiores al 30% en volumen, tal y como se evidenció en las imágenes obtenidas a través de microscopía electrónica de barrido (SEM). Las muestras fueron eléctricamente caracterizadas a través de medidas de resistividad volumétrica y polarización eléctrica. Los resultados mostraron que para proporciones del refuerzo de magnetita iguales o inferiores al 20% no hay una reducción substancial en la resistividad de los compuestos comparada con la del polietileno sin reforzar. En cambio, para proporciones de magnetita iguales o superiores al 30% en volumen los compuestos muestran una reducción en la resistividad de hasta seis ordenes de magnitud. La polarización eléctrica deja en evidencia como el material compuesto presenta una transición al pasar de ser completamente aislante (10% en volumen de magnetita) a ser un material resistivo donde la corriente y el voltaje se encuentran en fase (muestras reforzadas con 30%-40% de volumen de magnetita). Las curvas de histéresis magnética en función del campo aplicado muestran un incremento constante en la magnetización de saturación (de 17,3 a 60,5 emu/g) y en la magnetización remanente (de 0.94 emu/g a 5 emu/g), al aumentarse el contenido de magnetita en las muestras. La presencia de hematita en las muestras pudo haber afectado los valores de la magnetización de saturación y de remanencia en las curvas de histéresis magnética. Las curvas de magnetización en función de la temperatura dejan en evidencia la transición de Verwey de la magnetita alrededor de los 120K, a la vez que confirman el aumento en la magnetización de las muestras conforme el contenido del refuerzo aumenta al interior de la matriz. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Polietileno de alta densidad; Magnetita; Materiales plásticos compuestos; Propiedades estructurales; Propiedades eléctricas; Propiedades magnéticas.

## Introduction

This paper aims to produce a composite material based on high density polyethylene (HDPE) with different proportions of powdered magnetite ( $Fe_3O_4$ ). Such composites have been subject of research because of its economy, its technological applications and also because they are environmentally friendly since some recycled plastic may be used for their production. Composites of this kind are used in different applications such as ferrite cores, electromagnetic shielding, transducers, and in some biomedical applications like drug delivery, organs tagging, etc. To produce this kind of composites fillers in different shapes are used: Particles, fibers or sheets in combination with matrices made of thermoplastic or thermoset polymers. The most common methods used to produce these plastic composites are the blending and cold blending methods. The last method is commonly known for its use with thermoset matrices like epoxy resins while the melt blending method is used with thermoplastic matrices such as the HDPE. In this work, a single screw extruder machine was used to produce the HDPE/magnetite composites following the melt blending method.

During the last decade, many studies have tried to improve the performance of plastic composites for specific applications, adding to the polymeric matrix different kinds of reinforcements like fibers and particulate materials such as silicates, hard and soft ferrites like the magnetite: abundant material, economical and easy to achieve due to the plenty number of mines found throughout Colombia, mainly those that are located in Huila and Cundinamarca. Additionally, the HDPE is one of the most used polymers in the world due to its low cost, ease of processing and good performance, in addition to being known as a reusable thermoplastic. By the addition of silicates, such as montmorillonite some researchers have successfully enhanced the mechanical properties of some polymeric matrices; these composites

can be used as building block for constructions (Rosales, *et al.*, 2006). In other works, the addition of some minerals, like the graphite or magnetite (in different proportions) into the polymeric matrix, have allowed researchers to study the percolative properties of the composite material, these kinds of studies can be useful for the design of technological gadgets: heat sinks or packages for electronic devices with electromagnetic shielding (Panwar, Sachdev & Mehra, 2007; Weidenfeller, Höfer & Schilling, 2002). Although the use of magnetite in thermoplastic and thermoset matrices is relatively new, these composites have been implemented in the biomedical industry: Stents that can be able to change their shape in the presence of magnetic fields (Razzaq, Anhalt, Frommann & Weidenfeller, 2007; Zheng, *et al.*, 2009). Some polymers like the polymethyl methacrylate filled with magnetite can also be used in pharmaceutical applications including targeted drug delivery, tissue reconstruction and tumor treatments (Hamoudeh, *et al.*, 2007; Harris, *et al.*, 2003), primarily because of the low cytotoxicity of the magnetite (Zhao, Saatchi & Häfeli, 2009; Zhang, Rana, Srivastava & Misra, 2008).

This work is an innovative example that raises the possibility of generating new products and contributions to the materials technology using economical and easily obtainable raw materials or in the case of magnetite to take advantage of an abundant and natural resource in Colombia.

After the samples production through the melt blending method, the crystallinity degree, resistivity, electrical polarization, and magnetization properties were studied. It was expected to achieve a composite with the mechanical properties (low weight and excellent machinability) of the polymers, along with the conductive and ferrimagnetic properties of the magnetite. This composite can be used for transducers, electromagnetic shielding or for the development of biomedical products, using economical and reusable raw materials.

### Experimental procedures

**Samples preparation.** With the magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), and HDPE density, the samples were prepared with different volume ratios of the precursors, as it is shown in table 1.

The samples were produced using a single screw extruder machine, with three heating zones and an extrusion rate of 42 rpm. After the extrusion, the samples were cutted using a diamond disk at low speeds. For each sample, two specimens were prepared. Experimentally it was found the extrusion temperatures and times of pure HDPE and the other samples, table 2. In each case the machine was preheated for 15 minutes. There was a slight increase in the M35 and M40 temperatures and extrusion times, due to the growth of the total material density that flew around the screw and it was associated with higher ratios of magnetite. Hence, through some experimental tests, it was found that as the extrusion temperature raised, the flow rate of the mix is increased.

**Measurements.** The composites crystallinity degree was studied using the X-ray diffraction (XRD) technique (X’Pert PRO MPD analytical) with CuKα1 radiation (1.540598Å) in the 2θ range 10-70°, in steps of 0.02°. The semiquantitative analysis of the phases presented in the samples was conducted through the use of X’Pert High Score software version 2.1.2 developed by PANalytical B.V. with the material database 2004 PDF 2.

The morphology of the samples was observed through SEM micrographs (FEI Quanta 200). The volume resistivity measurements were conducted using an Electrometer / High Resistance Meter (Keithley 6517A with the MODEL 8009 test fixture) a bias voltage of 25V was applied during 60 seconds to each sample. The electric polarization measurements were

**Table 1.** Samples identification and volume raw materials ratios.

Sample ID	%Vol Fe3O4	%Vol HDPE
100% HDPE	0	100
M10	10	90
M20	20	80
M30	30	70
M35	35	65
M40	40	60

**Table 2.** Extrusion temperatures and times for each sample.

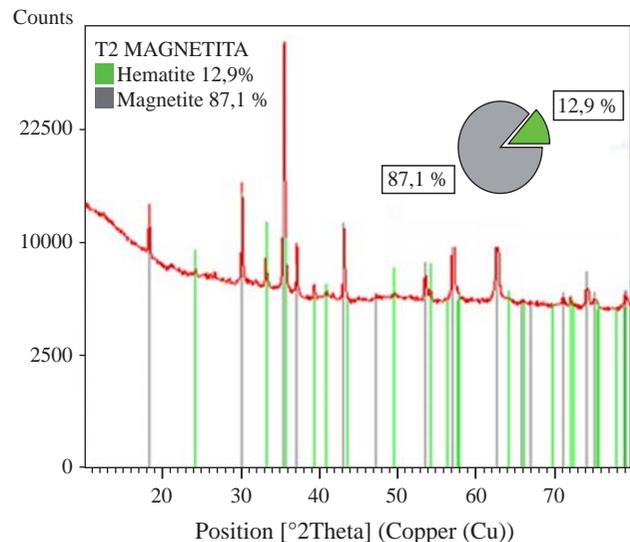
Sample ID	Extrusion temperatures (°C) (±1.5°C)			Extrusion times (min)
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	
100%HDPE	180	180	160	5-6
M10	270	270	260	7-8
M20	270	270	260	10
M30	270	270	260	11
M35	280	280	260	11-12
M40	280	280	260	11-12

carried out in a ferroelectric tester of Radiant Technologies (model N1P-HVA10-OP110) which uses the Vision Software version 3.1. These measurements were made with different voltage ranges because the relationship between the increasing ratio of magnetite in the samples and higher conductivity. As a result, the equipment integrity could be affected. The magnetic properties were measured using a vibrating sample magnetometer (VersaLab 3 Tesla, Cryogen-free PPMS of Quantum Design) the variable applied field was ±3 Tesla. Then, applying constant fields of 0.3 Tesla, magnetization and susceptibility measurements as a function of the temperature (50- 300K) were taken.

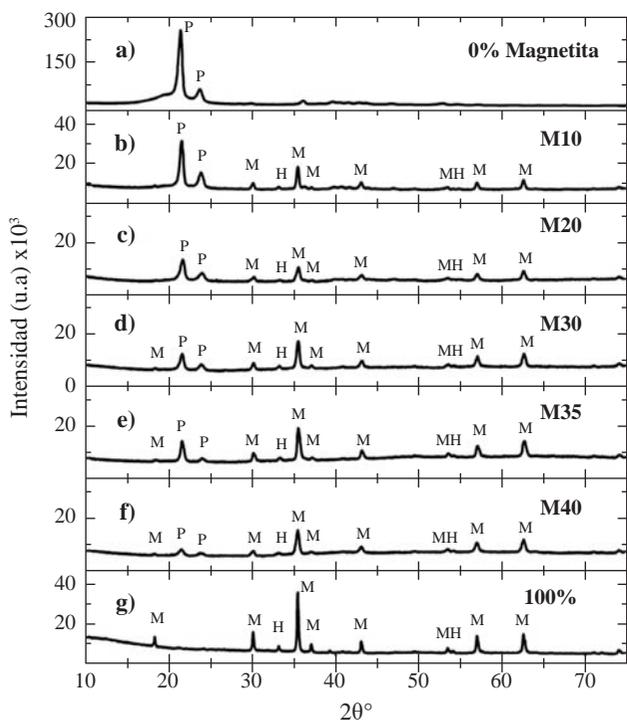
### Results and discussion

**XRD.** Prior to the samples synthesis, the different phases that comprise the powder magnetite used in the composites production were semiquantitatively identified. Through the X’Pert HighScore software version 2.1.2, it was found that the magnetite is composed of two different phases: Magnetite and Hematite, with an approximate weight percent of 87.1% and 12.9% respectively, figure 1. Hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) is an iron oxide, with high corrosion resistance, low cost, semiconductor properties, no toxicity, is commonly known as antiferromagnetic materials (Tadić, *et al.*, 2011), but it is characterized to be chemically more stable than the magnetite. In Natural magnetite ore deposits it is common to find traces of hematite (Otake, Wesolowski, Anovitz, Allard & Ohmoto, 2007). The X ray diffractogram of pure Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, HDPE, and the composites with different filler ratio content are shown in figure 2.

The hematite characteristic reflections are: 24.182°, 33.205°, 35.67°, 39.341°, 40.910°, 50.533°, 54.149°, and 72.065° while the magnetite characteristic reflections are: 18.28°, 30.08°, 35.43°, 37.071°, 43.070°, 53.43°, 56.95°,



**Figure 1.** Weight percentage of the phases that compose the magnetite powder used for the samples synthesis.



**Figure 2.** Diffraction patterns for all samples with different volume percentages of magnetite powder b) 10% c) 20% d) 30% e) 35% f) 40%. Diffraction patterns of: a) 100% HDPE, and g) 100% magnetite.

62.546°, 70.95°, and 73.992°, figure 2. The magnetite has a face-centered cubic system, whereas the hematite belongs to a hexagonal crystal system.

Figure 2 shows a steady decrease in the characteristic of the peaks' intensity of the HDPE located in 21.419° and 23.707° in all samples, as well as the amorphous region (2θ :17°-21°). These peaks reduced dramatically in the M35 and M40 diffractograms (figure 2e and figure 2f respectively). Moreover, a gradual increase occurred in the characteristic peaks of the crystalline phases (hematite and magnetite): 33.205°, 35.43°, 37.071°, 43.070°, 56.95°, and 62.546°.

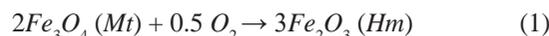
It can be concluded that there was an amorphous-crystalline transition due to the magnetite increasing content. The amorphous region size and characteristic HDPE peaks intensity decreased, while the quantity of crystalline peaks and its intensity increased. This is sustained through the calculation of the crystallinity percent for each sample ( $\chi_c$ ), table 4. The HDPE and magnetite never reacted with each other; hence, did not create either a new phase or new peaks, figure 2.

The semiquantitative analysis of each sample showed the variation in weight percentages of the contained phases (hematite and magnetite). This behavior helps to explain the magnetic properties of the composites. Table 3 shows the results for the semiquantitative analysis for each composite.

As it is shown in table 3, the magnetite and hematite phases are present in all composite samples, since these comprises the magnetite powder used as raw material.

M10 and M20 samples contain a higher hematite weight percentage (34.1%-39.9%), and lower magnetite phase content (65.9%-63.1%), regarding the magnetite powder used as precursor, which has a weight percentage of 12.9% and 87.1% respectively in each phase. This confirms the increasing weight percentage of the hematite phase for the samples with less ratio of magnetite powder, figure 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/422/1991>. The increased amount of hematite is directly related to the production stage in which several factors such as the weight of the raw materials and the extrusion temperatures, tables 1-2, can affect the samples properties.

Magnetite to hematite transformation and vice versa is very common in nature because these two minerals are abundant sources of iron in the earth. In rocks where iron oxides are produced, mutual substitution between magnetite and hematite is carried out (Mücke & Cabral, 2005) through redox reactions and hydrothermal reactions in aqueous media (Otake, et al., 2007). Hematite (Fe<sup>III</sup>O<sub>3</sub>) contains only iron with a Fe<sup>III</sup> oxidation state (ferric) which makes it stable in the presence of oxygen. On the other hand, magnetite (Fe<sup>II</sup>Fe<sup>III</sup>O<sub>4</sub>) contains two oxidation states of iron in Fe<sup>III</sup> and Fe<sup>II</sup> (ferric and ferrous) being more unstable in the presence of oxygen, producing its transformation to hematite through an oxidation reaction, as it is shown in the following equation (Otake, et al., 2007):



The thermal process during the extrusion that induces the magnetite oxidation to hematite is carried out at higher rates in those samples that contain less powdered magnetite

**Table 3.** Weight percentages of the phases present in the samples according to the XRD semiquantitative analysis.

Sample ID	Hematite %Weight according XRD	Magnetite %Weight According XRD
M10	34.1	65.9
M20	39.9	63.1
M30	24.7	75.3
M35	20.8	79.2
M40	20.1	79.9
100% Magnetite	12.9	87.1

**Table 4.** Percent crystallinity of each sample

%Vol of magnetite in each sample	% $\chi_c$ of each sample
0-HDPE	73
10	80
20	85
30	88
35	89
40	90
100	98.8

(table 3 and figure 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1991>). Since a fluid mixture within the extruder (M10 and M20 samples) can reach a more homogeneous heating along the screw during the process; thus, it promotes the powdered magnetite oxidation reaction. In contrast, mixtures with higher ratio of powdered magnetite (M30-M40) are less fluid due to the greater weight of solid material added, and thereby the homogeneous heating is lower.

The XRD technique is frequently used to characterize semicrystalline polymers in order to assess their crystallinity degree, defects and preferential orientations. In semicrystalline polymers two different phases are mainly distinguished: The crystalline and the amorphous phase. Thus, the X-ray diffraction is the simplest technique for measuring the polymeric materials crystalline fraction at room temperature. For the degree of crystallinity determination, numbers of x-ray diffraction methods are reported and practiced. The most common method is the Wide-Angle X-ray Diffraction (WAXD) method and it is used in the present work.

The diffraction pattern of each sample is divided in two zones: Crystalline and amorphous. The intensity of the diffracted beam from crystalline part ( $I_c$ ) is the area under the sharply resolved peaks, which in this case includes two HDPE main peaks ( $21.419^\circ$  and  $23.707^\circ$ ), as well as those peaks contributed by the hematite and magnetite phases. The intensity of the diffracted beam from amorphous part ( $I_a$ ) is the remaining area under curve above background. For all diffraction patterns the amorphous region is given by the HDPE amorphous zone ( $2\theta$ :  $17^\circ$  -  $21^\circ$ ). Finally, the  $\% \chi_c$  or percent crystallinity is calculated as the ratio between the crystalline peaks area ( $I_c$ ) in the total area of the diffraction pattern ( $I_c + I_a$ ) in which the diffracted beam is more intense:

$$\% \chi_c = \frac{(I_c)}{(I_c + I_a)} * 100 \quad (3.1.1)$$

To calculate the areas under the peaks of the crystalline region, as the relief of the amorphous region in all samples, Lorentzian functions were used. Crystallinity percentages are shown in Table 4.

**SEM.** Images of all composite samples were taken, as well as the raw materials in order to assess the material morphology, dispersion and homogeneity of the particulate material into the polymer matrix.

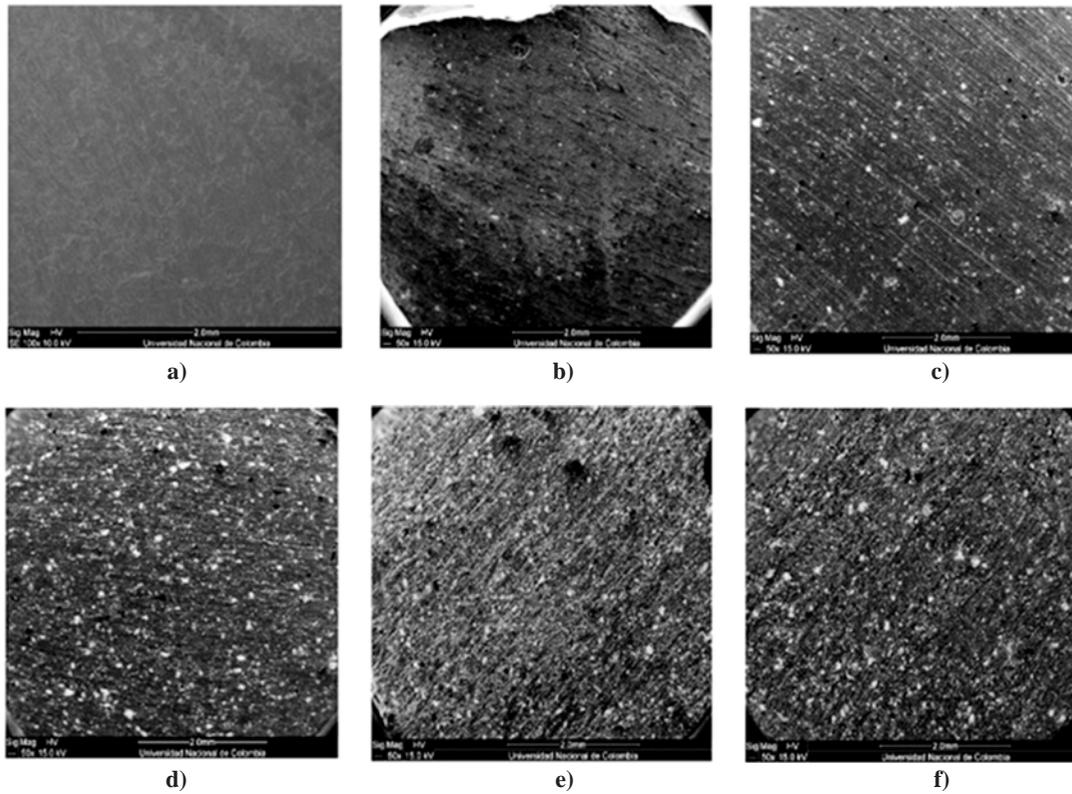
Through SEM images it is not possible to distinguish the morphological differences between hematite and magnetite; both phases are present in the powder used as raw material as it was previously demonstrated by the XRD analysis. Figure 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1990>, shows the magnetite powder which is used as raw material in each composite. This magnetite has high distribution of particles sizes and shapes with low aspect ratio; these results are consistent with the works done by **Weidenfeller, et al., 2002** and **Razzaq, et al., 2007**. The aggregates of magnetite particles include

large particles sizes ( $57 \mu\text{m} - 40 \mu\text{m}$ ), medium particles sizes ( $26 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$ ), and finally small particle sizes ( $0.8 \mu\text{m} - 9 \mu\text{m}$ ).

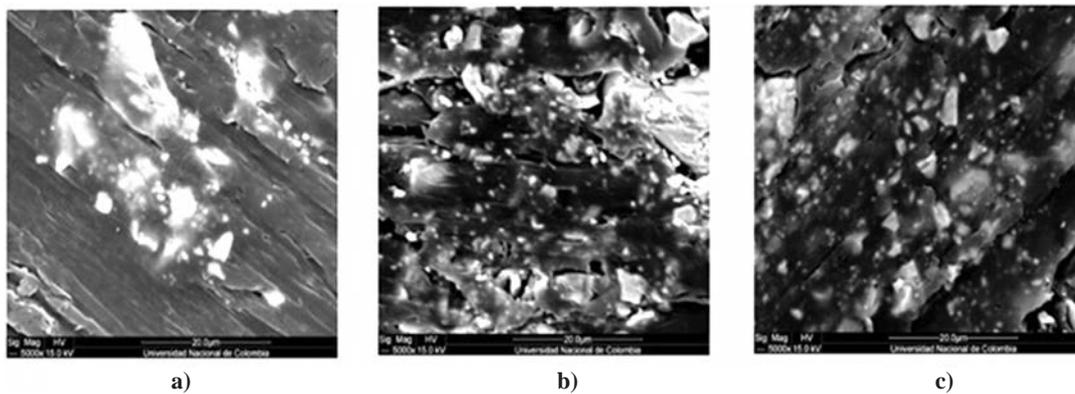
Figures 3 and 4 show micrographs of the composites samples in cross sections; they have different magnitudes ( $50\times - 5000\times$ ). The powder crystals are bright and are embedded in an opaque polymer matrix. The filled particles size as well as its shape is not uniform. In figures 3 and 4 a wide range of particles sizes: Large particles with sizes between  $145 \mu\text{m}$  to  $100 \mu\text{m}$ , medium particles with sizes from  $18 \mu\text{m}$  to  $39 \mu\text{m}$ , and small particles with sizes from  $7$  to  $0.5 \mu\text{m}$  can be observed. The gap between particles decreases with increasing the filler content and modifying the composite dielectric properties (**Weidenfeller, et al., 2002**; **Razzaq, et al., 2007**). In figure 4a for instance, the longest distance between particles in the M20 sample can be greater than  $220 \mu\text{m}$ ; although the average of distances between magnetite particles in the M40 sample is about  $17 \mu\text{m}$  (figure 4c). This suggests an increased interconnectivity of the magnetite particles within the polymeric matrix when the filler content is higher, that can explain the prolonged decrease in the volumetric resistivity for the composites with contents equal or greater than 30 vol% of magnetite powder as it is going to be shown in the next section.

**Volumetric resistivity measurements.** As it is shown in figure 5 the significant drop (eight orders of magnitude  $10^{14}$  to  $10^6$ ) in the resistivity of composites can be observed between a filler loading of 30 vol% to 40 vol% as was predicted in previous works properties (**Panwar, et al., 2007**; **Weidenfeller, et al., 2002**; **Razzaq, et al., 2007**). In contrast, figure 5 shows a high-volume resistivity between the pure HDPE samples and the HDPE samples filled with 20 vol% of magnetite, that is an indicative of the insulating polymeric phase and the large distances between particles. The samples resistivity can be affected by some factors like the magnetite particles distribution and its interconnectivity into the HDPE matrix, this is why the samples with a low volume fraction of magnetite (0 vol % - 20 vol%) have a high-volume resistivity, with a low magnetite particles dispersion, so the resistivity is expected to be high and no conductive paths are available between the magnetite particles.

On the other hand, in the samples with the highest filler content (M30-M40) some particles seem to have contacts points among them or are separated only by very small gaps, that produces conducting paths according to the theories of Boettcher (**Boettcher, 1952**) and Bruggeman (**Bruggeman, 1935**), this indicates an ideally and homogenous dispersion of the magnetite particles in the polymeric matrix of HDPE. Therefore, charge carriers migrate from one magnetite particle to a neighboring one by hopping or tunneling (**Razzaq, et al., 2007**). As the work done by **Weidenfeller, et al., 2002**, who studied the thermal and electrical properties of similar composites materials, it is possible to adopt the model formulated by Boettcher and Bruggeman, in order to calculate the theoretical percolation threshold of this



**Figure 3.** Composites SEM images (50x) with different magnetite ratios in %vol: a) 0% b) 10% c) 20% d) 30% e) 35% f) 40%.



**Figure 4.** Composites SEM images (5000x) with different magnetite ratios in %vol: a) 20% b) 30% c) 40%.

kind of composites. According to these, the conductivity  $\sigma$  in a system comprising by two phases: Phase 1 with a conductivity  $\sigma_1$  and a volume fraction  $\phi_1$ , and a phase 2 with a conductivity  $\sigma_2$  and a volume fraction equal to  $\phi_2=1-\phi_1$ . This can be calculated with the asymmetric Bruggeman equation:

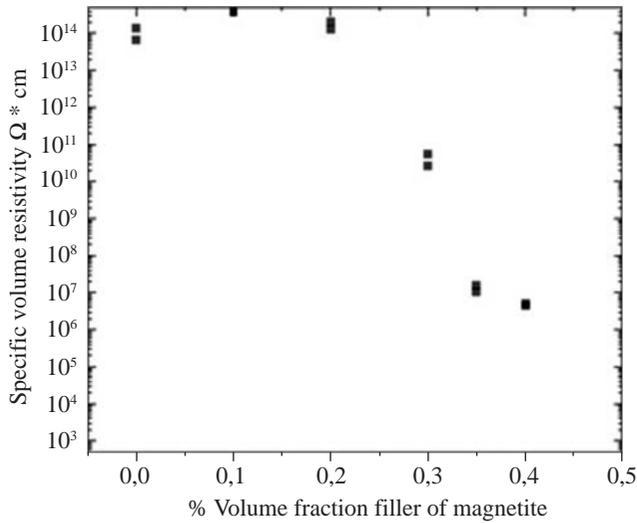
$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_1}\right)^{1/3} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma - \sigma_2} = \frac{1}{\phi_1} \quad (3.3.1)$$

For the special case of an ideal conductive phase 1 ( $\sigma_1 = 1$ ) and an ideal insulator phase 2 ( $\sigma_2 = 0$ ) the equation above results in a percolation threshold for a phase 1 volume fraction  $\phi_1 = 0.33$ , while for a ratio of conductivities  $\sigma_1 / \sigma_2 = 300$  the percolation threshold is slightly lower with a phase

1 volume fraction of  $\phi_1 = 0.31$  (Weidenfeller, *et al.*, 2003; Razzaq, *et al.*, 2007; Boettcher, 1952; Bruggeman, 1935).

Both theoretical percolation models were consistent with the experimental results obtained in this work, figure 5, where the decrease in the volumetric resistivity is evident for samples that contain highest magnetite volumes ( $> 30\%$  vol).

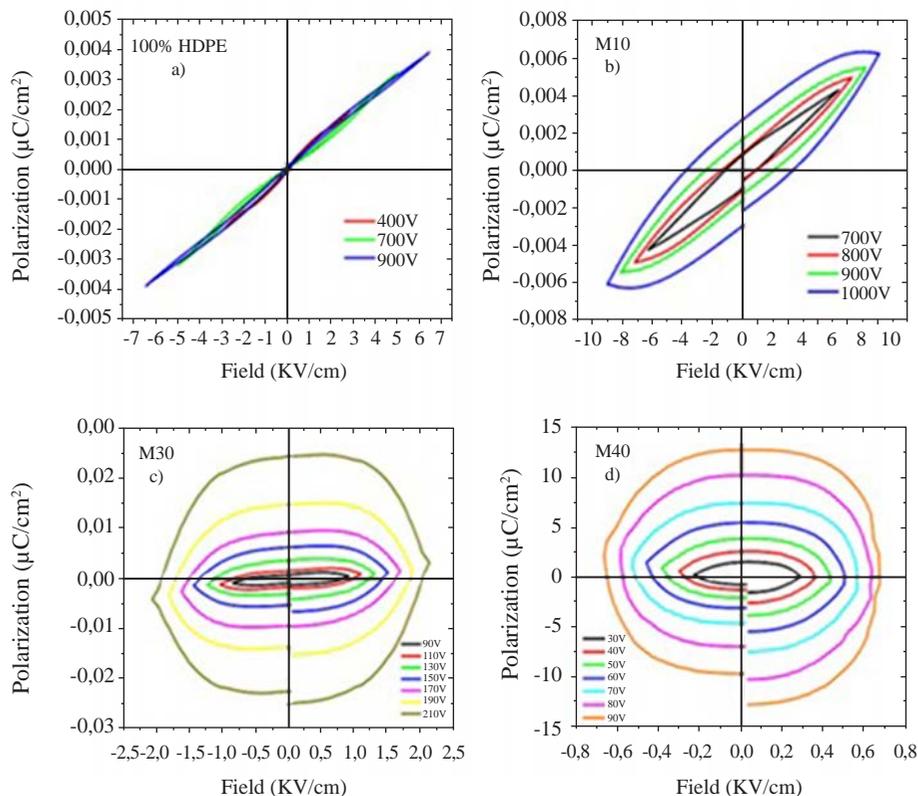
**Electric polarization measurements.** The electrical polarization measurements were conducted at room temperature and a triangular wave with a period of 50 ms was used. Figure 6 shows the polarization curves for the pure HDPE sample, and the M10, M30 and M40 samples, respectively.



**Figure 5.** Comparison of the volume resistivity of composites. Samples differ in volume fraction of magnetite particles, and magnetite grades and matrix polymer.

The electrical polarization curve P-E, is a plot of a polarization (P), versus the electric field (E) or voltage (V) applied to the sample at a given frequency. For an ideal linear capacitor, the polarization curve is a straight line whose slope is proportional to the capacitance, since the charge is in phase with the voltage (Stewart & Cain, 1999). For an ideal

resistance, the P-E curve is a circle centered at the origin, since the current and voltage are in phase, similar to the M30 and M40 P-E curves, figures, 6c and 6d. Figure 6 shows how the composite material undergoes a transition going from an insulating material in the M10 sample to a resistive material where the current and voltage are in phase, samples M30 and M40. If these two components are connected in parallel (resistance and linear capacitor), the obtained P-E curve is similar to figure 6a and 6b, which relates the behavior of a capacitor with losses, where the slope is proportional to the capacitance and the area within the loop is proportional to the device loss tangent. The breakdown voltage of the HDPE will be significantly reduced when the powdered magnetite is added and its capabilities as an insulating material will be affected. That is the reason why as the magnetite percentage increases the polarization rises even in the presence of low magnitude fields, figures 6c and 6d respectively. As it was seen in the previous section, the dielectric transition behavior matches with the percolation threshold calculated for 33 %vol of magnetite (Boettcher, 1952; Bruggeman, 1935). In the samples with high particle concentrations (< 30%vol) the electrical conductivity and the dielectric losses increased (Ramajo, *et al.*, 2009). However, this behavior is visible from the sample with 10% by volume of magnetite. The asymmetric behavior of the P-E curves is due to the electrodes asymmetry used in capacitive structure (Salazar, Landínez & Roa, 2009).



**Figure 6.** Composites P-F curves a) 100% HDPE b) 10%  $Fe_3O_4$  c) 30 %vol. vol $Fe_3O_4$  d) 40%  $Fe_3O_4$

To calculate the dielectric constants of the pure HDPE and M10 samples, the equation 3.4.1. can be used. The permittivity of an insulating, or dielectric, material  $\epsilon_r$ ; the permittivity of a vacuum, or free space,  $\epsilon_0$ ; and their ratio is called the dielectric constant  $\epsilon_r$ :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.4.1)$$

Equation 3.4.2 relates the surface charge density or electric displacement D and the electric field E applied to a dielectric in a capacitor:

$$D = \epsilon E \quad (3.4.2)$$

The equation above could be rewritten using the equation 3.4.1, such that the surface charge density D is written in terms of the material dielectric constant, equation 3.4.3:

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E \quad (3.4.3)$$

In the presence of a dielectric material, electric displacement can be represented as a function of the polarization P as it is shown in the Equation 3.4.4. Using the equation 3.4.5 it is possible to find the dielectric constant value of the material as a function of the applied electric field and the polarization as it is shown in equation 3.4.5:

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (3.4.4)$$

$$\epsilon = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} \quad (3.4.5)$$

The values of the polarization saturation and the electric field for the different voltages applied to the pure HDPE and M10 samples were used in order to find the average electric constant value ( $\epsilon_r$ ), tables 5 and 6. The vacuum permittivity ( $\epsilon_0$ ) is a constant value  $8.8542 \times 10^{-12}$  F / m.

**Table 5.** Dielectric constant value for each voltage used as function of the polarization saturation and the electric field measured for the 100% HDPE sample.

Voltage (V)	Electric Field (E) (V/m) $\times 10^3$	Polarization saturation (P <sub>s</sub> ) (C/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-5}$	Dielectric constant ( $\epsilon_r$ )
400	285	1.97	8.81
700	501	3.22	8.18
900	643	3.89	7.83
Average value			8.27

**Table 6.** Dielectric constant value for each voltage used as function of the polarization saturation and the electric field measured by the M10 sample.

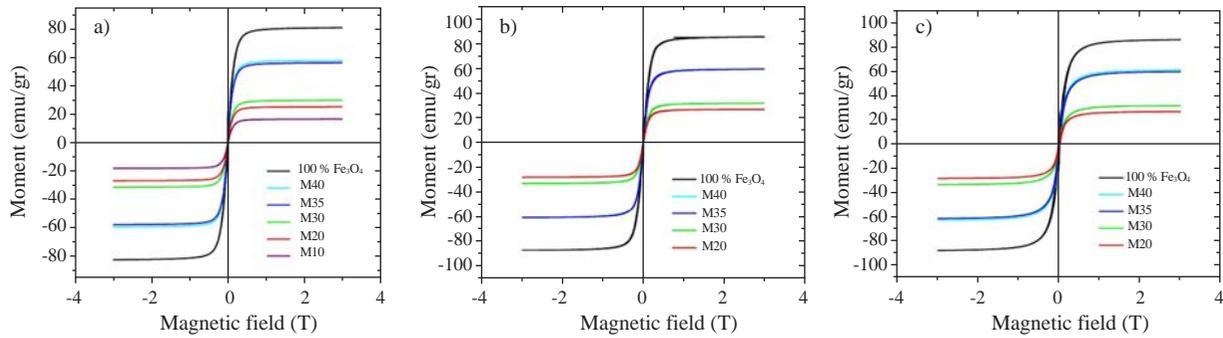
Voltage (V)	Electric Field (E) (V/m) $\times 10^3$	Polarization saturation (P <sub>s</sub> ) (C/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-5}$	Dielectric constant ( $\epsilon_r$ )
700	639	4.28	8.57
800	723	4.92	8.69
900	816	5.48	8.59
1000	908	6.22	8.74
Average Value			8.65

The average dielectric constant calculated for the HDPE sample is above the normal value registered by manufacturers and suppliers. Since the experimental conditions are different, for instance, the measurement frequency used for the HDPE suppliers in many cases to obtain the dielectric constant is 1 MHz, (Matweb, 2014). Resulting in  $\epsilon_r$  values of 2 - 2.5. Whereas the used frequency in this work never got above the 20 Hz. Even so, the calculated dielectric constant value for the samples 100% HDPE and M10 is in the acceptable range of  $\epsilon_r$  at low frequencies for nonconductive plastics such as Bakelite (Meseguer, Gómez, Olmos, Quiles & Romero, 1995). The slight increase in  $\epsilon_r$  between the sample of pure polyethylene and the M10 sample is related to higher polarization values even for the same voltages (Tables 5 and 6). Thus, the addition of powdered magnetite within the plastic matrix allows reaching higher capacitance (C) to the composite.

#### Magnetization measurements

**Hysteresis curves taken at different temperatures as a function of the magnetic field.** Hysteresis curves for all samples are shown in figure 7. Their properties like the saturation magnetization ( $M_s$ ), remanent magnetization ( $M_R$ ) and coercivity ( $H_c$ ) are shown in table 7. It is evidenced that for all curves  $M_s$  and  $M_R$  decrease as the magnetite proportion decreases within the matrix. These results match with those obtained by (Kong, et al., 2010; Ramajo, et al., 2009; Makled, et al., 2005; Mokhtar, Abdullah & Ahmad, 2012), in which the saturation magnetization and remanent magnetization values increase as the filler percentage by weight or by volume (either magnetite or some other ferrite) increases. Meanwhile, pure magnetite used as a filler has an experimental magnetic moment of 81.22 emu/g which is slightly lower than the stoichiometric magnetite that has a magnetic moment of 90 emu/g at  $\approx 300$ K (Buschow, 2014). This value is affected by the particle size, flaws in the crystalline structure that favored the spins random arrangement, and therefore, the presence of a dead layer in the particles surface.

In the previously cited works the increase of  $M_s$  and  $M_R$ , due to the increase of the powdered magnetite content in the composite samples, is explained through the probable interaction between the magnetic properties of the magnetite particles within the polymeric matrix (Kong, Ahmad, Abdullah & Yusoff, 2009). Also, it is determined that the composite saturation magnetization is linearly dependent of the filler mass fraction following the relationship:  $M_s = M_F \times W_F$ , where  $M_F$  and  $W_F$  are the filler magnetization and the filler weight fraction in the composite (Mackled, et al., 2005; Mokhtar, et al., 2012). An aspect to consider in this work and that is not described in previous research that used magnetite as filler in polymeric composites (Weidenfeller, et al., 2003; Razaq, et al., 2007; Ramajo, et al., 2009), is the presence of the hematite phase in the samples and that can affect the  $M_s$  and the  $M_R$  values in the hysteresis curves. The hematite weight content within the composites is variable



**Figure 7.** Hysteresis curves taken at different temperatures as a function of magnetic field for each composite sample: a) 300K, b) 120K c) 50K

**Table 7.** Magnetic properties of the composite samples at different temperatures: Saturation magnetization ( $M_s$ ), remanent magnetization ( $M_R$ ) and coercivity ( $H_c$ ).

Sample ID	Samples magnetic properties at 50K			Samples magnetic properties at 120K			Samples magnetic properties at 300K			Hematite %wt in the sample
	$M_s$ (emu/g)	$M_R$ (emu/g)	$H_c$ T	$M_s$ (emu/g)	$M_R$ (emu/g)	$H_c$ T	$M_s$ (emu/g)	$M_R$ (emu/g)	$H_c$ T	
100%Magnetite	86.3	8.2	0.0179	86.2	4.5	0.00900	81.2	4.9	0.0073	12.9
M40	61.6	8.0	0.0196	60.1	4.3	0.01008	58.4	4.0	0.0091	20.1
M35	59.4	7.8	0.0185	59.7	4.3	0.01028	56.9	4.1	0.0087	20.8
M30	32.3	4.2	0.0179	32.2	2.5	0.01003	30.6	2.1	0.0068	24.7
M20	26.7	3.4	0.0181	27.2	2.0	0.01069	25.7	1.8	0.0073	39.9

and is related to the used production process (section 2.2). According to Table 7, the weight percentage of the hematite phase is higher for samples with lower percentage by magnetite volume (10% -30%). Also, this samples exhibit lower  $M_s$  and  $M_R$  values for all temperatures. Hematite ( $Fe_2O_3$ ) is an iron oxide that crystallizes in a rhombohedral structure and has some particular magnetic properties since although it is classified as an antiferromagnetic material with a Neel temperature ( $T_N = 950-960K$ ), between 263 - 267K, it has a magnetic transformation called Morin transition ( $T_M$ ), temperature at which the material passes to be completely antiferromagnetic to present a weak ferromagnetism ( $T < T_M < T_N$ ). Below the  $T_M$  temperature the magnetically arranged spins are oriented along the trigonal axis [1 1 1] (C-axis) of the structure, this causes that the hematite behaves as a uniaxial antiferromagnet. Above the  $T_M$  the spins are in the basal plane perpendicular to the axis [1 1 1] except for a slight turn of inclination of the spins outside the basal plane, which gives the material a weak ferromagnetic moment (Zysler, *et al.*, 2001; Stewart, Borzi, Cabanillas, Punte & Mercader, 2003; Mansilla, Zysler, Fiorani, Suber, 2002). This small magnetic moment generated within the hematite structure has an estimated value of  $0.0115\mu B$  (Robinson, Harrison, McEnroe & Hargraves, 2004) which is small compared to the magnetite  $4\mu B$  (Thapa, Palkar, Kurup & Malik, 2004), both given as magnetic moments per unit formula (Mpfu).

The composite magnetism is given by the  $Fe_3O_4$  which contains an additional phase of  $Fe_2O_3$  as it was demonstrated in the quantitative analysis by XRD (section 3.1), and whose weight percentage is modified by the thermal heating during the samples fabrication process. For the hysteresis curves taken at 120K and 50K (figures 7b-7c) hematite behaves like an antiferromagnetic material due to the Morin transition and consequently it does not contribute to the samples magnetic moment, but for the test taken at 300K ( $T > T_M$ ) hematite can provide a small magnetic moment (which can be obviated if it is compared to the magnetic moment provided by magnetite) because of the parasite or weak ferromagnetism above the  $T_M$ .

The coercivity ( $H_c$ ) behavior is independent of the magnetite reinforcement within the matrix, similar results were presented by Ramajo, *et al.*, 2009 and Guo, *et al.*, 2007, and it's due to the particle size and its random orientation (Mokhtar, *et al.*, 2012). For the hysteresis curves taken at 50K and 120K the value of the coercive field increases in the samples with lower magnetite content (table 7), indicating that the plastic matrix of HDPE is resistive against the alignment of the magnetic moments of magnetite particles exposed to an external magnetic field (Kong, *et al.*, 2010). In these samples, the distance between the particles also increased and it reduces their interaction, this is an indicator of the material anisotropy that increases with the HDPE matrix increasing (Kong, *et al.*, 2009).

Some properties in ferro and ferrimagnetic materials as spontaneous magnetization vary with temperature reaching their maximum at  $T = 0K$ , and have a continuous decrease until they reach 0 in  $T_c$  or Curie temperature. Magnetite  $T_c$  is 853K, in that point the material becomes completely paramagnetic. According to figure 7 and table 7, it is possible to observe the saturation magnetization, remanence magnetization and the coercive field tendency decreasing as the temperature increases (Kong, *et al.*, 2009; Donescu, *et al.*, 2012; Demir, Baykal, Sözeri & Topkaya, 2014; Costa, Ballarin, Spegni, Casoli & Gardin, 2012; Gu L, He X & Wu Z, 2014). Using as reference the M40 sample measured at 300K, the parameters  $M_s$ ,  $M_r$  and  $H_c$  decrease by 5.2%, 50% and 60% respectively, compared to the same values measured at a 50K. This is caused by the magnetite thermal spin fluctuations that increase at high temperatures.

Contrary to the low dependence of the coercive field  $H_c$ , relative to the magnetite content in the samples, the  $H_c$  decreases as the temperature increases ( $H_{c50} > H_{c120} > H_{c300}$ ). Table 7 shows a decrease for all samples in the  $H_c$  values up to an order of magnitude for the measurements taken at 300K relative to the measurements taken at 50K. This remarkable fluctuation in the  $H_c$  values can be related to the  $T_v$  temperature ( $\approx 120K$ ) where the Verwey transition takes place. Below the  $T_v$  the coercivity has much higher values, this is attributed to the discontinuous change in the magnetite anisotropy, going from a symmetrical structural phase as the cubic to a less symmetrical phase like the monoclinic (Bohra, *et al.*, 2009).

Magnetite is considered a superparamagnetic material at room temperature with zero coercive field strength and remanence magnetization, but with a high saturation magnetization value (Costa, 2012; Demir, *et al.*, 2014; Gu, *et al.*, 2014) which makes it desirable for biomedical applications such as targeted drug delivery. This superparamagnetic behavior is partially evidenced by the curves taken at 300K (Figure 7a), which clearly show the reduction in the material hysteresis in response to the applied field with a substantial decrease in the  $H_c$  and  $M_r$  values. For instance, at 300K M20 sample, it has a  $H_c$  and  $M_r$  value of 0.0073 T and 1.81 emu/g respectively, but at 50K, the same one has a  $H_c$  value of 0.017 and  $M_r$  value of 3.42 emu/g.

**Magnetization and susceptibility curves as a function of the temperature.** Figure 3S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/422/1992>, shows the samples magnetic moment as a function of the temperature (50K - 300K) exposed to a constant magnetic field of 0.3T. An increase in the material magnetic moment increase as the filler content increase within the HDPE matrix as can be seen, it follows the same trend as the hysteresis curves. The pure magnetite has the greatest magnetic moment and the M10 sample has the lowest magnetic moment, figure 3S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/422/1992>. The information about the maximum magnetic moment of each sample (M), temperatures (T)

at which these maximum take place (normally associated with the Verwey transition), and the maximum volumetric susceptibilities ( $\chi_v$ ) are summarized in table 8. The dependence of magnetization as a function of the temperature for all samples between 50K and 300K under ZFC (zero-field-cooled) and FC (field cooled) conditions, is also showed in figure 3S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/422/1992>. During FC measurements, a magnetic field of 0.3 T was applied while the sample was cooled to 50K, then the magnetization was measured while the sample was heated up to 300K. In the ZFC measurements the sample was cooled to 50K without the application of an external magnetic field, and then the magnetization was measured as the temperature increased up to 300K under the influence of a magnetic field of 0.3T. Figure 3S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/422/1992>, and table 8 provide relevant information about the composite and magnetite magnetic behavior, before and after the Verwey temperature ( $T_v$ ), which was registered from 119K to 124K (Jackson, Bowles & Banerjee, 2011). This value can be affected by some factors such as the particle size (Thapa, *et al.*, 2004) or the presence of other phases. The magnetite used in the current study has an irregular particle size (section 3.2) and it contains additional phases as hematite (section 3.1).

Figure 3S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/422/1992>, shows how for all samples, the magnetic moment (M) was low at 50K and grew slightly to 100K, then at approximately 120K it increased drastically until it reached its maximum value due to the magnetic domains alignment relative to the external field. The magnetite used as precursor in the samples achieved the maximum magnetic moment at 127.66K, table 8. The spontaneous reduction in M below the 120K was an indicator of the Verwey transition and was caused by the material structural system transition going from cubic to monoclinic.

Figure 4S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/422/1993>, and table 8 show how M10-M40 samples achieved the M maximum value at 129K approximately, and it is a result of the irregular particle size

**Table 8.** Magnetic moment and magnetic susceptibility for each sample as a function of the temperature. M is the magnetic moment;  $\chi_v$  is the magnetic susceptibility and T the temperature at which the maximum M is reached.

Sample ID	M emu/gr	T K	$\chi_v$ $\times 10^{-3}$	Hematite phase (wt%) within the composite
100% Fe3O4	76.81	127.66	0.38	12.9
M40	57.27	129.19	1.19	20.1
M35	55.54	129.41	0.58	20.8
M30	29.96	129.85	0.30	24.7
M20	25.60	129.90	0.13	39.9
M10	15.59	129.96	0.10	34.1

(figure 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1990>), a growing presence of the hematite phase and the resistive effect of the HDPE matrix which hinders the magnetic moments alignment of the magnetite particles exposed to an external magnetic field (Kong, *et al.*, 2010). After reaching the maximum value, the samples of the magnetic moment began to drop slightly due to the magnetic moments thermal fluctuations until it reached the Curie temperature  $T_c$  at  $\approx 853\text{K}$ .

The decrease in  $M$  vs.  $T$  curves for temperatures above the TV has a greater slope in samples with higher content of magnetite (Figure 5S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1994>), confirming the retarding effect of the HDPE matrix on the magnetic moments alignment. Furthermore, a dramatic growth in the samples magnetization was evidenced, especially for composites with filler contents up to 30% in magnetite volume. Aspect that was clearly related to the insulator-conductor transition in which the composite undergoes at this filler contents, and that was confirmed through polarization and volume resistivity characterizations (sections 3.3 and 3.4). This jump between the samples magnetic moments as a function of the temperature is associated with the increased proliferation and interaction among the particles as the percentage of magnetite increase within the matrix.

Hematite transitions like the Morin transition unlike magnetite Verwey transition is not easily distinguishable in any of the curves since the hematite magnetization is negligible compared to that provided by the magnetite. The temperature at which the ZFC magnetization curve is detached from the FC curve is known as irreversibility temperature. The taken measurements show discrepancies between the ZFC and FC curves at low temperatures until it joins at the point where the material reaches the maximum  $M$  value, figure 3S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1992>. In the ZFC measures the samples were cooled in absence of an external magnetic field and the interactions between particles were reduced. In addition, the random orientation of the magnetic moments resulted in lower magnetization values, that is why the ZFC curve starts with lower magnetization values, but once the external field is applied and the temperature is increased, it is observed that the magnetization starts to grow because the thermal energy released the spins and it allows them to align with the applied field. On the other hand, when the samples were cooled under the magnetic field influence the particles magnetic moment became stabilized under a preferential orientation between them, and impeded the initial alignment with the external field.

The irreversibility temperature is higher for the pure magnetite sample, figure 3S-f, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1992>, since the ZFC and FC curves never met among them. Generally, the curves separation at high temperatures is the result of the particles large size distribution (Zhang, *et al.*, 2001), such is the case of the filler material used in this

study. Even though all samples have the same filler with the same large size particles distribution, the proximity of these due to the plastic matrix improves the magnetic dipoles interaction and cooperates with its preferential orientation relative to an applied external field (Kong, *et al.*, 2009). This close interaction among particles, due to the plastic matrix adhesion, reduces the irreversibility temperature among them, and also promotes the composite magnetization and the magnetic susceptibility.

The samples magnetic susceptibility ( $\chi$ ), as a function of the temperature, is shown in the figure 6S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1995>, and in the figure 7S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1996>. Small and positive values according to the ferrimagnetic materials behavior are observed ( $10^{-3}$ ). All samples reach the magnetic susceptibility maximum value at 125K approximately and it is attributed to the magnetite Verwey transition (Zhang, *et al.*, 2001). Like the saturation magnetization,  $\chi$  is linearly dependent of the magnetite content within the composite.

The drop in the composites susceptibility at low temperatures is related to the magnetic domains decrease within the magnetite due to its structural change into a monoclinic structure. The boundaries domains movement is responsible for the susceptibility signal, for this reason the large decrease in these domains results in the susceptibility drop as a function of time (Tabís, *et al.*, 2007).

At the susceptibility, maximum value near to the magnetite  $T_v$ , each magnetite spin should be parallel to the applied field (blocking temperature). This agrees with previous studies that found that by heating the magnetite through the  $T_v$ , the magnetic susceptibility may be increased from 20% up to 80% (Carpornzen Gilder & Hart, 2006). After reaching the maximum value of  $\chi$  and below the magnetite Curie temperature, the  $\chi$  as a temperature function follows the relationship:  $\chi(T) \propto M_s(T)/K(T)$ , where  $M_s$  is the spontaneous magnetization and  $K$  the magnetic anisotropy. Both  $M_s$  and  $K(T)$  decreased as the temperature increased, so when  $T$  approaches to  $T_c$  both of these factors tend to go to 0 (Harrison & Putnis, 1996). For this reason, figure 6S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1995>, shows how the curves that represent the magnetic susceptibility, after reaching the maximum value, decrease slightly as the samples are heated. At low temperatures, these two effects cancel and  $\chi$  remains roughly constant. If  $K$  decreases at a faster rate than  $M_s$ , thermal fluctuations at  $T$  close to  $T_c$  lead to enhance susceptibility. This is known as the Hopkinson effect. Above  $T_c$ ,  $M_s$  is zero and the material displays only paramagnetic susceptibility, which falls to zero rapidly as  $\chi \propto 1/(T-T_c)$ .

The pure magnetite sample (100%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) has the lowest susceptibility value due to factors such as the large particles sizes, wide particles sizes distribution and the lack of interactions between magnetite particles as a result of the no adherence among them. The HDPE plastic matrix

within the composites promotes the adhesion and therefore the magnetic dipoles interaction and their orientation to an applied magnetic field (Kong, *et al.*, 2009).

The  $\chi$  vs T and the M vs T curves for all samples (Figures 3S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1992>, 6S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1995>), followed the same pattern, the composites susceptibility grows as the magnetite proportion added within the plastic matrix increases due to the augmented interaction between particles. Meanwhile figure 7S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1996>, evidences how the M10-M30 samples achieve the  $\chi$  maximum value at higher temperatures than the M35 and M40 samples as a result of the irregular particle size, the hematite phase growing presence and the HDPE plastic matrix resistive effect which impede the magnetic moments alignment to the external applied field (Kong, *et al.*, 2010).

## Conclusions

Become Composite samples with different volume ratios of HDPE and magnetite were produced using a single screw extruder machine with three heating zones. The structural and semiquantitative analysis by XRD of the magnetite used as precursor allowed to detecting an additional phase of hematite with a weight percentage of 12.9%. Moreover, the XRD analysis proved the HDPE high degree of crystallinity. Moreover, the composites XRD analysis showed an increased content of hematite phase due to the magnetite unstable nature which readily react with oxygen to become other phases such as hematite at high temperatures. The XRD semiquantitative analysis showed that the samples with high hematite content were those with magnetite contents less than 30 vol%. Since the material flowability and homogeneity along the extrusion screw is higher allowing greater heat transfer to the powder material that promoting the oxidation reaction. It is also confirmed by XRD that there is no chemical reaction between the filler and the HDPE, but rather a mechanical adhesion of the magnetite particles with the polymer matrix, because the characteristic peaks of each material remain constant in every sample diffractogram. The samples peaks intensity reduction or increase as well as its width determined its crystallinity degree (%  $\chi_c$ ). It was found that the M10 sample is the sample with the lowest crystallinity and the M40 sample has the highest  $\chi_c$ . Thus, the samples crystallinity degree increases as the magnetite increases within the plastic matrix. Morphological characterization carried out by SEM determined that the magnetite used as precursor has different particle sizes with a low aspect ratio. The composites SEM images showed that as the magnetite content increase within the polymeric matrix the particles are closer to each other. This proximity increased the particles interconnectivity being separated only by small gaps in the HDPE matrix affecting the composites electric and magnetic behavior.

Composites hysteresis curves, as a function of the applied field taken at different temperatures, showed how the saturation magnetization ( $M_s$ ), remanence magnetization ( $M_r$ ) were linearly dependent of the magnetite content within the HDPE matrix, due to the interaction between the particles magnetic properties, even though the  $M_r$  and  $M_s$  values in the hysteresis curves were also affected by the hematite phase in the samples. M10 and M20 samples which have the highest hematite content showed for all temperatures (50K, 120K and 300K) the  $M_s$  and  $M_r$  lowest values. The coercivity ( $H_c$ ) has an independent behavior of the samples magnetite content due to the particle size wide distribution and the magnetic moments random orientation. Regarding the temperature effect on the  $M_s$ ,  $M_r$ , and  $H_c$  values, these tend to decrease as the temperature increases, because of the magnetite spins thermal fluctuations, for instance ( $H_c 50 > H_c 120 > H_c 300$ ). The  $H_c$  fluctuations values is related to the magnetite Verwey transition ( $\approx 120\text{K}$ ), below this temperature the coercivity higher values are attributed to the magnetite discontinuous anisotropy change going from a symmetrical phase like the cubic structure to a less symmetrical phase as the monoclinic phase. The susceptibility curves ( $\chi$ ) as a function of the temperature showed small but positive values according to the ferrimagnetic materials behavior. The magnetic susceptibility is higher at 125K approximately and it is attributed to the magnetite Verwey transition. Like the saturation magnetization,  $\chi$  is linearly dependent of the magnetite content within the HDPE matrix. The composites susceptibility drops at low temperatures before reaching its maximum values and it's related to the magnetic domains decrease due to the monoclinic magnetite structure at these temperatures. At the highest point of the susceptibility curve near to the magnetite  $T_v$ , all the spins that might be aligned parallel to the external applied field were already aligned (blocking temperature). After reaching the susceptibility maximum value and before the magnetite Curie temperature,  $\chi$  depends on the spontaneous magnetization and the magnetic anisotropy, both of the decreases as the temperature increase.

The composites electrical characterizations by electrical polarization and volume resistivity measurements showed the composite insulating-conductive transition as the magnetite content increases. The P-E curves evidenced the change the composite had from being an ideal dielectric material (pure HDPE sample) to be a resistor (M40 sample), Meanwhile, the volume resistivity measurements showed a drop of up to eight orders of magnitude from the pure HDPE sample to the M40 sample. The composites electrical properties may be affected by factors such as the wide particle size distribution and the interconnectivity among them. The low dispersion of particles in the magnetite filled HDPE samples between 0% vol. and 20% vol. can be the reason for its high resistivity.

The development of this work confirmed that it is possible to produce a composite material with technological perspectives using abundant and mineral raw materials

from Colombia which normally are not used for local technical applications. The versatility of the developed composite is such that its own electrical and magnetic properties can fluctuate according to the filler ratio within the polymeric matrix. Thereby, this composite could be used for manufacturing devices where the polymers mechanical properties are required along with variable magnetic and electric characteristics. Materials with these particular specifications are used for transducers, biomedical or electromagnetic shielding devices production.

### Acknowledgments

The research presented herein is made possible by the collaboration of the physic group of new materials (GFNM) subscribed to the National University of Colombia.

---

### Información suplementaria

---

**Figure 1S.** %Wt magnetite and hematite phases variation according to the volume ratio in the composite. Vea la figura 1S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1991>

**Figure 2S.** SEM images of powdered magnetite: a) 1500x b) 3200x c) 5000x. Vea la figura 2S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1990>

**Figure 3S.** Magnetic moment as a function of the temperature for each sample: a) M10, b) M20, c) M30, d) M35, e) M40 and f) 100% Magnetite. FC (Field cooling); ZFC (zero field cooling). Vea la figura 3S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1992>

**Figure 4S.** Samples maximum magnetic moments as function of the temperature. Vea la figura 4S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1993>

**Figure 5S.** Samples magnetization curves as a function of the temperature. Vea la figura 5S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1994>

**Figure 6S.** Susceptibility as a function of the temperature for each sample. Vea la figura 6S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1995>

**Figure 7S.** Samples maximum susceptibility as a function of the temperature. Vea la figura 7S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/422/1996>

---

### Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

### References

**Boettcher, C J F.** (1952). *Theory of electric polarization*. Amsterdam: Elsevier.

**Bohra M., Prasad S, Venketaramani N, Kumar N, Sahoo S C, Krishnan R.** (2009). Magnetic properties of magnetite thin films close to the Verwey transition. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. **321** (22): 3738-3741.

**Bruggeman, D A G.** (1935). Berechnung verschieddener physikalischer konstanten von heterogenen Substanzen. *Ann Phys*. **24**: 636-664.

**Buschow, K H J.** (2014). *Handbook of Magnetic Materials*. North Holland: Elsevier B.V.

**Carporzen L, Gilder S A, Hart R J.** (2006). Origin and implications of two Verwey transitions in the basement rocks of the Vredefort meteorite crater, South Africa. *Earth and Planetary Science Letters*. **251** (3-4): 305-317.

**Costa A L, Ballarin B, Spegni A, Casoli F, Gardini D.** (2012). Synthesis of nanostructured magnetic photocatalyst by colloidal approach and spray-drying technique. *Journal of colloid and interface science*. **388** (1): 31-39.

**Demir A, Baykal A, Sözeri H, Topkaya R.** (2014). Low temperature magnetic investigation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles filled into multiwalled carbon nanotubes. *Synthetic Metals*. **187**: 75-80.

**Donescu D, Raditoiu V, Spataru C I, Somoghi R, Ghiurea M, Radovici C, Fierascu R C, Schinteie G, Leca A, Kuncser V.** (2012). Superparamagnetic magnetite-divinylbenzene-maleic anhydride copolymer nanocomposites obtained by dispersion polymerization. *European Polymer Journal*. **48** (10): 1709-1716.

**Gu L, He X, Wu Z.** (2014). Mesoporous Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/hydroxyapatite composite for targeted drug delivery. *Materials Research Bulletin*. **59**: 65-68.

**Guo Z., Park S, Hahn H T, Wei S, Moldovan M, Karki A B, Young, D P.** (2007). Magnetic and electromagnetic evaluation of the magnetic nanoparticle filled polyurethane nanocomposites. *Journal of applied physics*. **101** (9): 09M511.

**Hamoudeh M, Faraj A A, Canet-Soulas E, Bessueille F, Léonard D, Fessi H.** (2007). Elaboration of PLLA-based superparamagnetic nanoparticles: Characterization, magnetic behaviour study and in vitro relaxivity evaluation. *International Journal of Pharmaceutics*. **338** (1-2): 248-257.

**Harris L A, Goff J D, Carmichael, A Y, Riffle J S, Harburn J J, St. Pierre T G, Saunders M.** (2003). Magnetite Nanoparticle Dispersions Stabilized with Triblock. Copolymers. *Chemistry of Materials*. **15** (6): 1367-1377.

**Harrison R J, Putnis A.** (1996). Magnetic properties of the magnetite-spinel solid solution: Curie temperatures, magnetic susceptibilities, and cation ordering. *American Mineralogist*. **81** (3-4): 375-384.

**Jackson M, Bowles J, Banerjee S.** (2011). The magnetite Verwey transition (Part A). *The IRM Quarterly*. **20** (4): 7-10.

**Kong I, Hj Ahmad S, Hj Abdullah M, Hui D, Nazlim Yusoff A, Puryanti D.** (2010). Magnetic and microwave absorbing properties of magnetite-thermoplastic natural rubber nanocomposites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. **322** (21): 3401-3409.

**Kong I, Ahmad S H, Abdullah M H, Yusoff, A N.** (2009). The effect of temperature on magnetic behavior of magnetite nanoparticles and its nanocomposites. *In AIP Conf Proc*. **1136**: 830-834.

**Makled M H, Matsui T, Tsuda H, Mabuchi H, El-Mansy M K, Morii, K.** (2005). Magnetic and dynamic mechanical properties of barium ferrite-natural rubber composites. *Journal of Materials Processing Technology*. **160** (2): 229-233.

**Mansilla M V, Zysler R, Fiorani D, Suber L.** (2002). Annealing effects on magnetic properties of acicular hematite nanoparticles. *Physica B: Condensed Matter*. **320** (1): 206-209.

**Matweb Material Property Data.** (November, 2014). Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE). Retrieved from Extruded.: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=482765fad3b443169ec28fb6f9606660>.

- Meseguer Dueñas J M, Gómez Tejedor J A, Olmos Sanchis J J, Quiles Hoyo J, Romero Colomer F.** (1995). *Problemas resueltos de electromagnetismo y semiconductores*. Universidad Politécnica de Valencia: Servicio de Publicaciones SPUPV-99.
- Mokhtar N, Abdullah M H, Ahmad S H.** (2012). Structural and Magnetic Properties of Type-M Barium Ferrite–Thermoplastic Natural Rubber Nanocomposites. *Sains Malaysiana*. **41** (9): 1125-1131.
- Mücke A, Raphael Cabral A.** (2005). Redox and nonredox reactions of magnetite and hematite in rocks. *Chemie der Erde – Geochemistry*. **65** (3): 271-278.
- Otake T, Wesolowski D J, Anovitz L M, Allard L F, Ohmoto H.** (2007). Experimental evidence for non-redox transformations between magnetite and hematite under  $\text{H}_2$ -rich hydrothermal conditions. *Earth and Planetary Science Letters*. **257** (1-2): 60-70.
- Panwar V, Sachdev V K, Mehra, R. M.** (2007). Insulator conductor transition in low-density polyethylene–graphite composites. *European Polymer Journal*. **43** (2): 573-585.
- Ramajo L A, Cristóbal A A, Botta P M, Porto López J M, Reboredo M M, Castro M S.** (2009). Dielectric and magnetic response of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **40** (4): 388-393.
- Razzaq M Y, Anhalt M, Frommann, Weidenfeller B.** (2007). Thermal, electrical and magnetic studies of magnetite filled polyurethane shape memory polymers. *Materials Science and Engineering A*. **444** (1-2): 227-235.
- Robinson P, Harrison R J, McEnroe S A, Hargraves, R B.** (2004). Nature and origin of lamellar magnetism in the hematite-ilmenite series. *American Mineralogist*. **89** (5-6): 725-747
- Rosales C, Perera R, Matos M, Poirier T, Héctor R, Palacios J, et al.** (2006). Influencia de la morfología sobre las propiedades mecánicas de nanocompuestos y mezclas de polímeros. *Revista Latinoamericana de Metalurgia Y Materiales*. **26** (1-2): 3-19.
- Salazar Mejía C, Landínez Téllez D A, Roa-Rojas J.** (2009). Caracterización Magnetoeléctrica del Nuevo Material de Tipo Perovskita  $\text{Sr}_2\text{TiMnO}_6$ . *Revista Colombiana de Física*. **4** (2): 317-319.
- Stewart S J, Borzi R A, Cabanillas E D, Punte G, Mercader R C.** (2003). Effects of milling-induced disorder on the lattice parameters and magnetic properties of hematite. *Journal of magnetism and magnetic materials*. **260** (3): 447-454.
- Stewart M, Cain M G.** (1999). Ferroelectric Hysteresis Measurement & Analysis. *NPL Report CMMT(A)*. **152**: 1-57.
- Tabiś W, Tarnawski Z, Kałol Z, Król G, Kolodziejczyk A, Kozłowski A, Honig J. M.** (2007). Magnetic and structural studies of magnetite at the Verwey transition. *Journal of alloys and compounds*. **442** (1): 203-205.
- Tadić M, Čitaković N, Panjan M, Stojanović Z, Marković D, Spasojević, V.** (2011). Synthesis, morphology, microstructure and magnetic properties of hematite submicron particles. *Journal of Alloys and Compounds*. **509** (28): 7639-7644.
- Thapa D, Palkar V R, Kurup M B, Malik S K.** (2004). Properties of magnetite nanoparticles synthesized through a novel chemical route. *Materials Letters*. **58** (21): 2692-2694.
- Weidenfeller B, Höfer M, Schilling F.** (2002). Thermal and electrical properties of magnetite filled polymers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. **33** (8): 1041-1053.
- Zhang J, Rana S, Srivastava R S, Misra, R D K.** (2008). On the chemical synthesis and drug delivery response of folate receptor-activated, polyethylene glycol-functionalized magnetite nanoparticles. *Acta Biomaterialia*. **4** (1): 40-48.
- Zhang Z, Church N, Lappe S C, Reinecker M, Fuith A, Saines, P J, Carpenter, M A.** (2001). Elastic and anelastic anomalies associated with the antiferromagnetic ordering transition in wüstite,  $\text{FeO}$ . *Journal of Physics: Condensed Matter*. **24** (21): 215-404.
- Zhao H, Saatchi K, Häfeli U O.** (2009). Preparation of biodegradable magnetic microspheres with poly(lactic acid)-coated magnetite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. **321** (10): 1356-1363.
- Zheng X, Zhou S, Xiao Y, Yu X, Li X, Wu P.** (2009). Shape memory effect of poly(d,l-lactide)/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanocomposites by inductive heating of magnetite particles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. **71** (1): 67-72.
- Zysler R D, Vasquez-Mansilla M, Arciprete C, Dimitrijewits M, Rodriguez-Sierra D, Saragovi C.** (2001). Structure and magnetic properties of thermally treated nano-hematite. *Journal of magnetism and magnetic materials*. **224** (1): 39-48.

## Properties of the HPHT diamond when used as a soft X-Ray detector

Rodrigo Meléndrez-Amavizca<sup>1</sup>, Mercedes Díaz-Lagos<sup>2</sup>, Segundo Agustín Martínez-Ovalle<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Investigación en Física, Academia de Física de Radiaciones, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México

<sup>2</sup>Grupo de Ingeniería Geológica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Colombia

### Abstract

The diamond has extraordinary physical and chemical properties. This material by having a  $Z_{\text{eff}}$  (atomic number-cash) equivalent to the human tissue is converted into a material suitable for use as a dosimeter of radiation. In this work, the properties of response to Afterglow (AG), Thermoluminescence (TL) and Optically Stimulated Luminescence (OSL) in HPHT diamond type lb (high temperature and high pressure diamond) are studied when subjected to lightning X (0.75 mA, 35 kV). The properties dosimetric curve and the TL were obtained on a computer Riso TL/OSL, where studies of fading (fading thermoluminescent), show that after a time of 1 hour, it stabilizes the signal TL and the reproducibility presents an error signal is not greater 5%. It is linearity in the three techniques for absorbed dose between 0-2 Gy. Between 2-9 Gy can be considered a response supralineal for the three techniques used and obtained a saturation of the sample to the absorbed doses increased to 9 Gy. It is showed that this material presents a promising future as a dosimeter in clinical radiation beams soft, used especially for radiation dosimetry for clinical use. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Properties dosimetric; Characteristics of the TL and OSL; Diamond; High pressure; High temperature.

### Propiedades del diamante HPHT cuando es usado como detector de rayos x de baja intensidad

#### Resumen

El diamante posee extraordinarias propiedades físicas y químicas, y se ha propuesto para ser utilizado como dosímetro de radiación por tener un  $Z_{\text{eff}}$  equivalente al tejido humano. En este trabajo, se estudian las propiedades de respuesta al Afterglow (AG), la termoluminiscencia (TL) y la luminiscencia ópticamente estimulada (OSL) en materiales diamante HPHT tipo lb, cuando son sometidos a Rayos X suaves (0,75 mA, 35 kV). Las propiedades dosimétricas y la curva TL fueron obtenidas en un equipo Riso TL/OSL, donde los estudios de fading, muestran que luego de 1 hora se estabiliza la señal de TL, la reproducibilidad presenta un error en señal no mayor 5%. Se encuentra linealidad en las tres técnicas para dosis absorbida entre 0-2 Gy, entre 2-9 Gy puede considerarse una respuesta supralineal para las tres técnicas obteniendo una saturación de la muestra a dosis absorbidas mayores de 9 Gy. Se demuestra que este material presenta un futuro prometedor como dosímetro clínico para haces de radiación suaves, usados particularmente para dosimetría de radiaciones de uso clínico. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Propiedades dosimétricas; Características TL y OSL; Diamante; Alta Presión; Alta temperatura.

### Introduction

Currently, a good number of new techniques for the treatment of cancer, such as intensity-modulated radiation therapy, radiotherapy, helical, radiosurgery, radiotherapy, stereotactic, RapidArc and other, giving rise to deposit a high radiation dose in small fields Taylor, *et al.*, 2011. This type of treatment requires an in vivo dosimetry in real time (IV/TR). Currently, among the available technologies for dosimetry IV/TR, we can mention the ionization chamber diodes and detectors diamond, but the cameras are not used for dosimetry in-vivo due to its fragility, its large size and

the need for electrical connections with high voltage. Diodes are used frequently for dosimetry IV/TR, but its answer presents fluctuations with temperature and accumulated dose. In addition, as its response is not equivalent to the soft tissue is necessary restricts them to increase the size of the device, so that its use in certain types of dosimetry, where you have rather small fields is not desirable Spasic, *et al.*, 2011; Morin, *et al.*, 2013.

#### \*Corresponding autor:

Segundo Agustín Martínez-Ovalle, [s.agustin.martinez@uptc.edu.co](mailto:s.agustin.martinez@uptc.edu.co)

Received: February 22, 2017

Accepted: June 05, 2017

A large number of materials with features luminescent have been studied recently **Santiago, et al.**, 2011; **Molina, et al.**, 2012; **Guarneros, et al.**, 2013; **Marcazzo, et al.**, 2015, with new techniques. Most of these materials tend to exhibit a sub-or over-response compared with the absorbed dose deposited in tissue, because these materials are not tissue-equivalent (Te) ( $Z_{\text{eff}} \approx 7.4$ ). This aspect, entails that such composite materials behave in front of the radiation of a variety of ways to interact with the treated tissue, making it difficult for direct application in radiation therapy, a procedure widely used today for the treatment of cancer, if not the most common, and of special interest in the application of these devices. Recently, the synthetic diamond grown by the technique of high-pressure and high-temperature (HPHT) has been proposed as a detector of ionizing radiation **Low, et al.**, 2011; **Meléndrez, et al.**, 2006; **Chernov, et al.**, 2013; **Gil et al.**, 2014; **Gil et al.**, 2015. The importance of this material lies in its physical and chemical properties, as it has a  $Z_{\text{eff}}=6$  (atomic number-cash) equivalent to the human tissue, this is a relevant feature in a dosimeter for radiation therapy. In addition, this material is not toxic and it is hard to radiation, provides a high spatial resolution and presents a dependency with the dose rate. By these features, it is considered as a dosimeter with great perspective, the reason for which is studied in this work.

The dosimetric properties and characteristics of the brightness curve of the HPHT diamond are studied by the techniques of thermoluminescence (TL) and optically stimulated luminescence (OSL). The TL that exhibits the diamond was reported initially by the chemist Sir Robert Boyle in 1663, the closer a diamond is to the body and to observe the emission of light with their own eyes in the dark **Chen & Kirsh**, 1981. The brightness curve of the TL was studied with models of energy bands for the luminescence in solid materials, with which it is observed the efficiency and the activation energies of traps present in the material due to impurities in its crystal lattice, generated by the rupture in the periodicity of the crystal structure and makes it possible for electrons to possess energies which are forbidden in the perfect crystal **Furetta**, 2013; **Mckeever**, 1985; **Oberhofer & Scharmann**, 1993. On the other hand, the OSL is done in this work to observe the advantages of using optical stimulation in comparison with the thermal stimulation. The main advantage of OSL over TL is that measurements can be performed in situ and in vivo and in real time **Yukihara & Shephen**, 2011.

In this work the TL and OSL curves obtained in the Riso TL / OSL model DA-20 are studied, with the previous exposure of the HPHT type Ib synthetic diamond to ionizing radiation with a "soft" X-ray tube with photons of 35 KeV at a dose rate of  $0.624 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ . The results obtained in this work have a very high chance to be applied in dosimetry in situ, in vivo and in real time, applying the technique of OSL, for their potential applications in medical diagnostics with ionizing radiation such as radiotherapy **Meléndrez, et al.**, 2006; **Bos**, 2007.

## Materials and methods

The synthetic HPHT type Ib (Sumicrystal, UP-3510) was purchased from ProDiamond, Germany. This diamond is a single crystal with dimensions of  $3.5 \cdot 3.5 \cdot 1 \text{ mm}^3$ , which is performed by a heat treatment of  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  for one hour in an atmosphere of Nitrogen. The synthesis technique of HPHT diamond is based on the growth of films from graphite, which are obtained by applying a hydrostatic pressure of hundreds of kbar at a temperature of the order of  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$  on graphite substrate controlling the time (these parameters will define the thickness of the film). The Diamond type Ib contains N atoms substitutionales isolated, with concentrations of about 40-400 ppm of N, where the 80% is in dispersed form and 20% in the form of aggregates of the same. In natural diamond, the concentration of N atoms scattered can be around  $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , whereas the synthetic diamond is of the order of  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

The curves of emission of the afterglow (AG), TL and OSL, were obtained on a computer Riso TL/OSL model DA-20 with a source of radiation of soft-X-ray with maximum power of 1 mA, 50 kV and 50 W. The voltage can be varied from 4-50 kV. When operating at maximum power, delivers a dose rate of  $2 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$  and when operated at its minimum power (0.25 mA, 10 kV) is supplied to a dose rate of  $10 \text{ mGy} \cdot \text{s}^{-1}$  **Bøtter-Jensen**, 2008.

With the previous exposure of synthetic HPHT type Ib diamond to ionizing radiation using the "soft" X-ray tube, the irradiations were performed from an absorbed dose of 0.624 Gy to an absorbed dose of 18.72 Gy. First, it records the signal AG which is obtained at an exposure time of 300 s. The signal TL is recorded from room temperature up to  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ . The next step is to get the signal OSL using a filter BG-39 from the stimulation of diode laser infrared (870 nm) in a time of 60 s. In the TL curves, measurements of the activation energies of the maximum temperature peaks, the thermoluminescent fading or fading and the reproducibility of the HPHT type Ib diamond were also performed.

The irradiations were performed in sequences of 0.624 to 18.72 Gy. Once the first irradiation was completed of the sample it is read TL from room temperature to  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  at a heating rate of  $5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ . Then the sample is subjected to cooling with a flow of nitrogen until they reach again the room temperature. Subsequently are available the sample to move to a different dose and is carried out the same procedure of reading to the dose prescribed.

To observe characteristics in the material due to charge carriers that can recombine at room temperature, it was performed after the irradiation, the measurement of the emission of light, called AFTERGLOW (AG), this emission of light is obtained by the photomultiplier tube at room temperature for 5 minutes). Again, a reading is taken TL in order to observe the recombination that occurred at room temperature, and to detect the light emission immediately after the irradiation. Then, it is performed the cooling for 1 minute and again irradiates the sample at the same dose to

get the measure of the signal AG and subsequently obtain the signal of the OSL with the LED's of the infrared. The signal is observed in the photomultiplier tube for 1 minute and performs the reading TL to get the fading of TL in the two methods mentioned, as described in figure 1.

**Results and discussion**

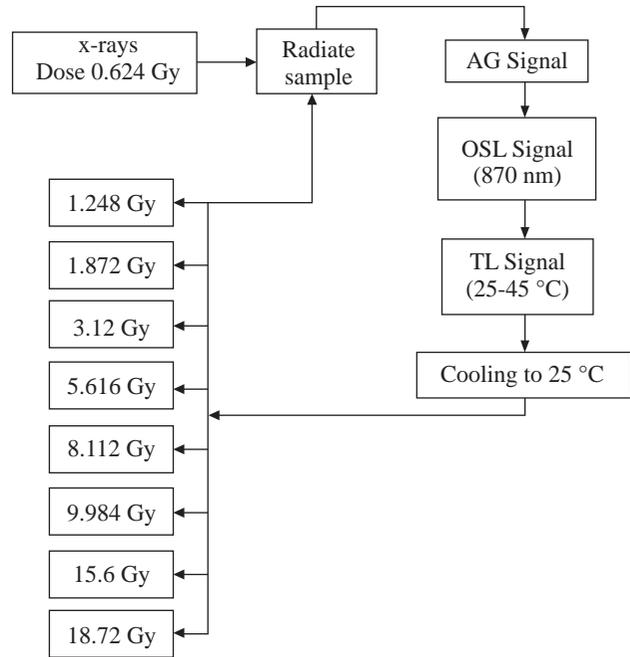
In TL, exposure of the HPHT diamond to a source of radiation at room temperature ( $T_0$ ) is required followed by a caloric stimulus at a temperature  $T > T_0$ , to obtain the brightness curve (Emission intensity as a function of temperature) that is shown in figure 2.

The curve exhibits three broad peaks of the TL located at  $T \approx 77^\circ\text{C}$  and  $T \approx 337^\circ\text{C}$ , each one of them can be the result of the superposition of at least two peaks of TL, and the intensity for each peak is related to the number of charge carriers trapped and the number of defects that owns the material. It is also observed that with the increase of the applied dose, at doses  $> 9.984$  Gy, reached a maximum in intensity of the peaks TL, which may be associated to the saturation of the sample.

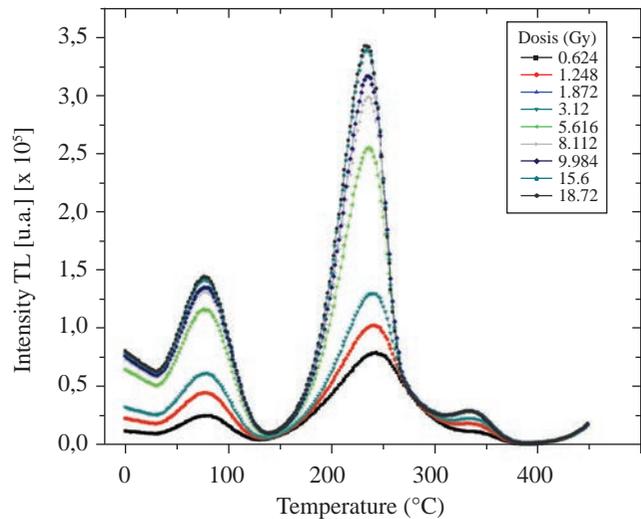
For the analysis of each one of the peaks of TL of figure 2, it was performed the analysis using these different techniques (TL, OSL, AG). For the luminescence emitted directly after the radiation, called a AG, it is found that the sample presents centers of recombination at room temperature that are related with the first peak of TL is located at  $T \approx 77^\circ\text{C}$ .

To perform the experiments of OSL, it is observed  $T \approx 239^\circ\text{C}$ , is recombined by using the photo-stimulation with diode laser infrared (870 nm). The OSL manages to recombine all carriers of charge, but fails to recombine charge carriers to the third peak of the TL located at  $T \approx 337^\circ\text{C}$ , it was concluded then, that the peak of TL to  $T_0$  and  $T \approx 77^\circ\text{C}$  are associated, to a great extent to the signal from the AG and the peak width of the TL located at  $T \approx 239^\circ\text{C}$ , is the one that contributes mainly in the emission of the OSL, leaving only the peak TL high temperature  $T \approx 337^\circ\text{C}$ , after the process of 300 s of the AG and 60 s of the OSL, as shown in figure 3.

A comparison of the three techniques (TL, OSL and AG) used in this work are also shown in figure 3 and indicates the type of technique that must be used for each type of TL. The signal TL (black curve) corresponds to the irradiation with an absorbed dose of 0.624 Gy, subsequently observes the signal TL\_AG (red curve) after you take the reading needle, where it can be observed the band between 30-60 °C is evicted, or faded by the recombination of charge carriers at  $T_0$  for 300 s. third signal TL-AG/OSL (green curve) post-to the AG and OSL, it can be seen that with the techniques of AG and OSL is achieved evict or to recombine most of the traps electrons close to the conduction band with the holes in the band of valence. Of these features it is inferred that these two techniques will allow the dosimetry, in-situ and invivo as reference in **Yukihara & Stephen, 2011**.

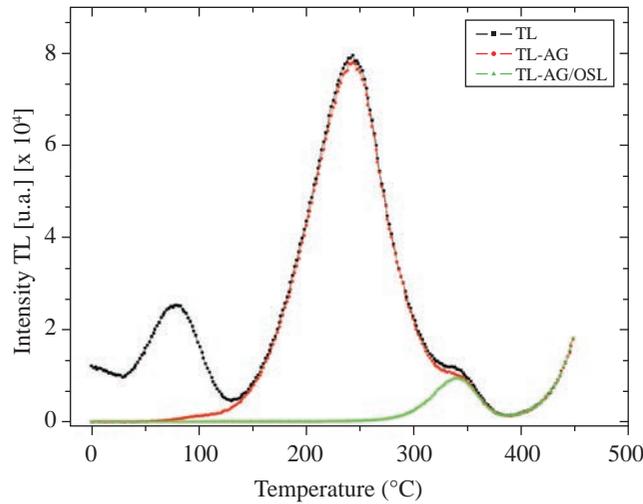


**Figure 1.** Diagram of the experimental procedure for obtaining the curves of AG, OSL and TL.

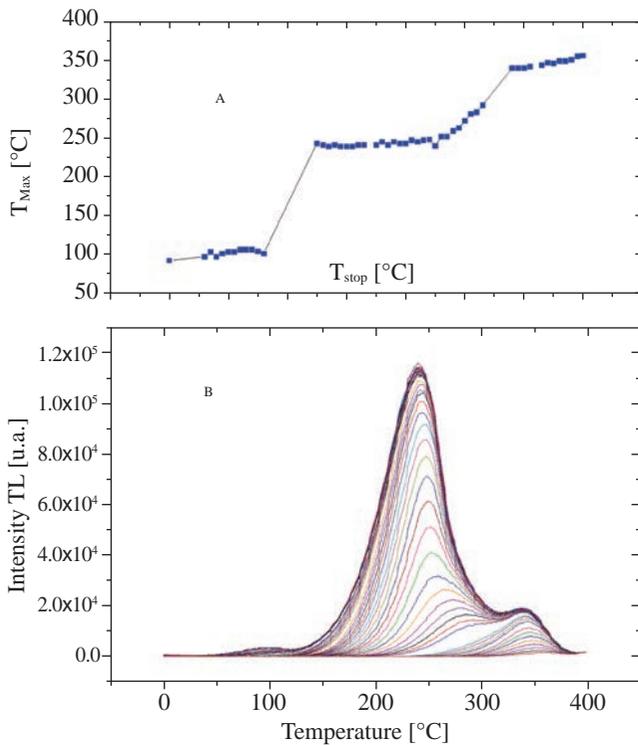


**Figure 2.** Curves of brightness of TL by irradiating with X-rays immediately after irradiation.

The McKeever method is widely used to determine with greater precision the number of traps present in the material dosimetry, the position of its peak in the brightness curve TL, as the energy of activation ( $E$ ) and frequency factor ( $s$ ). For the analysis of the brightness curve is used this method **McKeever, 1985**. Figure 4A shows the graph of maximum Temperature ( $T_{max}$ ) in function of the end Temperature ( $T_{stop}$ ). In this figure, it is observing three peaks of the TL that are to be analyzed and located to temperatures of 103, 243 and 340 °C, respectively, and correspond to a first order



**Figure 3.** Comparison of the techniques TL immediately after irradiation and subsequently to the AG and TL, at a dose of 0.624 Gy.



**Figure 4.** Analysis of the TL brightness curve by the McKeever method after irradiation with X-rays at a dose of 1.872 Gy.

kinetics, that is to say, that the electrons released by stimulus heat transfer from the trap to the conduction band, and these subsequently recombine immediately with a hole by emitting a photon. Therefore, the re-entrapment of the charge carriers is negligible during the heating process of the sample of diamond for these three peaks. In figure 4B, the curve TL can be associated to four peaks with different energies of activation and frequency factor whose values are reported

in Table 1. In addition, it was observed that in the region between 250-290 °C appears another peak of TL which may be related to defects in the sample.

After analyzing and exposing the TL properties of the HPHT type Ib diamond when subjected to X-rays, the dosimetric properties of the diamond were studied. For this, their response to the dose for the AG, OSL and TL techniques was analyzed. Each of the curves was studied between the different ranges of absorbed dose to establish the ranges in which it can be considered linear, supralinear or infralinear if it exists.

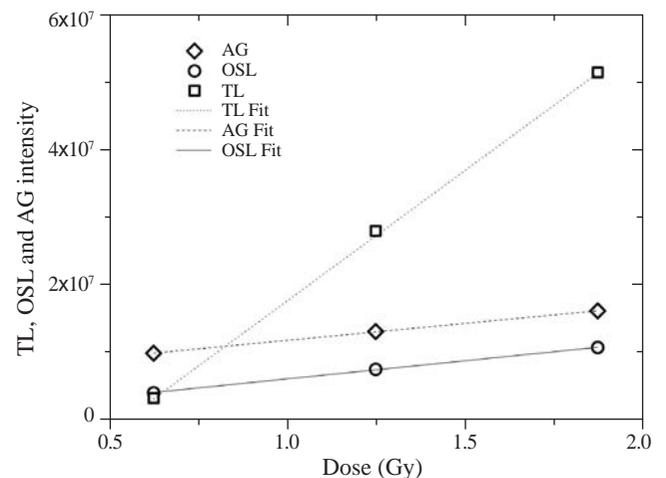
Figure 5 shows the dose range for which the diamond dosimeter can be considered linear. For this case, the values correspond respectively to a dose of up to  $\approx 2$  Gy and the values of the correlation factors are: AG = 0.99959, OSL = 0.99984 and TL = 0.99906.

Figure 6 shows the range of dose to which the dosimeter of diamond can be considered supralinear. In this case it is observed that can be considered supralinear up to  $\approx 9$  Gy. The values of the correlation factors correspond to: AG=0.99825, OSL=0.99273 and TL=0.99968.

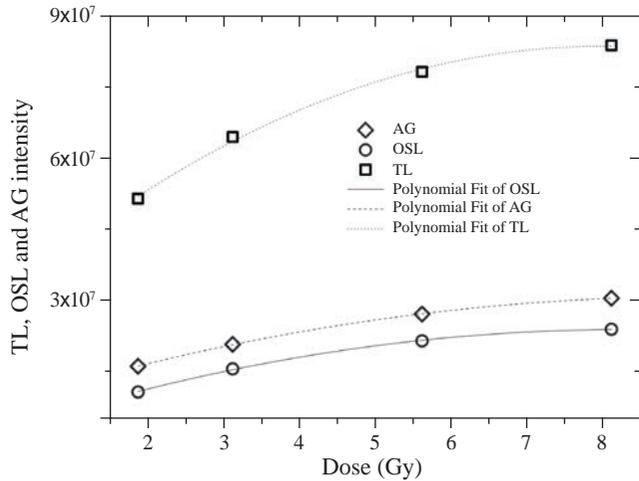
From the above results and observing figure 7, it can be concluded that the sample of HPHT diamond type Ib presents a dose range for which the answer is linear, another range for which the response is supralinear and presents a saturation level a absorbed dose greater than 9 Gy.

**Table 1.** Experimental determination of the activation energy factors and frequency factor of each trap for the HPHT diamond subjected to X-rays.

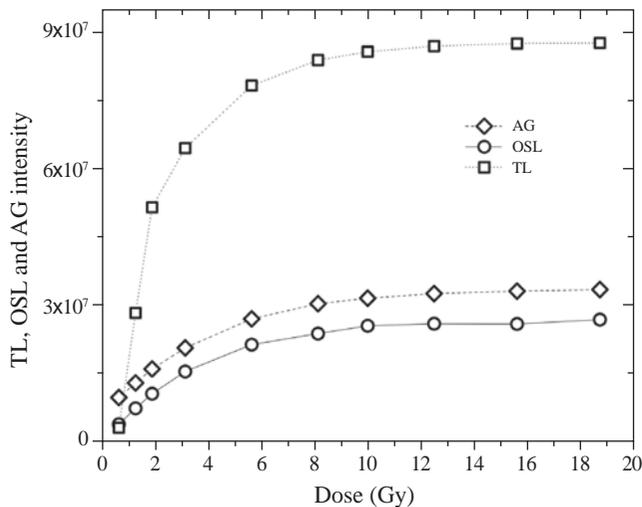
	Pk1	Pk2	Pk3	Pk4
E(ev)	0.623	0.792	1.476	1.883
T (K)	103	243	287	340
b	2	1.003	1.151	1.519
s(s <sup>-1</sup> )	$5.24 \cdot 10^7$	$1.23 \cdot 10^7$	$5.12 \cdot 10^{12}$	$1.17 \cdot 10^{15}$



**Figure 5.** Linear behavior of the HPHT type Ib diamond sample



**Figure 6.** Supralineal behavior of the HPHT type Ib diamond sample



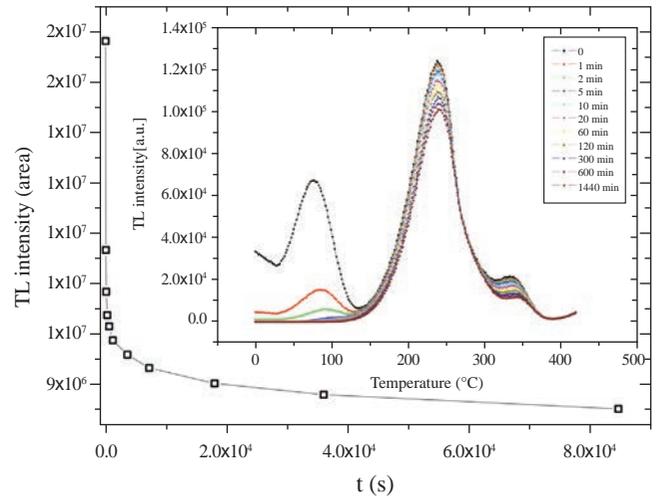
**Figure 7.** AG, TL and OSL dosimetry of the HPHT type Ib diamond as a function of the exposed dose of 0.624-18.72 Gy.

It was studied the fainting or fading of the signal TL post-radiation in a 24-hour period, which is shown in figure 8. During this time period, it was determined that in the first hour of the fading, the signal presents a loss of intensity of 60%. In the graphic inserted, it is noticed that this fall is associated to the peaks of ambient temperature and the peak located at 77 °C, after an hour the fading of the signal is only 1%.

Finally, the sample of diamond was subjected to ten continuous cycles of exposure to radiation and the electrical signals AG, OSL and TL at a dose of 1.87 Gy. This process is performed in order to ensure the reproducibility in the signal with a percentage error of 5%.

**Conclusion**

In dosimetry of clinical dosimeters used must comply with important features for the estimation of the absorbed dose, one of them is the accuracy, which is related to the uncertainty



**Figure 8.** Decay of the TL signal, for a waiting time of 24 hours.

of random associated to the measure and refers to the statistical method applied to a number of measures. The detector of Diamond is considered to be a detector of high precision and accuracy, this is contrasted with the reproducibility of the sample that presents a behavior in the signal characterized by a TL of (0.35%), a NEEDLE (4.25%) and a OSL (0.33%). These parameters obtained for the Diamond, it allowed to infer that this material in the future can be used as a dosimeter in clinical high accuracy.

The phenomenon of TL may be observed in many materials, however, only a few meet the requirements to be used in dosimetry clinic, with this work we show that for radiation beams of low energy, it is also an excellent material dosimetry.

It is observed that the sample presents a signal AG due to the peak of the TL located at room temperature and at 77 °C, which recombines at room temperature and decays in 300 s. These features are ideal in dosimetry.

The TL is composed of at least 3 peaks widths of TL located around 77, 239 and 337 °C, according to experiments obtained by the method of McKeever.

Studies of fading, after 1 hour have stability in the signal of TL, being the peak of 92 °C responsible for this decay.

It was determined that the HPHT diamond type Ib sample has values in a dose range where a linear response, supralineal and a saturation level at absorbed doses higher than 9 Gy appear.

**Conflicts of interest**

The authors declare that they have no conflict of interest.

**References**

Taylor, M. L., Kron, T., Franich, R. D. (2011). A contemporary review of stereotactic radiotherapy: Inherent dosimetric complexities and the potential for detriment. *Acta Oncologica*. 50 (4): 483-508.

- Spasic, E., Magne, S., Aubineau-Lanière, I., De Carlan, L., Malet, C., Ginestet, C., Ferdinand, P.** (2011, June). Intracavitary in vivo dosimetry based on multichannel fiber-coupled Radioluminescence and Optically Stimulated Luminescence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C. In *Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), 2011 2nd International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Morin, J., Béliveau-Nadeau, D., Chung, E., Seuntjens, J., Thériault, D., Archambault, L., Beaulieu, L.** (2013). A comparative study of small field total scatter factors and dose profiles using plastic scintillation detectors and other stereotactic dosimeters: the case of the CyberKnife. *Medical Physics*, **40** (1).
- Santiago, M., Marcazzó, J., Grasselli, C., Lavat, A., Molina, P., Spano, F., Caselli, E.** (2011). Thermo- and radioluminescence of undoped and Dy-doped strontium borates prepared by sol-gel method. *Radiation Measurements*, **46** (12): 1488-1491.
- Molina, P., Santiago, M., Marcazzó, J., Spano, F., Henniger, J., Cravero, W., Caselli, E.** (2012). Radioluminescence of red-emitting Eu-doped phosphors for fiberoptic dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes*, **71**: 12-14.
- Guarneros-Aguilar, C., Cruz-Zaragoza, E., Marcazzó, J., Palomino-Merino, R., Espinosa, J. E.** (2013, July). Synthesis and TL characterization of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> doped with copper and manganese. In C. Vázquez-López, G. Espinosa-García, & J. I. Golzarri (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. **1544**, No. 1, pp. 70-77). AIP.
- Marcazzó, J., Camargo, L., Khaidukov, N. M., Santiago, M.** (2015). Study of optically stimulated luminescence of Tb<sup>3+</sup>/Sm<sup>3+</sup> doubly doped K<sub>2</sub>YF<sub>5</sub> single crystals. *Journal of Luminescence*, **164**: 112-115.
- Low, D. A., Moran, J. M., Dempsey, J. F., Dong, L., Oldham, M.** (2011). Dosimetry tools and techniques for IMRT. *Medical Physics*, **38** (3): 1313-1338.
- Meléndrez, R., Schreck, M., Chernov, V., Preciado-Flores, S., Pedroza-Montero, M., Barboza-Flores, M.** (2006). Afterglow, TL and IRSL in beta-irradiated HPHT type Ib synthetic diamond. *Physica Status Solidi (a)*, **203** (12): 3167-3172.
- Chernov, V., Meléndrez, R., Gastélum, S., Pedroza-Montero, M., Piters, T., Preciado-Flores, S., Barboza-Flores, M.** (2013). Afterglow and thermoluminescence properties in HPHT diamond crystals under beta irradiation. *Physica Status Solidi (a)*, **210** (10): 2088-2094.
- Gil-Tolano, M. I., Meléndrez, R., Lancheros-Olmos, J. C., Castaneda, B., Soto-Puebla, D., Chernov, V., Pedroza-Montero, M., Barboza-Flores, M.** (2014). AG, TL, and IRSL dosimetric properties in X-ray irradiated HPHT diamond crystals. *Physica Status Solidi (a)*, **211** (10): 2359-2362.
- Gil-Tolano, M. I., Meléndrez, R., Lancheros-Olmos, J. C., Castaneda, B., Soto-Puebla, D., Chernov, V., Pedroza-Montero, M., Barboza-Flores, M.** (2015). Thermoluminescence studies on HPHT diamond crystals exposed to β-irradiation. *Physica Status Solidi (a)*, **212** (11): 2507-2511.
- Chen, R., Kirsh, Y.** (2013). *The analysis of thermally stimulated processes*. Elsevier.
- Furetta, C.** (2010). *Handbook of thermoluminescence*. World Scientific.
- McKeever, S. W.** (1988). *Thermoluminescence of solids* (Vol. 3). Cambridge University Press.
- Oberhofer, M., Scharmann, A.** (Eds.). (1993). *Techniques and management of personnel thermoluminescence dosimetry services* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Yukihara, E. G., McKeever, S. W.** (2011). *Optically stimulated luminescence: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Bos, A. J. J.** (2006). *Theory of thermoluminescence*. *Radiation Measurements*, **41**: S45-S56.
- [19] **Bøtter-Jensen, L.** (2008). *Guide to the Riso TL/OSL Reader*. Riso National Laboratory, Denmark.

# La interdisciplinariedad en la ciencia del rayo

Horacio Torres-Sánchez

Profesor Emérito Universidad Nacional de Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro de número a la  
Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 26 de julio de 2017

## Resumen

Este artículo sobre la investigación del fenómeno del rayo ha sido elaborado para la posesión como Miembro de Número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. El fenómeno natural ha sido investigado sistemáticamente en Colombia desde hace aproximadamente cuatro décadas motivado por la curiosidad científica para comprender la alta mortalidad de sistemas, equipos y de personas. Con base en el desarrollo de una hipótesis de investigación se fueron confrontando sus resultados con la realidad concreta, mediante el método científico inductivo y la categoría conceptual de un trabajo interdisciplinario con vínculos dialecticos y la intersección e integración de saberes como la física, las matemáticas, la química, la biología, la historia, la literatura y la psicología social. Con los resultados de investigación se ha logrado aportar nuevo conocimiento del fenómeno en el concierto mundial con libros, artículos científicos, patentes, innovaciones tecnológicas para aplicaciones en protección contra rayos, normas y reglamentos técnicos y apropiación social de la ciencia. Este artículo presenta los logros científicos y tecnológicos realizados en Colombia en el campo de las descargas eléctricas atmosféricas, y propone, basado en las condiciones específicas intertropicales, los focos de investigación de interés para el país en el futuro. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Rayos; Interdisciplinariedad; Método científico inductivo.

## The interdisciplinarity of lightning

### Abstract

This paper on the research of the lightning phenomenon has been elaborated for the author's possession as a Member of Number of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences. This phenomenon has been systematically investigated in Colombia in the last four decades or so, motivated by the scientific curiosity to understand the high incidence of damage to systems and equipment, as well as mortality of people. Based on the development of a research hypothesis, the results were compared with concrete reality by using the scientific inductive method and the interdisciplinary work with dialectical links and the intersection and integration of knowledge from Physics, Mathematics, Chemistry, Biology, History, Literature and Social Psychology. The results have contributed with new knowledge in the world concert with research books, papers, patents and technological innovations for applications in lightning protection, technical standards, technical regulations and social appropriation of the science. This article presents the scientific and technological achievements made in Colombia in the field of atmospheric electric discharges, and proposes, based on specific intertropical conditions, the research focus of interest to the country in the future. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Lightning, science; Interdisciplinary; Inductive scientific method.

## Introducción

El fenómeno del rayo ha sido investigado sistemáticamente en Colombia desde hace aproximadamente cuatro décadas con la creación de un grupo de investigación, motivado por la curiosidad científica del fenómeno, para comprender la alta mortalidad de sistemas, equipos y de personas y con el objetivo de llevar a cabo un proceso de apropiación, construcción y creación autónoma de conocimiento.

El propósito fue avanzar tanto en el conocimiento como en la solución a la problemática de los rayos, lo cual

ha generado innovaciones tecnológicas, reconocimientos, valiosos resultados visibles y comunicables que han sido susceptibles de contrastación académica internacional y de validez social. Consecuentemente, sus productos se han proyectado positivamente hacia la productividad y competitividad del país.

### Correspondencia:

Horacio Torres-Sánchez, [htorress@unal.edu.co](mailto:htorress@unal.edu.co)

**Recibido:** 04 de mayo de 2017

**Aceptado:** 14 de junio de 2017

Tras una primera etapa de mediciones, análisis y clasificación se logró postular una hipótesis para lograr una comprensión científica amplia y profunda del origen, características y variaciones del fenómeno del rayo.

Con base en el desarrollo de la hipótesis planteada se fueron confrontando sus resultados con la realidad concreta. Sin perder de vista que en el método científico no existen verdades absolutas, sino certezas temporales y los resultados tienen que ajustarse continuamente, pues el fenómeno del rayo, al igual que todos los fenómenos de la naturaleza, se encuentra en permanente cambio (Torres, 2015).

En el proceso realizado de ir de lo particular a lo general y luego regresar a lo particular se trabajó, fundamentalmente, el método inductivo, científicamente aceptado por la comunidad académica internacional. Una forma de llevar a cabo el método inductivo fue proponer, mediante diversas observaciones de los sucesos, una conclusión que resultara general para todos los eventos de la misma clase.

### La interdisciplinariedad

La categoría conceptual del trabajo interdisciplinario, entendida como una forma de conocimiento aplicado que se produce en la intersección de los saberes ha sido una percepción más amplia de comprender y abordar el fenómeno del rayo.

En el proceso de investigación científica se hizo necesario acudir al aporte de disciplinas diferentes a la física y las matemáticas, que no habían sido consideradas inicialmente en el análisis del fenómeno, para comprenderlo y abordarlo de una forma integral más objetiva: con los aportes de la química para comprender los beneficios del rayo en la producción de ozono y el proceso de fijación química que el rayo ejerce para la combinación del nitrógeno con oxígeno o hidrógeno; la biología para comprender los efectos del rayo en el cuerpo humano; la historia y la literatura para comprender las explicaciones del fenómeno a través de otros lenguajes como el mítico, el literario y el religioso que permiten ver la evolución y los avances en el entendimiento del fenómeno a través de las diferentes culturas y la psicología social para comprender el comportamiento de los seres humanos en grupo en la prevención de los efectos negativos del rayo.

En la medida en que se continúe profundizando en el conocimiento del fenómeno se necesitará de otras disciplinas con la exitosa metodología lograda.

Para realizar la labor interdisciplinaria no se precisó que todos los académicos asesores estuvieran en el mismo grupo de investigación, sino que participaron activamente con una visión distinta desde su saber, logrando integrar su conocimiento con el conocimiento nuestro alrededor del fenómeno del rayo para solucionar problemáticas particulares.

Se tuvieron claros los límites del saber de cada uno y se respetaron los campos de conocimiento, conociendo lo propio, precisado no sólo por lo que se sabía sino por lo que se ignoraba.

### Planteamiento de la hipótesis de investigación

La hipótesis de investigación sobre la variación espacial y temporal en los parámetros del rayo ha estado siempre presente en todos los proyectos académicos y en las tesis de pregrado, maestría y doctorado que se han realizado y dirigido en el grupo Programa de Investigación en Adquisición y Análisis de Señales - PAAS, del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia. Una de las líneas de investigación del Programa PAAS ha sido el de las “Descargas eléctricas atmosféricas en zona tropical” y fue presentada en el trabajo de promoción a Profesor titular (Torres, 1998) en la Universidad Nacional de Colombia y posteriormente en el libro *El Rayo* (Torres, 2002).

La hipótesis se fundamentó en los principios científicos planteados por el físico inglés Wilson (1920) y Whipple (1929), sobre el circuito eléctrico global y la contribución dominante, por una superposición de efectos, de las tres mayores zonas de convección profunda tropical del planeta: Sur América tropical, centro de África y el continente marítimo (Sur este de Asia y Australia).

Si bien las zonas de convección profunda tropical fueron identificadas al principio del siglo XX como de alta actividad eléctrica atmosférica, en el mundo la mayoría de la información disponible sobre las características y magnitudes de los rayos estaban basadas en estudios llevados a cabo en zonas semitropicales o templadas, zonas con clima caracterizado por cambios bien definidos en las estaciones. El rango representativo de latitudes asociado con este tipo de clima se extiende desde los 25° de latitud N o S hasta los 50° de latitud N o S, pero escasos en zonas tropicales.

Con base en los principios de Wilson y Whipple se inició el trabajo para la comprobación de la hipótesis tomando las primeras estimaciones que se hicieron del parámetro nivel cerámico en Colombia en 1982 y posteriormente con mediciones, análisis matemático y revisión bibliográfica de los otros parámetros del rayo. El nivel cerámico es un parámetro sobre la actividad de rayos en una región determinada y se mide en número de días de tormenta al año. Un día de tormenta se define, para este parámetro, como aquel en el cual es oído por lo menos un trueno.

Más de quince parámetros científicamente mensurables han sido establecidos durante el estudio sistemático de la física del rayo. La escala de órdenes de magnitud espacial va desde los fenómenos atómicos que inician la electrificación de la nube de tormenta en una magnitud de  $10^{-10}$  metros, hasta el movimiento del aire de la nube de tormenta, que completa el proceso de carga, en una escala de decenas o centenas de kilómetros (Torres, 2015).

Con base en el proceso de desarrollar la hipótesis de investigación planteada, hoy en día sabemos, por ejemplo, que más de 2000 tormentas están activas alrededor del globo terráqueo en un momento dado, produciendo aproximadamente 100 rayos por segundo, que están más concentrados en la zona tropical terrestre que en las zonas templadas del planeta, como se muestra en las mediciones satelitales y

en las mediciones terrestres que hemos realizado no solo en Colombia sino en Brasil o en Cuba. Y sus parámetros como la corriente de retorno del rayo, el nivel cerámico, la densidad de rayos a tierra, la energía o su polaridad difieren estadísticamente a los medidos en la zona templada.

La figura 1 presenta un ejemplo de la variación espacial y temporal sobre el comportamiento del nivel cerámico en Bogotá, Colombia y La Habana, Cuba de una base de datos multianual, (Torres, 2002).

El comportamiento bimodal en la ciudad de Bogotá, Colombia y mono modal en la ciudad de La Habana, Cuba, están directamente relacionados con el desplazamiento de la

zona de confluencia intertropical, comportamientos que son totalmente diferentes en latitudes templadas (Torres, 2015).

La figura 2, (adaptada de Torres 2015) presenta otro ejemplo comparativo del parámetro nivel cerámico multi-anual global para países en latitudes templadas (Ejemplo, Estados Unidos y Francia) y países tropicales (Cuba, Colombia y Brasil), donde el valor máximo multianual en Francia es de 36, mientras en Colombia como país tropical puede llegar a más de 200.

La figura 3 compara el parámetro probabilístico corriente de retorno de rayo adoptado por los países de Europa, Norteamérica y Asia agrupados en el comité CIGRE, el cual se

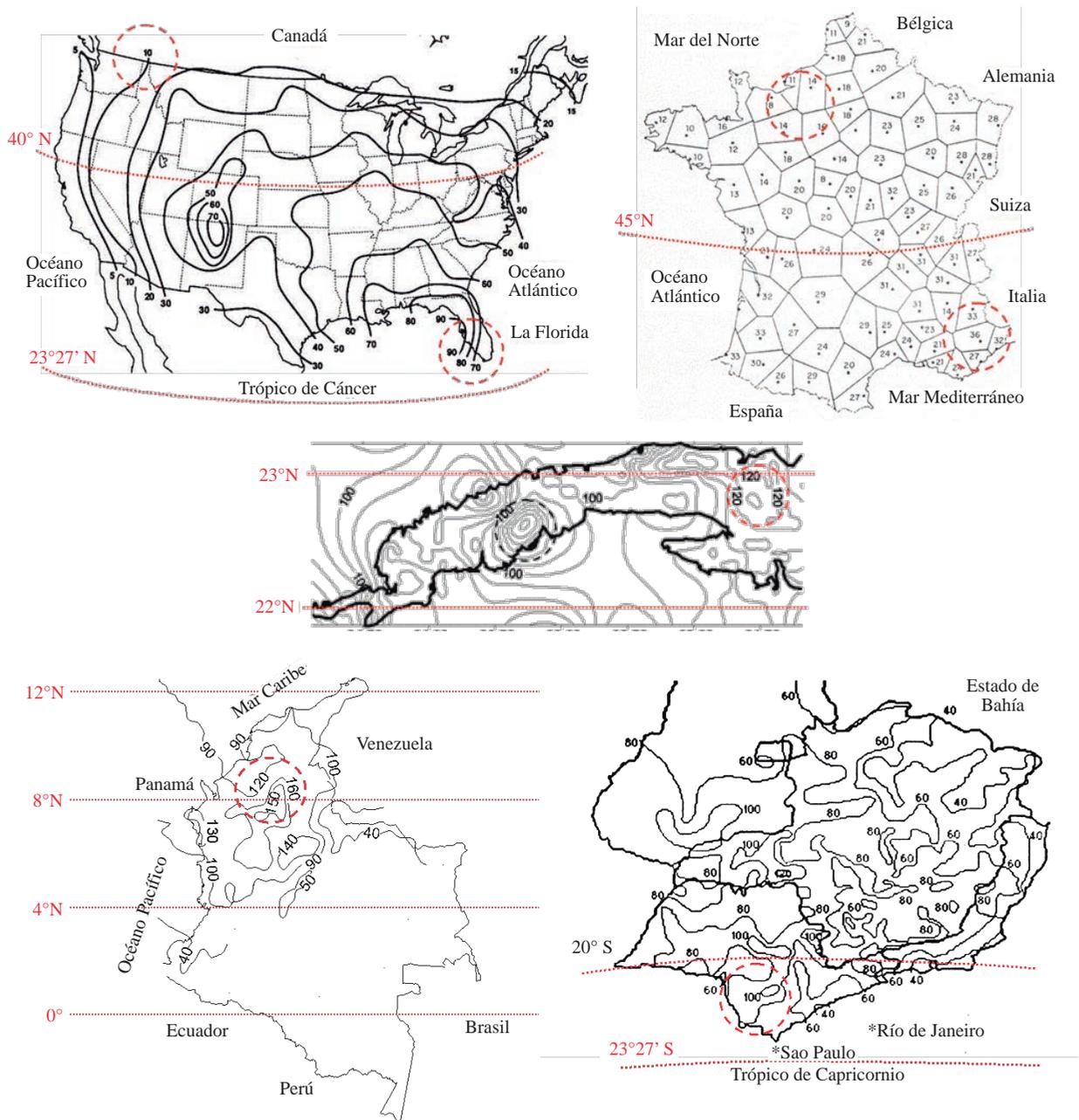
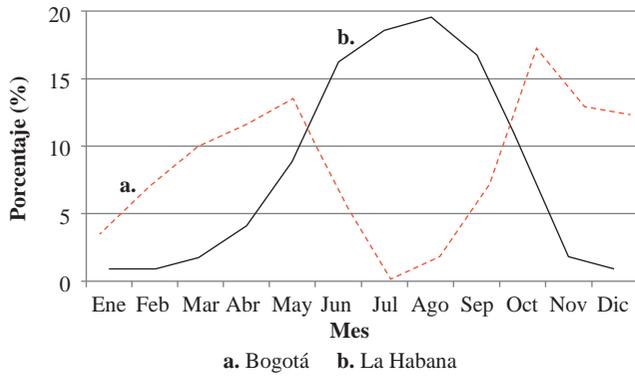
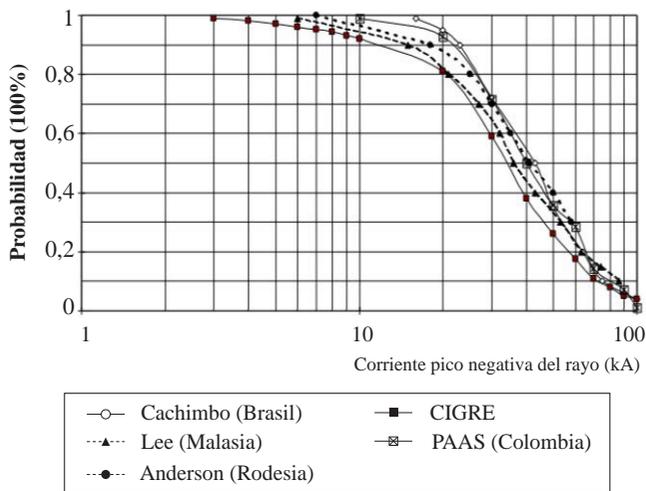


Figura 1. Variación mensual del Nivel Cerámico en Bogotá, Colombia y La Habana, Cuba.



**Figura 2.** Índice Nivel Cerámico multianual en diferentes países del mundo



**Figura 3.** Índice probabilístico multianual de la Corriente de Retorno del Rayo para la mayoría de países del mundo (CIGRE) y países tropicales.

basa en las mediciones realizadas por Berger en el monte San Salvatore (Suiza) en la década de 1950 y reportadas subsecuentemente (Berger, 1975), con las más recientes, realizadas con equipos tecnológicamente más avanzados, en países tropicales como Brasil (Visacro, 2004), Rodesia (Anderson, 1980), Malasia (Lee, 1979) y Colombia (Torres, 1996). Mientras las mediciones de Berger conducen a una mediana multianual de 30 kA, las tropicales dan como resultado 45 kA (Torres, 2015). Algunas de estas mediciones se hicieron de forma indirecta, utilizando sistemas de detección remota de rayos y, en consecuencia, los valores exactos pueden ser afectados por la validez de los modelos utilizados y por la eficiencia de detección de dichos sistemas.

Es así como hoy en día se tienen curvas de distribución de probabilidad para la corriente de retorno y la forma del impulso de la corriente de rayo, medidas en Europa, que se recomiendan tanto en la literatura especializada como en las normas internacionales, para ser utilizadas en diseño de protecciones contra rayos, diseño de aislamientos en

máquinas eléctricas, diseño de apantallamientos en líneas de transmisión, para cualquier parte del mundo. Esta práctica sería equivalente a clasificar climatológicamente la región colombiana, según el científico alemán Köppen, como bosque húmedo tropical y, con base en ello, diseñar un equipo de aire acondicionado para un edificio en la ciudad de Bogotá, (Torres, 2002), (Torres, 2010).

Para medir los parámetros del rayo en zona tropical terrestre fue necesario hacer campañas de medición directa e indirecta con el diseño e instalación de una torre de medición directa de rayo en la zona de Samaná, Caldas y otras mediciones mediante medición por inducción. Estos parámetros fueron comparados con las mediciones similares en Brasil y otros países tropicales.

Todos estos parámetros fueron presentados y discutidos con la comunidad académica internacional (Torres, 2015) y luego fueron llevados a una Norma técnica colombiana (NTC 4552, 2008) (figura 4). Estos resultados producto de la investigación tienen implicaciones directas en la protección contra rayos de personas y bienes en general en la zona tropical, la cual, en definitiva, presenta magnitudes de los parámetros del rayo diferentes a las de latitudes templadas (Torres, 2015). Estos parámetros son, además de la corriente del rayo, su variación con respecto al tiempo ( $di/dt$ ), su energía ( $W/R$ ), su carga en culombios ( $Q$ ), para polaridad positiva y negativa, entre otros.

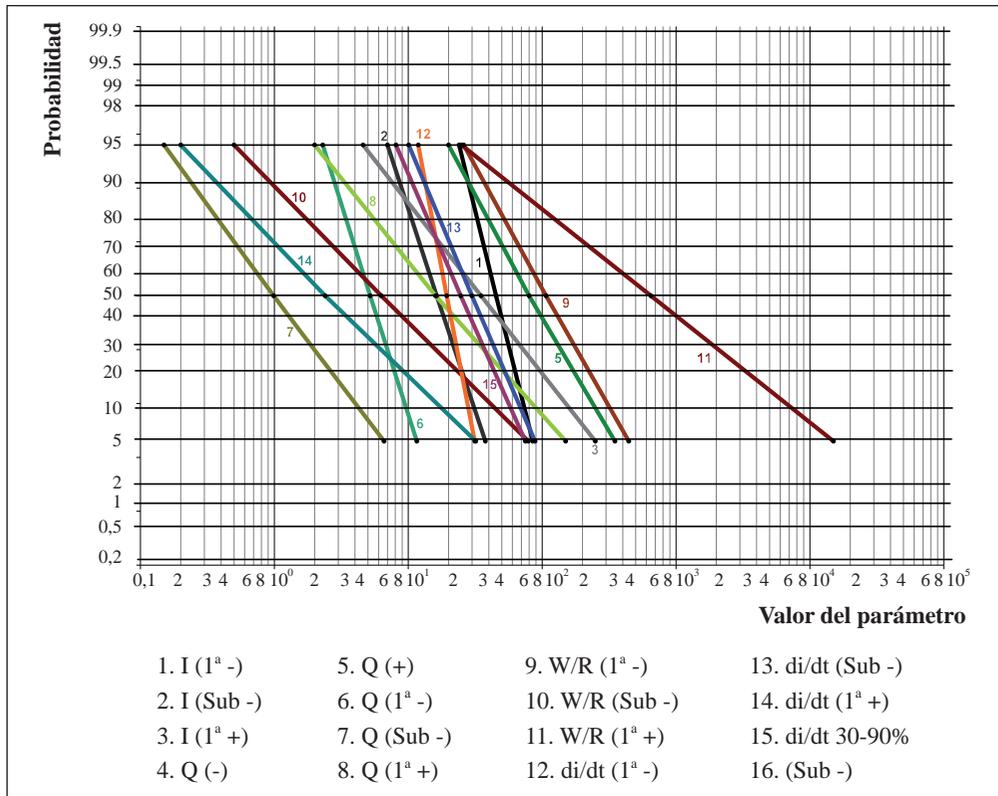
### Física y matemáticas en el modelo del rayo

Físicamente, el inicio del rayo se debe a la formación de penachos dentro de la nube, en la región inferior de carga negativa, a causa de los altos campos eléctricos allí presentes (de 0,1 a 1 MV/m) (Torres, 2010), (Rakov, *et al.*, 2003), (MacGorman, *et al.*, 1998), (Cooray, 2003).

La propagación de estos penachos lleva a la recombinación de cargas en la base de la nube y a la formación de un canal eléctrico a partir del cual comienza a desarrollarse el líder del rayo. Aún no hay total claridad de la forma exacta como se producen estos penachos dentro de la nube, ya que existen teorías diversas que se basan en la precipitación de hidrometeoros, en la interacción de gotas de agua y en la creación de electrones energéticos a causa de rayos cósmicos (Torres, 2010), (MacGorman, *et al.*, 1998), (Cooray, 2003). Sin embargo, la mayor discusión y controversia se concentra en la forma como se propagan, con dos principales modelos conceptuales existentes: el unipolar y el bipolar.

Para la representación física del modelo de un rayo se parte de las leyes fundamentales del electromagnetismo que están basadas en observaciones experimentales que explican las variaciones en las propiedades físicas del fenómeno.

Estas leyes, conocidas como las leyes de Maxwell se expresan en términos de los cambios espaciales y temporales de las variables intervinientes. Es por ello que las ecuaciones diferenciales tienen importancia fundamental en las aplicaciones del fenómeno del rayo ya que los procesos físicos son modelados matemáticamente por estas ecuaciones.



**Figura 4.** Parámetros probabilísticos del rayo, Norma Técnica Colombiana NTC 4552-1.

Hasta la fecha en que se comenzó el desarrollo de una tesis doctoral (Vargas, 2006) sobre el modelo físico y matemático del rayo se utilizaba, a nivel mundial, un modelo lineal. Fue necesario, entonces, resaltar que la influencia de la tortuosidad y las ramificaciones del líder descendente sobre el proceso de enlace y el desempeño de los sistemas de protección contra rayos, no había sido estudiada profundamente, Ver figura 5.

Algunos autores habían modelado la propagación y el camino del líder usando modelos probabilísticos basados en teoría de fractales (Petrov, 2003), (Agoris, *et. al.*, 2004), (Lupo, 2000). Sin embargo, en estos trabajos no se hizo una estimación de la distribución de carga a lo largo del canal del líder y sus ramas y los canales obtenidos no se asemejaban a la geometría macroscópica real del rayo en aspectos como la longitud de pasos, cambios de dirección del líder y ángulos de ramificación.

Este trabajo fue presentado y discutido ante la comunidad académica internacional con la publicación de 2 artículos (Vargas, Torres, 2008). El modelo matemático integral desarrollado se basó en una aproximación electrostática, la cual se considera válida debido al avance escalonado del líder descendente y a su baja velocidad de propagación con respecto a la luz.

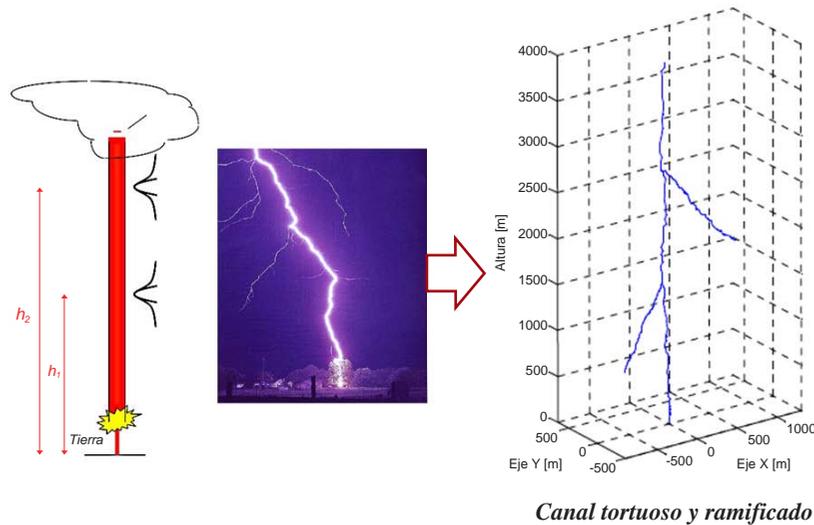
Las ecuaciones matemáticas no lineales fueron solucionadas mediante el método de simulación de cargas (MSC) y el método de cargas superficiales (MCS), derivado del MSC

y que permite calcular potenciales y campos eléctricos a partir de una distribución de cargas superficiales dispuestas sobre el objeto.

Para solucionar el modelo, conocido como Bi-Líder, se construyó un sistema de ecuaciones en el cual el potencial en los puntos de contorno de las líneas de carga fueran la suma de las contribuciones de todas las líneas de carga, los centros de carga de la nube de tormenta (cargas esféricas) y sus imágenes. Permitted, así, considerar la tortuosidad y las ramificaciones aleatorias del líder descendente, con geometrías macroscópicas similares a las observadas en descargas naturales.

Además, se pudo estimar la distribución de carga a lo largo del canal del líder y sus ramas. Este modelo puede ser aplicado a una amplia variedad de estructuras en tierra encontradas en la realidad, mediante el modelamiento para estructuras esbeltas y robustas o complejas.

Complementariamente a la anterior tesis de doctorado se realizaron otras dos que aportaron al conocimiento universal del fenómeno del rayo y sus efectos en redes de energía eléctrica. El principal aspecto que se analizó en la tesis de doctorado (Herrera, 2006) fue la influencia que tiene la geometría del canal de la descarga eléctrica atmosférica en el cálculo tanto de campos electromagnéticos sobre un suelo de conductividad finita como en las tensiones inducidas que estos producen en líneas polifásicas aéreas de distribución. Se presentó, por primera vez a nivel mundial, este aporte



**Figura 5.** Modelo Bipolar: Análisis del modelo del rayo tortuoso y ramificado (Adaptada de **Torres, H.**, 2015).

(Silveira, 2008). Y en (Pérez, 2006) los 3 principales aportes se realizaron en: a) descripción de los diferentes efectos de los parámetros del rayo y de la línea sobre las tensiones inducidas, b) identificación de los parámetros más influyentes en las tensiones inducidas y c) una ecuación sencilla para calcular tensiones inducidas máximas con errores menores que las ecuaciones existentes y así lograr aplicaciones para ingeniería eléctrica (Conti, 2010).

Mediante la tesis doctoral (Younes, 2006) se planteó un nuevo concepto que se denominó densidad de rayos difusa y surgió como uno de los principales aportes al conocimiento del fenómeno del rayo y sus aplicaciones en ingeniería, ya que es capaz de generar un concepto de densidad que se comporta más homogéneamente y para problemas prácticos de ingeniería, como la protección contra rayos y la evaluación de riesgo por rayos, puede llegar a ser más útil que el concepto tradicional de densidad de descargas a tierra (Torres, 2010).

Actualmente se realiza una tesis doctoral con información de una red instalada en los alrededores de la ciudad de Santa Marta, Colombia, dentro de una investigación financiada por la Agencia Aeroespacial Europea para caracterizar y proponer un modelo bidireccional de líderes para ser contrastados con los TGF (*Terrestrial Gamma Ray Flashes*).

### La biología y el fenómeno del rayo

En la visión biológica sobre el fenómeno del rayo existen numerosos artículos científicos y de difusión científica respecto al peligro de los rayos para los seres humanos durante actividades al aire libre en caso de tormentas eléctricas.

Un rayo puede matar o causar daños al fluir corriente eléctrica por el cuerpo humano. Sin embargo, los flameos externos entre la cabeza y los pies, que se producen alrededor del cuerpo, pueden causar más daños como quemaduras que muerte.

La tasa de mortalidad por rayos varía entre 8 y 10%, es decir que de cada 100 personas impactadas por rayo solamente entre 8 y 10 mueren. El paro cardíaco en el momento de la lesión es usualmente la causa de muerte; sin embargo, efectos secundarios, por ejemplo, golpes por caídas o asfixia pueden también ser mecanismos de muerte o lesión (Torres, Rojas, 2003).

Un impacto de rayo genera fundamentalmente una lesión neurológica que afecta los 3 componentes del sistema nervioso: central, autonómico y periférico. Un porcentaje alto de personas impactadas por la corriente de un rayo desarrollan alteraciones cardíacas y respiratorias que pueden ser pasajeras o tan duraderas que llevan a la muerte. En forma semejante a lo que experimentalmente se puede realizar en un laboratorio de electrofisiología estimulando células con pulsos de corriente, la energía de un rayo puede alterar los mecanismos celulares dependientes de las corrientes iónicas despolarizantes, originadas por el ion  $\text{Na}^+$  o las repolarizantes conducidas por el ion  $\text{K}^+$  (Torres, Rojas, 2003). Es posible inferir que, si el paso de la corriente del rayo coincide con el transcurso de la onda T de repolarización de la célula cardíaca, la fase de diástole o de relajación se alterará.

Estadísticamente, las quemaduras internas son raras en accidentes por rayos. De acuerdo con investigaciones internacionales, rara vez se ha encontrado mioglobina en la orina de las personas que han sufrido impactos por rayo. La mioglobina es una hemoproteína muscular, estructuralmente y funcionalmente muy parecida a la hemoglobina, cuya función es la de almacenar y transportar oxígeno dentro del tejido muscular. Cuando el músculo esquelético sufre algún daño, por ejemplo, quemaduras por corrientes de rayo, la mioglobina es liberada en el torrente sanguíneo y los riñones se encargan de filtrarla y eliminarla por medio de la orina. Paros respiratorios y cardíacos, espasmos vasculares, daños neurológicos e inestabilidad son las principales consecuencias de las lesiones por rayos (Torres, Rojas, 2003).

Las investigaciones realizadas en las últimas décadas sobre lesiones y muertes relacionadas con fenómenos atmosféricos en el mundo, indican que los rayos han sido consistentemente la tercera causa de muerte y la segunda causa de lesiones, superada solamente por las inundaciones (Cooper, 2005).

El 24 de octubre de 2002 un rayo acabó con la vida de Herman el “Carepa” Gaviria y Giovanni Córdoba, dos recordados futbolistas de la selección colombiana de fútbol; el 6 de octubre del año 2014 se presentó la muerte de 11 indígenas y 18 heridos de la comunidad Wiwa en la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia, noticias que reflejan el alto riesgo por rayos al que se enfrenta la población colombiana.

Según nuestros estudios estadísticos con datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y el Ejército Nacional, en Colombia los rayos producen 2 muertes por cada millón de habitantes; una cifra significativa si se compara con países como China, que tiene 0,3 muertes por millón, Malasia 0,8, Francia, 0,2, Brasil 0,8 o Estados Unidos con 0,3.

Además, las normas internacionales como la *International Electrotechnical Commission (IEC) (IEC 62305-2 (Ed.3), 2013)*, contienen información basada en experiencias de países con bajo riesgo por rayos, muy diferentes a la colombiana y por ello se elaboró una Norma técnica colombiana NTC 4552.

### La historia y la literatura en la interpretación del rayo

Si bien la ciencia moderna ofrece hoy en día la posibilidad de conocer y comprender los fenómenos de la naturaleza, la historia nos proporciona similares interpretaciones en otro lenguaje: el mítico. La figura 6 ilustra las diferentes interpretaciones míticas y religiosas que se le han dado al fenómeno del rayo en diferentes culturas a través de los siglos.

Un ejemplo de la interpretación de un mismo fenómeno en dos lenguajes diferentes lo encontramos en la creación de la vida en el universo, al comparar la creencia mítica de la ancestral y milenaria cultura Maya con el resultado científico llevado a cabo en nuestro tiempo en la Universidad de Cornell, Estados Unidos, según las cuales el rayo es el detonante de la vida en el universo (Torres, 2002).

Un análisis del significado de las invocaciones Mayas para la lluvia, muestra, por ejemplo, el conocimiento que ya tenían sobre la diferencia que actualmente, en lenguaje científico, se tiene entre rayos nube - tierra y entre nubes, así como las relaciones no directas que hoy en día conocemos entre número de días con rayos y número de días con lluvia.

Había meses y días especiales en que invocaban a los Chacs para la lluvia y en estas invocaciones utilizaban ciertos términos cuyo significado estaba relacionado con las lluvias. Por ejemplo: Lelemcaanchaac, “el dios de la lluvia

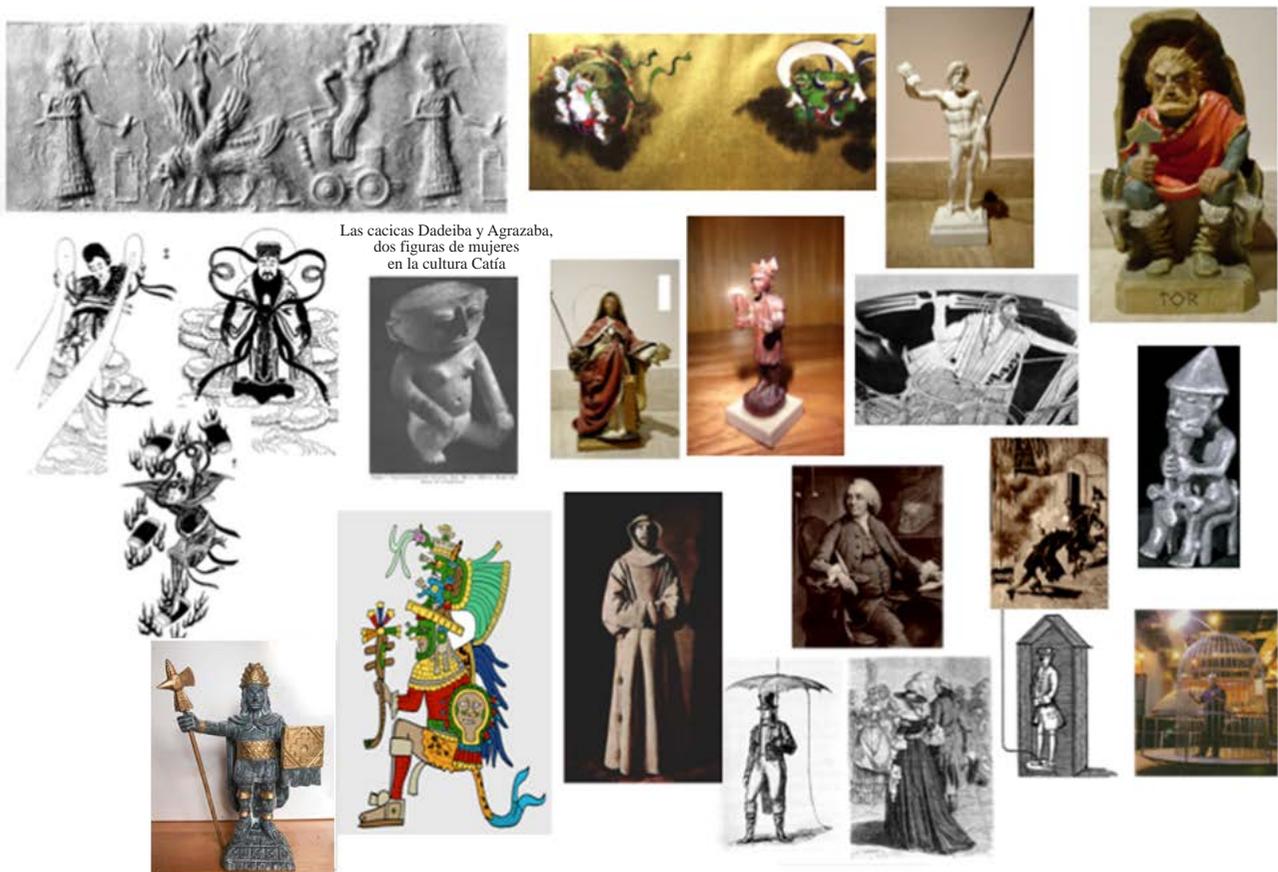


Figura 6. Interpretaciones del fenómeno del rayo en diferentes culturas a través del tiempo.

látigo relampagueante...”, Mizencaanchaac, “rayo que barre el cielo...” y Lelencaanil, “tormenta de muchas nubes y poca agua.” (Torres, 2015).

Así mismo el rayo ha estado presente en las interpretaciones religiosas con la santa turca Santa Bárbara la patrona de las tormentas, cuyo día de celebración es el 4 de diciembre. Nació en Nicomedia, la capital de Bitinia, hoy día Ismidt en Turquía asiática, donde vivió y fue martirizada hacia el año 235 a la edad de 16 años. Fue canonizada por la iglesia católica en el año 1568 y nace así la leyenda de Santa Bárbara, patrona de los rayos (Torres, 2015).

Muchos sitios en Colombia y del mundo cristiano tienen el nombre de la santa patrona de los rayos, como el caso del barrio Santa Bárbara en el centro de la ciudad de Bogotá, debido a que, según cronistas de la época, allí impactó el primer rayo en la recién fundada ciudad de Santafé de Bogotá en el año 1565 (Torres, 2015).

El sincretismo religioso en la isla de Cuba llevo a Celina González y a Reutilio Domínguez a plasmar en una bella canción cubana la conciliación entre la santa cristiana y el dios africano del rayo Changó con la canción mundialmente conocida en las voces de Celina y Reutilio: “Santa Bárbara bendita... que viva Chango” (Torres, 2015).

El 4 de octubre la iglesia católica celebra la fiesta de San Francisco de Asís y, de acuerdo con la tradición oral, ese día, en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá se presenta “el cordonazo de San Francisco”, pues ese día San Francisco sacude el cordón de su hábito y castiga con cordonazos a los habitantes que han pecado. De acuerdo con los estudios que hemos realizado sobre rayos en la ciudad de Bogotá, en el mes de octubre se presenta la segunda temporada de rayos debido a que, meteorológicamente, se da el paso de la zona de confluencia intertropical por esta latitud y es el origen de este fenómeno, con mayor énfasis en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá. La interpretación que le ha dado la iglesia católica sucede también en esta época en países tropicales como México, Venezuela, Panamá, parte de Brasil y África (Torres, 2015).

Pero la historia y la literatura también han descrito e interpretado el fenómeno del rayo. La parte media del Valle del Río Magdalena (o mejor conocido como Magdalena Medio) se caracteriza por la presencia de un sistema de alto nivel cerámico, con valores promedio entre 120 y 160, en la región conocida como Catatumbo en zona limítrofe con Venezuela.

La más reciente publicación de resultados de medición satelital de la NASA (Albrecht, 2016) muestra, por ejemplo, que el sitio de mayor actividad de rayos del mundo estaría ubicado en la región del Catatumbo y específicamente en el lago de Maracaibo y de las 10 poblaciones de mayor actividad de rayos en la zona de Suramérica, 7 están ubicadas en Colombia. La actividad de rayos en esta región llevó a Alexander von Humboldt (Humboldt, 1956) a llamar este fenómeno como el “rayo del Catatumbo”. El naturalista y explorador alemán lo describe como “explosiones eléctricas

que son como fulgores fosforescentes...”, siendo reseñado luego por el geógrafo Agustín Codazzi como un “relámpago continuado que parece surgir del río Zulia y sus alrededores” (Codazzi, 1960).

Las observaciones de Humboldt son coincidentes con los resultados de la investigación de los últimos 30 años en zona tropical, fundamentalmente en Colombia Zavrostky, (1991), por ejemplo, en 1991 sugiere la hipótesis de rayos permanentes debido a colisión de corrientes de aires frío-caliente. No se descarta al uranio como agente co-causal. Este fenómeno se caracteriza por ser un relámpago casi continuado y silente, que se produce en nubes de gran desarrollo vertical formando arcos eléctricos entre los 2 y un poco más de 10 kilómetros de altura, a medida que los vientos alisios penetran en la superficie del lago de Maracaibo en horas de la tarde, cuando la evaporación es mayor y ascienden por el sistema montañoso de la Serranía del Perijá (de 3.750 msnm) en Colombia y la Cordillera de Mérida, el ramal venezolano de los Andes (de 5.000 msnm, aproximadamente).

Anecdóticamente el rayo del Catatumbo frustró en 1595 un ataque del pirata inglés Francis Drake a la ciudad de Maracaibo y fue narrado en un bello episodio en la obra épica “La Dragontea” (Lope de Vega, 1598), y relata cómo la luminosidad desplegada por el relámpago le permitió a un vigía divisar las naves de Drake y alertar a la guarnición, que logró repeler el ataque nocturno.

Además, durante la guerra de independencia, el rayo del Catatumbo sirvió de faro para la fuerza naval del Almirante neogranadino Jose Prudencio Padilla, quien logró derrotar a los navíos españoles el 24 de julio de 1823 en la batalla naval del lago de Maracaibo.

## La química y el fenómeno del rayo

Aunque, generalmente, se tiene el prejuicio de que los rayos son un fenómeno atmosférico negativo relacionado con muerte y destrucción, que llega a producir brontofobia o ceraunofobia, un miedo persistente, anormal e injustificado a los rayos, ideas que no son totalmente ciertas y por tanto injustificadas, pues los rayos también son fundamentales en la vida sobre la tierra (Torres, 2015).

Si bien es un fenómeno natural que puede experimentar temor, los rayos, cuando fijan el nitrógeno al impactar en el suelo, son un verdadero banquete para las plantas, que se refleja rápidamente en un vigor y crecimiento extraordinario. El ciclo del nitrógeno es cada uno de los procesos biológicos y abióticos, es decir, que no forma parte o no es producto de los seres vivos, en que se basa el suministro de este elemento a los seres vivos.

El primer paso en el ciclo es la fijación del nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) a formas distintas susceptibles de incorporarse a la composición del suelo o de los seres vivos, como el ion amonio ( $NH_4^+$ ) o los iones nitrito ( $NO_2^-$ ) o nitrato ( $NO_3^-$ ). Aunque el amonio puede ser usado por la mayoría de los organismos vivos, las bacterias del suelo derivan la energía de la oxidación de dicho compuesto a

nitrito y finalmente a nitrato. El nitrógeno en forma de  $N_2$ , se encuentra formando parte de la atmósfera, integrando un 78% de la misma. Es un elemento bastante inerte, no reacciona fácilmente con otros compuestos, así que antes de ser aprovechado por la mayoría de los seres vivos, debe pasar por un proceso de fijación. Este proceso de fijación de nitrógeno está definido como su combinación con oxígeno o hidrógeno. La combinación es llevada a cabo por varias vías distintas. La fijación natural puede ocurrir por procesos químicos espontáneos, como la oxidación que se produce por la acción de los rayos, que forma óxidos de nitrógeno a partir del nitrógeno atmosférico. En la estimación de la producción mundial de NOx por rayos, el parámetro que más influye es la longitud del canal de descarga dentro de la nube. Para la longitud total de canales dentro de la nube de un rayo típico nube-tierra de alrededor de 45 km, se estima que la producción mundial anual de NOx es de aproximadamente 4Tg.

Adicionalmente, el adelgazamiento de la capa de ozono puede tener consecuencias graves para la vida en la tierra. Los rayos ultravioletas (UV) pueden destruir el ADN, moléculas que se necesitan para la reproducción de los seres vivos. Los rayos ultravioletas alteran los procesos fisiológicos y de desarrollo e indirectamente modifican su forma, distribución de los nutrientes y etapas de crecimiento lo cual es perjudicial para su supervivencia. De acuerdo con estudios sobre la capa de ozono, el ozono troposférico en mayor porcentaje es formado por reacciones químicas a partir de los óxidos de nitrógeno producidos por los rayos.

### La innovación tecnológica

La innovación tecnológica como resultado inherente a la investigación, lleva implícito un largo proceso de apropiación, construcción y generación de conocimiento que se conoce como investigación tecnológica y que ha sido descrita en los apartados anteriores. Y este proceso requiere del sustrato académico de las ciencias básicas que, en definitiva, puede llevar a aplicaciones empresariales con registros y patentes.

Con base en los conocimientos logrados sobre la física del rayo, los modelos matemáticos y mediante tesis de pregrado, maestría y doctorado nacionales (Aranguren, 2011) fue posible, con un medidor de campo eléctrico modificado, lograr los primeros resultados de nuevo conocimiento que permitieron predecir, por primera vez en el mundo, el impacto de un rayo. En condiciones de buen tiempo el campo eléctrico ambiental es de aproximadamente 120 V/m. Las nubes de tormenta se caracterizan por generar variaciones de campo eléctrico alcanzando niveles de hasta 15 kV/m en zonas planas. En las mediciones locales realizadas en un trabajo de doctorado (Aranguren, 2011) en la Universidad Nacional de Colombia, observamos que se registraban cambios en diferentes parámetros derivados de la señal de campo eléctrico. Estos efectos fueron analizados y se pensó en que podrían ser debidos a ruidos en la medición.

Se propuso, entonces, realizar mediciones en otros sitios de Colombia y en Europa, gracias a los contactos con colegas que investigan el fenómeno.

Un análisis de las mediciones locales en Colombia y Europa, así como datos de mediciones en la estación de la NASA en Cabo Cañaveral, dieron como resultado una explicación física, cuyos resultados fueron los primeros criterios para predecir la ocurrencia de rayos dentro de una región de interés, a través de la activación de una alarma temprana. Este proceso es lo que se conoce en idioma inglés como “*serendipity*”, es decir, un hallazgo afortunado e inesperado que se produjo cuando se buscaba otra cosa distinta. El área de predicción se definió dentro del rango de alcance que tiene el sensor de campo eléctrico, el cual puede ser hasta 20 km de radio (Torres, 2014).

Trabajos con nuevas tesis de maestría y doctorado (Soto, 2015, Inampues, 2014, López, 2011), Aranguren, 2011), permitieron profundizar en la predicción de rayos logrando definir el tiempo de predicción en aproximadamente media hora con una eficiencia de más de 90%.

De estos resultados de investigación nació una empresa de innovación tecnológica, que en tecnología se conoce como una empresa “spin-off”. Esta empresa colombiana ha venido encontrado innovaciones tecnológicas, con patentes y aplicaciones para la protección contra rayos de personas, de sistemas y equipos, que se ha extendido a una gran variedad de actividades que incluyen, además de la protección de vidas de personas en espacios abiertos (parques, escenarios deportivos, lugares de trabajo y otros), la protección de aeropuertos, sistemas de distribución y transporte de energía eléctrica, minas de extracción en campo abierto, campos petroleros, entre muchos otros.

### Recursos gerenciales: gestión de riesgo por rayos

Debido a que la sociedad moderna es cada día más dependiente de los equipos de cómputo, del servicio de energía eléctrica, de los sistemas de comunicación y, en general, de los equipos eléctricos y electrónicos, la ingeniería colombiana debe responder con diseños adecuados y protecciones eficaces de estos contra las perturbaciones electromagnéticas, como las producidas por un rayo, que son, en magnitud, las más altas del mundo según resultados de investigación realizados en Colombia. Para ello es necesario incorporar el análisis del fenómeno del rayo a la gestión del riesgo (Torres, 2010).

La gestión de riesgo ha sido desarrollada fundamentalmente en las áreas de la economía y, recientemente se ha enfocado en el tema de desastres, entre los cuales está el fenómeno del rayo. Es un enfoque estructurado para manejar la incertidumbre relativa a la amenaza de un rayo, a través de una secuencia de actividades humanas que incluyen la evaluación de riesgo por rayos, estrategias de desarrollo para manejarlo y mitigación del riesgo utilizando recursos gerenciales. Las estrategias incluyen fundamentalmente mitigar los efectos negativos del riesgo por rayos.

La gestión de riesgo por rayos la hemos desarrollado mediante una tecnología que se ha bautizado como 3P y se refiere a la Predicción, Protección y Prevención de rayos con innovaciones tecnológicas, aplicaciones y tecnologías para la protección de personas, de sistemas y equipos para la gestión de riesgo por rayos.

La primera P, de predicción, se logra mediante el molino de campo eléctrico (bautizado como PreThor) al que se le modificó el hardware y se hicieron modificaciones en la medición de la polaridad (carga eléctrica positiva y negativa de las nubes). La figura 7 presenta esquemáticamente como se logra la predicción con el molino de campo para un sitio determinado.

Son dos placas paralelas, una de ellas en movimiento, separadas por un aislamiento que contienen un circuito unido a un osciloscopio (instrumento de visualización electrónico que representa gráficamente señales eléctricas) y que permite visualizar las señales positivas o negativas. Al medir el campo eléctrico atmosférico (electricidad en la atmósfera), se da un aumento de la señal mientras se genera una concentración de carga en las nubes, que llega hasta un punto de saturación que marca el umbral en el cual se obtienen las variaciones que detecta el equipo (Aranguren, 2009).

La otra P se refiere a la protección, cómo proteger espacios concurridos al aire libre. Existen formas para lograr esto mediante la utilización de jaulas de Faraday, una caja metálica que protege de los rayos, conduciéndolo efectivamente

a tierra, similar al montado en el centro interactivo Maloka de Bogotá, Figura 8. Con este módulo instalado en Maloka se logra la apropiación social del fenómeno.

Por último, la prevención, se puede generar a través de cartillas y capacitaciones que guíen a las personas que trabajan, hacen deporte o asisten a espectáculos multitudinarios al aire libre. En este punto es fundamental integrar los conceptos de psicología social, para lograr que las comunidades entiendan y asuman la responsabilidad cual debe ser el comportamiento individual y colectivo ante el fenómeno del rayo.

### Trabajos futuros en la investigación sobre el rayo y el cambio climático global

Aunque ha habido intentos investigativos de caracterizar la fenomenología del rayo, su origen puede ser atribuible a cinco factores que influyen su actividad en una zona determinada: vientos, orografía, superficie, subsuelo y cambios por actividad humana los cuales serán fundamentales en las próximas actividades de investigación sobre rayos y requerirán de disciplinas como la geología y la geografía.

**Vientos.** La actividad de rayos permanentes es ocasionada por la circulación de sistemas de vientos, cuyas nubes de tormenta transportan cargas eléctricas en su interior. En el caso colombiano estos vientos son los alisios del Noreste y del Sureste que al confluir forman la Zona de Confluencia Intertropical ZCIT y son la materia prima para la generación de rayos.

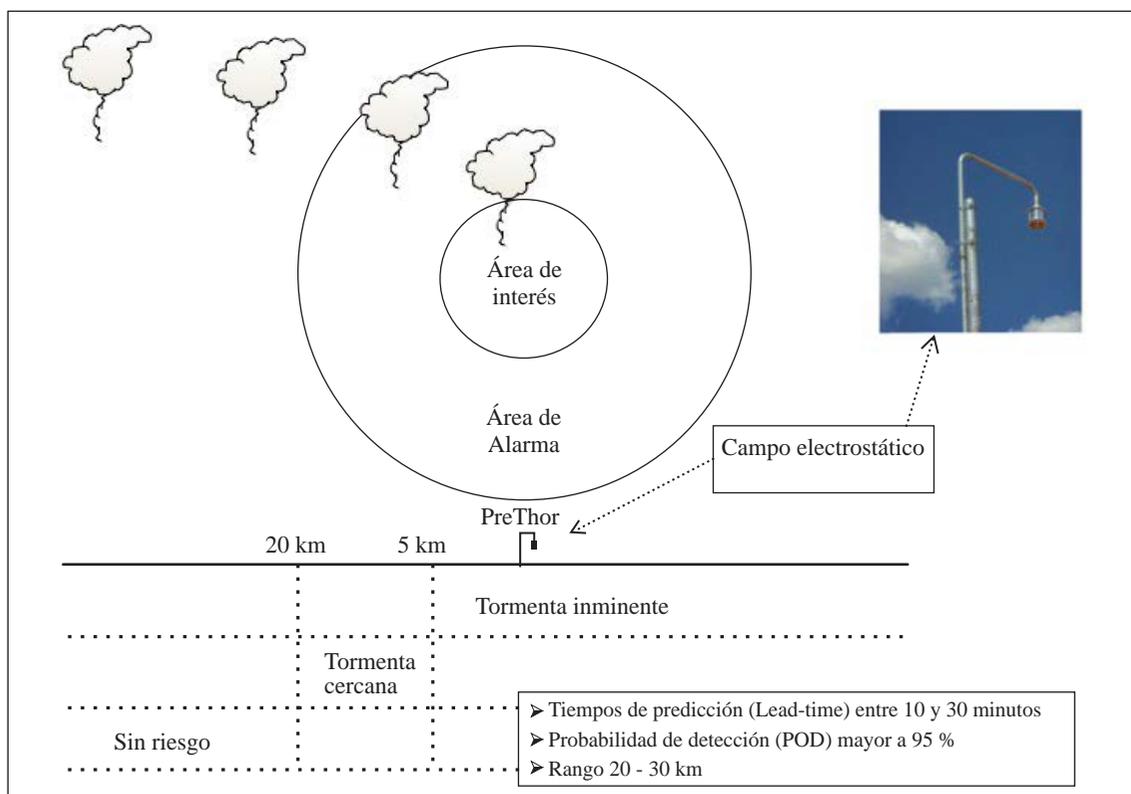


Figura 7. Procesamiento del campo eléctrico ambiental por el molino PreThor.



$$\frac{d}{dt} \iint_S \langle H, \vec{n} \rangle ds = \frac{d}{dt} \iint_S \langle E, \vec{n} \rangle ds = 0.$$

**Figura 8.** Protección Externa: Jaula de Faraday en el centro Maloka, Bogotá.

**Orografía.** El sistema montañoso de la región que interactúa con el sistema de vientos, produciendo concentración de nubes de tormenta y facilidad para generar rayos por el fenómeno de convección. Un claro ejemplo de este factor se da en la ciudad de Bogotá, cuando en época de paso de la ZCIT, los vientos alisios llevan nubes de tormenta que chocan contra las montañas orientales y por convección se da la actividad de rayos después del mediodía.

**Superficie.** La diferencia de la actividad de rayos entre la tierra y el océano se atribuye generalmente al contraste en las propiedades físicas de cada superficie, pero el logro de una explicación cuantitativa acertada ha tomado algún tiempo (Williams, *et. al.*, 2002). La superficie está ligada a otro factor que tiene que ver con los cambios por actividad humana.

**Subsuelo.** La posibilidad de la existencia de algún agente causal en el subsuelo, por ejemplo, fuentes geomagnéticas o radiactivas que pueden producir cargas iónicas en el entorno; la región del Catatumbo, por ejemplo, es rica en uranio y, en general, se tiene que las mayores zonas de actividad de rayos presentan una correlación observacional con materiales metálicos como hierro, oro, níquel, plata, etc.

**Cambios por actividad humana.** Se refiere al término de efecto isla por calentamiento urbano, que en idioma inglés se conoce como el efecto *Urban Heat Island (UHI)*. El efecto isla por calentamiento urbano en un área metropolitana es significativamente más caliente que sus alrededores debido a las actividades humanas (Cole, *et. al.*, 2016). A medida que la población crece y hay mayor actividad humana,

tiende a ampliar su área y aumentar su temperatura media. El término *UHI* se refiere, entonces, a cualquier área que es consistentemente más caliente que sus alrededores. Este efecto ha sido estudiado para analizar el aumento de la actividad de rayos, por ejemplo, en la población de Manaus, Brasil y su área selvática alrededor (Pinto, *et al.*, 2014).

En estudios sobre actividad de rayos en zonas petroleras en Colombia hemos observado que a medida que aumenta la actividad humana en la zona, por ejemplo, caminos polvorientos que levantan partículas de tierra hacia la atmósfera, aumenta la actividad de rayos. Estos temas valen la pena analizarlos a mayor profundidad para encontrar respuestas a estos incrementos.

Este argumento hipotético con sus 5 factores es válido para cualquier análisis de actividad de rayos en una zona determinada y merece un estudio investigativo más a profundidad. Estudios recientes en física atmosférica estiman que el calentamiento global incrementará significativamente la actividad de rayos. El estudio basado en la información de la Red Nacional de Detección de Rayos de Estados Unidos (NLDN) estima que por cada dos rayos que cayeron en el año 2000, caerán tres en 2100 y este aumento podría tener consecuencias desastrosas. El estudio del investigador David Romps, de la Universidad de California, Berkeley (Romps, *et. al.*, 2014), indica que por cada grado centígrado que aumente la temperatura global, la frecuencia de los rayos se incrementará un 12%. Además de provocar más incendios naturales, las constantes descargas eléctricas atmosféricas alterarán la composición química de la atmósfera. Conforme el planeta se calienta, habrá más energía para producir rayos más potentes. Se estima que, durante el siglo XXI, la tierra se calentará 4 °C.

La relación rayos – cambio climático es un tema de investigación que requiere un trabajo científico de fondo, pues los primeros resultados de Romps han sido realizados únicamente para los Estados Unidos, pero no en la zona tropical.

Por estas razones, un objetivo que vale la pena en la investigación del cambio climático es la identificación de parámetros físicos mensurables, los cuales son dependientes, no linealmente, de los cambios en la temperatura atmosférica; de esta manera se podría tener alguna ganancia en la medición del calentamiento global. El potencial ionosférico - PI es una de estas variables y está asociado con la electrificación de las nubes, las cuales a su vez están controladas por fluctuaciones del equilibrio hidrostático, que es causado por diferencias de temperatura del orden de unos pocos grados Celsius (Torres, 2002).

La convección profunda (*Deep Convection*) (cuando el aire húmedo se eleva en una atmósfera potencialmente inestable, hay una energía potencial convectiva disponible (CAPE por sus siglas en inglés) para que éste suba su nivel de fluctuación neutra, usualmente a algún lugar de la troposfera superior. Esta elevación y la atmósfera inestable dan como resultado la formación de nubes, precipitación y células convectivas de elevación profunda) es de gran

importancia tanto en la generación de carga para el circuito eléctrico global como en la generación de calor para la celda de Hadley, se origina en el fenómeno de inestabilidad condicional del aire. La fuente de energía necesaria para el desarrollo de este proceso es CAPE, una cantidad primero conceptualizada por Margules en 1905, pero definida por Moncrieff y Miller en 1976 (Torres, 2002).

Los experimentos de campo realizados por Williams en Darwin (Australia) en 1990, han demostrado una sensitiva dependencia de la actividad de los rayos con la temperatura de bulbo húmedo, medida sobre la superficie y la CAPE (Williams, Stanfill, 2002). El análisis de las mediciones de temperatura de bulbo húmedo y actividad de rayos nube - tierra e intra nubes muestran que en la estación seca en Darwin (mayo - octubre) es menor que el valor umbral y por consiguiente no se observan ni convección profunda ni actividad de rayos (Torres, 2002).

## Conclusiones

- La principal conclusión de este artículo es exponer con un ejemplo práctico y concreto la metodología y estrategia para desarrollar ciencia, tecnología e innovación en un país como Colombia, como un proceso de largo plazo de apropiación, construcción y creación autónoma de conocimiento alrededor de una problemática propia de su entorno con categoría conceptual de un trabajo interdisciplinario.
- Hoy en día la interdisciplinariedad respecto al fenómeno del rayo ofrece un marco metodológico que a futuro debe estar basado en la intersección de las ciencias básicas como la física, las matemáticas, la química, las ciencias biológicas, la historia, la literatura, las teorías en psicología y otras que pueden llegar a necesitarse, si se desea realizar un trabajo investigativo creativo e innovador.
- La interdisciplinariedad es fundamental al hablar del desarrollo científico del rayo, porque para poder comprender a profundidad el fenómeno y proponer soluciones tecnológicas e innovaciones, es indispensable la interacción entre aquellas disciplinas que le son afines para aportar al conocimiento del fenómeno en el concierto mundial.
- A futuro, la relación rayos – cambio climático es un tema de investigación que requiere un trabajo científico de fondo, pues los primeros resultados recientemente han sido efectuados únicamente para los Estados Unidos, pero no en la zona tropical.
- Vientos, orografía, superficie, subsuelo y cambios por actividad humana serán aspectos fundamentales en las próximas actividades de investigación sobre rayos y requerirán de disciplinas como la geología y la geografía.
- La innovación es inherente a la investigación científica que requiere como fundamento las ciencias básicas. Para ello se requieren un proceso de décadas con un principio básico: en el método científico no existen verdades absolutas, sino certezas temporales y los resultados tienen que ajustarse continuamente.

## Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

## Referencias

- Agoris, D., Charalambakos, V., Pyrgloti, E., Grzybowski, S. (2004). A computacional approach on study of Franklin rod height impact on striking distance using a stochastic model. *J. Electrostatics*, **60**: 175-181.
- Albrecht, R. (2016). Where are the lightning hotspots on Earth? AMS.
- Anderson, R., Eriksson, A. (1980). Lightning parameters for engineering application. *Electra* **69**: 65-102.
- Aranguren, D. (2011). Desempeño de sensores de campo electrostático en sistemas de alerta de tormentas”, tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Aranguren, D., Montanyà, J., Torres, H., Solà, G., March, V., Romero, D. (2009). On the lightning hazard warning using electrostatic field: analysis of summer thunderstorms in Spain. *J. Electrostatic* **67**: 507-512.
- Aranguren, D., Lopez, J., Inampues, J.C., Torres, H., Betz, H. (2016). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **154**: 182-189.
- Berger, K., Anderson, R B., Kroninger, H. (1975). “Parameters of lightning flashes”. *Cigre Electra*, **41**: 23-37.
- Codazzi, A. (1960). Resumen de la geografía de Venezuela. Paris, 1841. Imprenta Fournier, Bancroft Library.
- Conti, E., Perez, E., Soto, F., Silveira, S., Visacro, H. Torres, H. (2010). Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines Including Insulation Breakdown. *Journal IEEE Transactions on Power Delivery*, **25**: 3078-3084.
- Cole, P., Krehbiel, T.J., Henebry, G.M. (2016). Web-Enabled Landsat Data Time Series for Monitoring Urban Heat Island Impacts on Land Surface Phenology. *IEEE Journal Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **9**: 2043-2050.
- Cooper, M.A., Holle, R.L., Andrews, Ch. (2010). Distribution of lightning injury mechanism. *Proceeding 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. doi: 10.1109/ICLP.2010.7845948, pp. 1- 4.
- Cooray, V. (2003). The lightning flash. *Institution of Electrical Engineers*. London, UK.
- El Popol Vuh. (1975) Ed. Ariel, pp. 12-14.
- Herrera, J. (2006). Nuevas aproximaciones en el cálculo de tensiones inducidas por descargas eléctricas atmosféricas. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Humboldt, A., Bonpland, A. (1956). Viaje a las regiones equinociales del Nuevo Continente. Tomo III, pp 226. Traducción de Lisandro Alvarado.
- IEC Standard 62305-2(Ed.3) on Protection against lightning, 2013.
- Inampues, J.C. (2014). Predicción contra rayos y redes inteligentes. Tesis MSc., Universidad Nacional de Colombia – Bogotá.
- Lee, L.C., Lim, K., Meiappa, M., Liew, A. C. (1979). Determination of Lightning Current Using Frame Aerials. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **98**: 1669-1675. doi: 10.1109/TPAS.1979.319485
- Lope de Vega y Carpio. (1598). La Dragontea, al Príncipe nuestro Señor, en Valencia por Pedro Patricio Mev. Ayuntamiento de Madrid, España.

- López, J.** (2011). Metodología para predicción de tormentas eléctricas a partir de mediciones de campo electrostático ambiental y sistemas de localización de rayos en zona montañosa”, MSc tesis, UN Manizales.
- Lupo, G., Petrarca, C., Tucci, V., Vitelli, M.** (2000). EM fields associated with lightning channels: on the effect of tortuosity and branching” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, **42**: 394- 404.
- MacGorman, D., Rust, W.** (1998). The Electrical Nature of Storms. Oxford University Press. New York, New York.
- Norma Técnica Nacional.** NTC 4552 (2008). Protección contra descargas eléctricas atmosféricas, ICONTEC, Bogotá.
- Pérez, E.** (2006). Avances en el modelamiento y experimentación de tensiones inducidas en redes de distribución. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Petrov, N., Petrova, G., D’Alessandro, F.** (2003). Quantification of the probability of lightning strikes to structures using a fractal approach. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **10**: 641- 654.
- Pinto, O.** (2013). Lightning and climate: A review. Proceeding International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA). doi: 10.1109/SIPDA.2013.6729250. pp. 402-404.
- Rakov, V., Uman, M.** (2003). Lightning: physics and effects” Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Rakov, V.A.** (1992). Data acquired with the LLP lightning locating systems. Meteor. Hidrol. **7**: 105-114.
- Romps, D.M., Seeley, J.T., Vollaro, D., Molinari, J.** (2014). Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. Science **346**: 851-854. doi: 10.1126/science.1259100.
- Sagan, C.** (1985). Cosmos, Ed. Planeta, p. 38.
- Silveira, F. Visacro, S., Herrera, J., Torres, H.** (2008). Evaluation of Lightning-Induced Voltages over Lossy Ground by the Hybrid Electromagnetic Model. Trans Electromagnetic Compatibility IEEE, TEMC-130-2008.R1.
- Soto, E.** (2015). Lightning induced voltages on overhead distribution networks placed over non-flat terrains. Tesis doctoral, UN Manizales.
- Torres, H.** (1998). Espacio y tiempo en los parámetros del rayo, ensayo sobre una hipótesis de investigación. Trabajo de investigación presentado a la Universidad Nacional de Colombia para promoción a la categoría de Profesor Titular. Bogotá.
- Torres, H.** (2010) ¿Qué rayos sabemos? Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat., **34** (131): 193-208.
- Torres, H.** (2015). El rayo en el trópico. Colección apuntes maestros, Ed. UN, Bogotá, Colombia.
- Torres, H.** (2002). El Rayo, Mito, Ciencia y Tecnología. Unibiblos, Bogotá, 2002.
- Torres, H.** (2010). Protección contra rayos – 2a Edición. Editorial ICONTEC, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Torres, H.** (2014). ¿Qué rayos sabemos sobre innovación tecnológica? Ed. Orvisa, Bogotá, Colombia.
- Torres, H., Perez, E., Younes, C., Aranguren, D., Montaña, J., Herrera, J.** (2015). Contribution to lightning parameters study based on some American Tropical Regions observations. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, **8**: 4086-4093. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2428217
- Torres, H., Rojas, J.** (2003). Los rayos, efectos biológicos y prevención. Revista Innovación y Ciencia, **11**: 32-40.
- Torres, H., Rondon, D., Briceño, W., Barreto, L.** (1996). Lightning peak current estimation analysis from field measurements in tropical zones. Proceedings 23rd. ICLP, Florence, Italy, Sep.
- Vargas, M.** (2006). Nuevo modelo integral del Canal de la Descarga Eléctrica Atmosférica y su enlace con estructuras en tierra”, Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia – Bogotá.
- Vargas, M., Torres, H.** (2008). Lightning leader model for straight, tortuous or branched channels – Part I: Model description. J. Electrostatic, **66**: 482-488.
- Vargas, M., Torres, H.** (2008). Lightning leader model for straight, tortuous or branched channels – Part II: Model results. J. Electrostatic, **66**: 489-495.
- Visacro, S., Soares, A.** (2004). Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station. Journal of Geophysical Research, **109**, D01105, doi: 10.1029/2003JD003662
- Whipple, F.J.W.** (1929). On the association of the diurnal variation of electric potential in the weather with the distribution of thunderstorms over the globe. Quart. J. Roy. Met. Soc., **55**: 1-17.
- Williams, E., Stanfill, S.** (2002). The physical origin of the land-ocean contrast in lightning activity. Comptes Rendus-Physique, **3**: 1277-1292, 2002.
- Wilson, C. T. R.** (1920). Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorm. Philos. Trans. A., **221**: 73-117.
- Younes, C.** (2006). Metodologías para la correlación de parámetros del rayo con características geográficas y meteorológicas. Caso colombiano, tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2006.
- Zavrostky, A.** (1991). Carta Ecológica. Ediciones ULA N° 56. Mérida, Venezuela.

# Diferenciación temporal del perfil genético de la población de gatos de Cali, Colombia, en las últimas décadas

Andrés F. Peña-Cruz, Angie Patiño-Montoya\*

Grupo de Investigación en Ecología Animal, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia

## Resumen

En varios estudios se ha sugerido que variables como la intervención humana y el tiempo no generan cambios estadísticamente significativos en los perfiles genéticos de las poblaciones del gato doméstico, lo cual explicaría por qué la mayoría se encuentra en panmixia. Sin embargo, en pocos estudios se ha determinado el perfil genético de ciertas poblaciones más de dos veces en un lapso de varios años, por lo que no hay argumentos suficientes para concluir que el tiempo no afecta significativamente los perfiles de las poblaciones. Además, debe mencionarse que existen diferentes procesos estocásticos que actúan sobre cada uno de ellos. Ahora bien, la ciudad de Cali, Colombia, es una de las pocas en Latinoamérica en donde se ha establecido el perfil genético de los gatos en varias ocasiones (1999 y 2012). En el presente estudio se hizo un muestreo para establecer el perfil genético de dicha población durante el 2015. Se hicieron comparaciones mediante pruebas de chi cuadrado entre los periodos mencionados (1999 Vs. 2012, 1999 Vs. 2015 y 2012 Vs. 2015), y se estableció que no hubo cambios estadísticamente significativos entre ellos, aunque se registraron variaciones considerables en las frecuencias de los alelos *White Spotting* (*S*) y *siamese* (*c\**). Por otro lado, el árbol de distancias genéticas dendograma demostró que los perfiles de los años 2012 y 2015 fueron más similares en comparación con el de 1999. En este contexto, se sugiere que los efectos estocásticos, así como los de la selección humana y el factor tiempo son despreciables. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Gato doméstico; Perfil genético; Marcadores fenotípicos; *Felis catus*.

## Temporal differentiation of the genetic profiles of the cat population in Cali, Colombia, during the last decades

### Abstract

Several studies have suggested that variables such as human intervention and time do not generate statistically significant changes in the genetic profiles of domestic cat populations, which would explain why most are in panmixia. However, few studies have determined the genetic profile of certain populations more than twice over a period of several years, so there is insufficient evidence to conclude that time does not affected population profiles significantly. Also, it should be mentioned that there are different stochastic processes acting on each of these. The city of Cali, Colombia, is one of the few Latin American cat populations whose genetic profile has been established on several occasions (1999 and 2012). Therefore, in the present study we conducted a sampling to establish the genetic profile of this population during 2015. We compared the above-mentioned periods through chi-square tests, and we established that there were no statistically significant changes among them. However, there were considerable variations in the allele frequencies of *White Spotting* (*S*) and *siamese* (*c\**). On the other hand, the genetic distances tree dendrogram showed that 2012 and 2015 profiles were more similar than the 1999 profile. In this context, it is suggested that the stochastic effects, the human selection, and time were despicable. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Domestic cat; Genetic profile; Phenotypic markers; *Felis catus*.

## Introducción

El gato doméstico (*Felis catus*) ha sido un organismo modelo ampliamente usado en genética de poblaciones debido a la facilidad con la que pueden identificarse el genotipo y fenotipo de un grupo de genes de herencia mendeliana que determinan el color, patrón de coloración y largo del pelaje, además de algunas anomalías esqueléticas (Lloyd, 1985; Ruiz-García, 1997; Kaelin y Barsh, 2013). A partir de estos se ha caracterizado el perfil genético de

más de 400 poblaciones a nivel mundial y así mismo se ha permitido trazar diversos procesos de migración humana (Todd, 1977; Ruiz-García y Álvarez, 2000; Ruiz-García y Álvarez, 2008). Pese a lo mencionado anteriormente,

### \*Correspondencia:

Angie Patiño-Montoya, [angie.patino@correounivalle.edu.co](mailto:angie.patino@correounivalle.edu.co), [angie.patino317@gmail.com](mailto:angie.patino317@gmail.com)

Recibido: 19 de enero de 2017

Aceptado: 18 de abril de 2017

algunos estudios como el de **Clark** (1975) muestran que la evidente preferencia humana por ciertos fenotipos de estos felinos podría modificar de manera artificial los perfiles de las poblaciones, lo cual lo llevó a sugerir que el gato doméstico no es un organismo modelo útil en genética de poblaciones. Sin embargo, el mismo **Clark** (1975) muestra que la mayoría de poblaciones estudiadas hasta el momento han demostrado estar en panmixia, lo cual podría contradecir el proceso de selección artificial. En este contexto se hace de interés determinar qué efecto tiene la preferencia humana de ciertos fenotipos y que procesos ocurren para mantener el estado panmítico de las poblaciones. Además, otros estudios como el de **Robinson** (1985), **Ruiz-García y Klein** (1997) y **Ruiz-García y Álvarez** (2000) resaltan que la compleja estructura social de esta especie cosmopolita, junto con el evidente apareamiento aleatorio y el elevado flujo génico entre y dentro de poblaciones favorecen que el gato doméstico sea útil en estudios de genética poblacional.

En el caso de las poblaciones latinoamericanas, diversos estudios han demostrado un estado panmítico en ellas, no siendo la excepción Colombia, cuyas 22 poblaciones urbanas de gatos caracterizadas (**Ruiz-García y Álvarez**, 1999; **Peñuela y Cárdenas**, 2012; **Pardo, et al.** 2014; **Peña, et al.** 2015; **Montes-Díaz, et al.** 2015; **Pardo, et al.** 2015; **Peñuela, et al.** 2016, **Pardo, et al.** 2016) han demostrado estar en panmixia y por ende en equilibrio Hardy-Weinberg según los análisis entre las frecuencias observadas y esperadas de los *loci Orange* y *White Spotting*, no obstante, un estudio realizado por **Peña, et al.** (2015) sugiere que a nivel microgeográfico existen procesos estocásticos que pueden modificar significativamente el perfil genético y con ello generar un desequilibrio H-W, el cual no necesariamente es causado por un apareamiento no aleatorio.

Ahora bien, el perfil genético de la población urbana de gatos en la ciudad de Cali ha sido caracterizado por **Ruiz-García y Álvarez** (1999), posteriormente fue caracterizado por **Peña, et al.** (2015) y **Peñuela, et al.** (2016) hacia el año 2012. Hasta el momento no se han reportado frecuencias de los alelos causantes de color café o "Brown", ni del patrón abisiano (*Ticked abyssinian*), ni del Manx o cola corta. Además, la población ha presentado un estado panmítico, con poca variación en las frecuencias de los alelos mutantes de los *loci Orange*, *Dilution*, *Agouti*, *Tabby*, *White spotting*, *Dominant White* y *Color repart* (serie albina, incluye el patrón *siamese*). En este contexto, se hace interesante determinar si existen diferencias significativas en las frecuencias de estos alelos a través del tiempo, pues según como lo sugiere **Ruiz-García y Álvarez** (2008) los perfiles tienden a mantener su estabilidad genética en el caso de las poblaciones de gatos, reflejando frecuencias similares a las de las poblaciones origen. Con base en esto, el presente estudio ha determinado el perfil genético de la población urbana de gatos de Cali (Colombia) en el año 2015 con el objetivo de identificar si existen diferencias significativas entre las frecuencias de los años 1999, 2012 y las reportadas para el presente estudio.

## Materiales y métodos

**Marcadores fenotípicos.** Siguiendo la nomenclatura propuesta por el **Committee on Standardized Genetic Nomenclature for Cats** (1968) se registraron un total de ocho *loci*: *Orange* vs. *no-orange* (*O*, *o*); *Agouti* vs. *no-agouti* (*A*, *a*); *Tabby Mackerel* o *atigrado* vs. *Tabby Blotched* (*t<sup>+</sup>*, *t<sup>b</sup>*); *Full color* vs. *dilution* (*D*, *d*); *Pelo corto* vs. *Pelo largo* o *long hair* (*L*, *l*); *White Spotting* o *manchado de blanco* vs. *no manchado* (*S*, *s*); *Dominant White* vs. *silvestre* (*W*, *w*) y *Silvestre* vs. *siamese* (*C*, *c<sup>s</sup>*). Cabe destacar que el *locus Orange* es ligado al sexo y su alelo dominante (*O*) es epistático al patrón *agouti* (*A*), a su vez el *no-agouti* (*a*) es epistático al patrón *Tabby* (*t<sup>+</sup>*, *t<sup>b</sup>*) por otro lado, el alelo *Dominant White* (*W*) es epistático frente al resto de *loci* relacionados con la coloración y patrón del pelaje.

**Definición del área y estrategia de muestreo.** Dentro del perímetro urbano de la ciudad de Cali (Colombia) se seleccionaron aleatoriamente un grupo de barrios con alta densidad de casas y de fácil acceso. En ellos se desarrolló el muestreo de los gatos durante el año 2015 mediante la observación directa de los individuos en las viviendas, tomando dato del sexo y determinando la presencia o ausencia de los diferentes alelos pertenecientes a los *loci* seleccionados para este estudio.

**Determinación de frecuencias alélicas y equilibrio Hardy-Weinberg.** Las frecuencias alélicas fueron estimadas asumiendo que existe equilibrio Hardy-Weinberg según la fórmula  $p^2+2pq+q^2=1$ , donde la frecuencia del alelo recesivo (*q*) de cada locus fue calculada como la raíz cuadrada del conteo de homocigotos recesivos de ese locus sobre el total de individuos, mientras que el dominante fue estimado como  $p=1-q$ . Ahora bien, dado que los *loci Orange* y *White Spotting* permiten la identificación de los fenotipos homocigotos y heterocigoto por observación directa, sólo es posible determinar si existe equilibrio Hardy-Weinberg en estos *loci*. Para ello se siguió la metodología de **Christensen** (2000) para el cálculo de las frecuencias genotípicas y de los valores de chi-cuadrado para probar la hipótesis de equilibrio H-W.

**Análisis del perfil genético en tres periodos de tiempo.** Para la comparación del perfil genético se usaron los alelos *no-agouti* (*a*), *dilution* (*d*), *Tabby blotched* (*t<sup>b</sup>*), *White* (*W*), *White spotting* (*S*), *siamese* (*c<sup>s</sup>*), *long hair* (*l*) y *Orange* (*O*) en tres diferentes periodos de tiempo. El primer periodo, reportado por **Ruiz-García y Álvarez** (1999), representó el perfil genético del año 1999, el segundo reportado por **Peña, et al.** (2015) representó al año 2012, pues fue durante este periodo de tiempo que se realizó el muestreo de los individuos. Finalmente, el tercer periodo correspondió al muestreo realizado durante el año 2015 que es presentado en este estudio. Debe aclararse que no se tuvo en cuenta el estudio de **Peñuela, et al.** (2016) pese a que también reportó el perfil genético de la población de gatos de Cali, esto debido a que se estableció en el mismo año que se realizó el trabajo de **Peña, et al.** (2015), por lo que sería redundante para el análisis colocar dos perfiles pertenecientes al mismo

año, además la metodología de muestreo usada por **Peñuela, et al.** (2016) no es totalmente comparable con la de **Ruiz-García y Álvarez** (1999) y **Peña, et al.** (2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecieron tres comparaciones (1999 vs. 2012; 1999 vs. 2015; 2012 vs. 2015) en las que se realizó una prueba de chi-cuadrado para cada uno de los alelos previamente mencionados. De este modo cada una de las tres comparaciones de tiempo tuvieron 8 pruebas de chi-cuadrado referentes a los 8 alelos. Para cada prueba, se definió que la frecuencia esperada correspondía a la del año más antiguo, mientras que la frecuencia observada a la del año más reciente. Por otro lado, se estimaron las distancias genéticas entre los perfiles de los tres periodos de tiempo bajo el modelo de **Nei** (1972), graficándose un cluster con el algoritmo UPGMA en el programa MEGA@6 (**Tamura, et al.** 2013).

### Resultados

Un total de 340 individuos fueron identificados en la población de Cali para el periodo de 2015. De los cuales 51,5% (175 individuos) fueron hembras y 48,5% (165 individuos) fueron machos, demostrándose una igualdad porcentual entre individuos de ambos sexos. Las frecuencias obtenidas para los alelos identificados en la población de Cali del 2015 se reportan en la Tabla 1. En ella se puede observar con respecto al periodo de tiempo inmediatamente anterior que no existe una variación notable en las frecuencias, con excepción del alelo *White Spotting* (S). En general, la comparación de 2012 vs. 2015 muestra un ligero aumento en la frecuencia del alelo *dilution* (d), *Tabby blotched* (t<sup>b</sup>), *Dominant White* (W) y así mismo se observa una ligera disminución en las frecuencias del patrón *no-agouti* (a), *siamese* (c<sup>s</sup>), *long hair* (l) y *Orange* (O).

De otra parte, se demostró que las frecuencias observadas se ajustaron a las frecuencias esperadas para el locus *Orange* ( $X^2= 4,32$ ;  $p= 0,12$ ), lo cual sucedió también para el locus *White Spotting* ( $X^2= 2,49$ ;  $p= 0,29$ ), demostrándose a partir de ambos loci que la población de gatos domésticos de la ciudad de Cali del año 2015 se encuentra en equilibrio Hardy-Weinberg (ver tabla 2). En cuanto a los análisis de chi-cuadrado (tabla 3), debe mencionarse que ninguna frecuencia alélica ha mostrado cambios estadísticamente significativos entre los periodos de tiempo evaluados, sin embargo, hay diferencias considerables en la frecuencia del alelo *White Spotting* (S) entre los periodos 1999-2012 y 2012-2015, así como también se determinó con el alelo *siamese* (c<sup>s</sup>) entre 1999-2012. Los cambios más leves en las frecuencias se registraron para el *no-agouti* (a) durante 1999-2012 y 2012-2015, *White Spotting* (S) entre 1999-2015 y *Dominant White* (W) entre 2012-2015.

El dendograma de distancias genéticas (figura 1) determinó que los perfiles de la población de gatos de Cali de los años 2012 y 2015 son bastante semejantes, lo cual es congruente con el hecho que son periodos de tiempo muy cercanos, mientras que el perfil genético del año 1999 forma

una rama externa con el grupo 2012-2015. Estos resultados en conjunto con las comparaciones realizadas con chi-cuadrado muestran que evidentemente hay un cambio en las frecuencias alélicas de los tres periodos pese a que no sea estadísticamente significativo.

### Discusión

En estudios de genética poblacional de gato doméstico, se asume que las diferencias en las frecuencias alélicas dentro y entre las poblaciones, son causadas por el hombre (**Aguirre, 2007**; **Ruiz-García y Álvarez, 2000**). La variación no significativa de las frecuencias alélicas encontradas en el presente trabajo, evidencia que las personas no influyen directamente la frecuencia de los caracteres fenotípicos; como se postula en la teoría de selección por novedad (**Ruiz-García y Álvarez, 2000**). Por el contrario, los resultados de las pruebas de chi-cuadrado, soportan la hipótesis de

**Tabla 1.** Frecuencias alélicas de ocho marcadores fenotípicos del pelaje en gato doméstico (*F. catus*) de la ciudad de Cali en tres años.

	1999 n= 280	2012 n= 263	2015 n= 340
<b>a</b>	0,8390	0,7449	0,7227
<b>d</b>	0,4710	0,3273	0,4060
<b>t<sup>b</sup></b>	0,1800	0,2329	0,2616
<b>W</b>	0,0054	0,0153	0,0178
<b>S</b>	0,3190	0,6531	0,3411
<b>c<sup>s</sup></b>	0,2690	0,4383	0,3865
<b>l</b>	0,3300	0,4834	0,4537
<b>O</b>	0,1930	0,2481	0,2294

n= número de muestras a= Agouti, d= dilution, t= tabby blotched, W= dominant white, S= white spotting, C = Colour repeat, l= long hair O= orange

**Tabla 2.** Demostración de equilibrio H-W calculado para los locus Orange (O) y White Spotting (S) en la población de gatos domésticos (*F. catus*) en la ciudad de Cali para el año 2015.

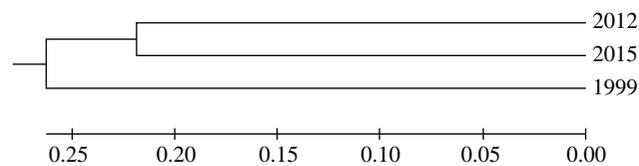
Locus	Fenotipo	Observado	Esperado	X <sup>2</sup>
<b>Orange</b> n= 327	Oy	41	36,02	0,69
	oy	116	120,98	0,21
	OO	12	8,95	0,73
	Oo	49	60,10	2,05
	oo	109	100,95	0,64
	<b>Total</b>		4,32	
	<b>p</b>			0,12
<b>White Spotting</b> n= 321	SS	31	37,35	1,08
	Ss	157	144,29	1,12
	ss	133	139,36	0,29
	<b>Total</b>		2,49	
	<b>p</b>			0,29

n: número de muestras, p: valor de significancia estadística.

**Tabla 3.** Valores de chi-cuadrado ( $X^2$ ) y p-valor obtenidos por cada frecuencia alélica en las tres comparaciones definidas para los tres periodos de tiempo.

	1999-2012		1999-2015		2012-2015	
	$X^2$	p-valor	$X^2$	p-valor	$X^2$	p-valor
<b>a</b>	0,01	0,92	0,02	0,90	0,00	0,98
<b>d</b>	0,04	0,83	0,01	0,92	0,02	0,89
<b>t<sup>b</sup></b>	0,02	0,90	0,04	0,85	0,00	0,95
<b>W</b>	0,02	0,89	0,03	0,87	0,00	0,98
<b>S</b>	0,35	0,55	0,00	0,97	0,15	0,70
<b>c<sup>s</sup></b>	0,11	0,74	0,05	0,82	0,01	0,94
<b>l</b>	0,07	0,79	0,05	0,83	0,00	0,97
<b>O</b>	0,02	0,90	0,01	0,93	0,00	0,97

$a$ = Agouti,  $d$ = dilution,  $t$ = tabby blotched,  $W$ = dominant white,  $S$ = white spotting,  $C$ = Colour repart.,  $l$ = long hair,  $O$ = orange

**Figura 1.** Dendrograma UPGMA generado a partir de las distancias genéticas de Nei (1972) obtenidos a partir del perfil genético de tres diferentes periodos de tiempo (1999-2012-2015) de la población urbana de gatos de la ciudad de Cali.

estabilidad genética, en la cual los perfiles genéticos de las poblaciones se mantienen constantes en el tiempo (Ruíz-García y Álvarez, 2008). Por lo tanto, los cambios aparentes en las frecuencias y lo observado en el dendrograma UPGMA, son resultado de procesos estocásticos ajenos a la intervención humana.

La conservación del perfil génico a pesar de un “aparente” proceso de selección artificial, se puede deber a la combinación de dos factores: la historia natural de la especie y la costumbre de cría del gato doméstico por parte de la sociedad Caleña. Estos factores estarían altamente correlacionados con el concepto de selección por novedad de Todd (1977). En cuanto a la estructura social de la especie, debe decirse en primer lugar que los machos tienen territorios de mayores tamaños que las hembras, siendo estas últimas las que exhiben un mayor grado de dispersión. En segundo lugar, la jerarquía de los machos se encuentra asociada a la estructura antropogénica donde se encuentren (Horn, *et al.* 2011). Además, la posibilidad que una hembra sea fecundada simultáneamente por varios machos, dada la promiscuidad de ambos sexos y el apareamiento entre parientes (Natoli y De Vito, 1991; Say, *et al.* 1999) puede facilitar un alto grado de dispersión de diferentes caracteres genéticos.

En cuanto a la costumbre de cría en la ciudad, debe mencionarse que el 50% de la población del gato doméstico de Cali se encuentra en los estratos bajos, los cuales presentan

una mayor fecundidad respecto al estrato alto y el promedio general de la ciudad, también es el grupo de la población que cuenta con una menor cantidad de individuos esterilizados (Cooperativa de Trabajo Asociado Prestadores de Servicios Agrupados, 2011). Esto sería un indicativo que la mayor parte de la población de estos felinos no se encuentra sometida a selección artificial, y el aporte que realizan los gatos de raza seleccionados no es significativo en la escala temporal del presente estudio.

En conclusión, las frecuencias alélicas de la población de gatos en la ciudad de Cali, no variaron de manera significativa en las últimas dos décadas debido al bajo control y selección de individuos por parte de las personas de la ciudad, que favorecen más a la especie para mantenerla en panmixia que bajo presiones de selección artificial. Aún existe un vacío en el conocimiento, que permita determinar el grado de selección artificial al que se pueden encontrar sometidas las grandes poblaciones de gatos urbanas Latinoamericanas, como parece postularse en todos los estudios de la variación genética del gato doméstico adelantados en estos lugares.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Stefania Cerón Realpe, Ingrid Jhoana López y Tatiana Bolaños por la colaboración brindada en el proceso de muestreo de los gatos durante el año 2015. También agradecemos a la Universidad del Valle y los dueños de las mascotas quienes permitieron que el registro de las mascotas fuera posible.

## Conflicto de intereses

No se presenta conflicto de intereses.

## Referencias

- Aguirre, E. (2007). Flujo génico: métodos para estimarlo y marcadores moleculares. En L. E. Eguarte, V. Souza, X. Aguirre (ed.). *Ecología molecular*. (pp. 49-61). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Christensen, A. (2000). Cats as an aid to teaching genetics. *Genetics*, **155** (3): 999-1004.
- Clark, J. (1975). The effects of selection and human preference on coat colour gene frequencies in urban cats. *Heredity*, **35** (2): 195-210.
- Committee on Standardized Genetic Nomenclature for Cats. (1968). Standardized genetic nomenclature for the domestic cat. *Journal of Heredity*, **59**: 39-49.
- Cooperativa de Trabajo Asociado Prestadores de Servicios Agrupados. (2011). Estudios de factibilidad para el centro de vigilancia y control de zoonosis y de protección animal del municipio de Cali. Zoonosis. Recuperado de [http://calisaludable.cali.gov.co/saludPublica/2012-Zoonosis/Documento\\_Centro\\_de\\_Zoonosis\\_Final.pdf](http://calisaludable.cali.gov.co/saludPublica/2012-Zoonosis/Documento_Centro_de_Zoonosis_Final.pdf)
- Horn, J.A., Mateus, N., Warner, R.E., & Heske, J.E. (2011). Home range, habitat use, and activity patterns of free-roaming domestic cats. *Journal of Wildlife Management*, **75** (5): 1177-1185.
- Kaelin, C., & Barsh, G. (2013). Genetics of pigmentation in dogs and cats. *Annual Review of Animal Biosciences*, **1** (1): 125-156.

- Lloyd, A.** (1985). Geographic distribution of mutant alleles in domestic cat populations of New England and the Canadian Maritimes. *Journal of Biogeography*, **12** (4): 315-322.
- Montes-Díaz, Y., Cardales-Barrios, Y., & Pardo-Pérez, E.** (2015). Análisis de la variabilidad genética de las poblaciones de gatos domésticos (*Felis catus*) mediante genes del pelaje en Cartagena, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, **39** (153): 520-526.
- Natoli, E., & De Vito, E.** (1991). Agonistic behaviour, dominance rank and copulatory success in a large multi-male feral cat colony (*Felis catus* L.) in central Rome. *Animal Behaviour*, **42** (2): 227-241.
- Nei, M.** (1972). Genetic distance between populations. *The American Naturalist*, **106** (949): 283-292.
- Pardo, E., Morales, J., & Cavadía, T.** (2014). Estudio de la diversidad genética de la población de gato doméstico (*Felis catus*) en Montería, Colombia. *Bistua*, **12** (2): 35-47.
- Pardo, E., Causil, L., & Rodríguez, A.** (2015). Estudio de la diversidad genética de gato doméstico (*Felis catus*) mediante genes asociados al color del pelaje en Lorica-Córdoba, Colombia. *Archivos de Zootecnia*, **64** (248): 389-395.
- Pardo, E., Montes, Y., & Cardales, Y.** (2016). Variabilidad genética del gato doméstico (*Felis catus*) en Magangué, Bolívar, Colombia. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, **27** (2): 277-287.
- Peña-Cruz, A.F., Sandoval Arango, S., Patiño Montoya, A., Bedoya, M., Rodríguez, A., Orjuela, J., Ortega, A., López, J., Molina Henao, E., Guzmán, A., Gil, J., & Cárdenas Henao, H.** (2015). Análisis genético de la población de gatos del norte y sur de Cali, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, **20** (1): 111-118.
- Peñuela, M., & Cárdenas, H.** (2012). Marcadores genéticos del pelaje en gatos domésticos de Capurganá-Colombia. *Momentos de Ciencia*, **9** (1): 28-33.
- Peñuela, M., Pardo, E., García, V.H., & Cárdenas, H.** (2016). Marcadores genéticos del pelaje del gato doméstico *Felis catus* (Felidae) del suroccidente colombiano. *Revista MVZ Córdoba*, **21** (2): 5390-5403.
- Robinson, R.** (1985). The domestic cat in genetic research. *Trends in Genetics*, **1** (1): 236-239.
- Ruiz-García, M.** (1997). Genetic relationships among some new cat populations sampled in Europe: a spatial autocorrelation analysis. *Journal of Genetics*, **76** (1): 1-24.
- Ruiz-García, M., & Klein, K.** (1997). Genetic structure of populations of the domestic cat in Catalonia (Spain) and upper Midwestern USA: a microgeographic and macrogeographic study. *Journal of Genetics*, **76** (2): 99-115.
- Ruiz-García, M., & Álvarez, D.** (1999). Análisis filogenético de 21 poblaciones latinoamericanas de gatos mediante 10 loci morfológicos, utilizando métodos de matrices de distancias genéticas y de máxima parsimonia. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Biológica)*, **95** (3-4): 139-164.
- Ruiz-García, M., & Álvarez, D.** (2000). Genetic microstructure in two spanish cat populations. I: genic diversity, gene flow and selection. *Genes & Genetic Systems*, **75** (2): 269-280.
- Ruiz-García, M., & Álvarez, D.** (2008). A biogeographical population genetics perspective of the colonization of cats in Latin America and temporal genetic changes in Brazilian cat populations. *Genetics and Molecular Biology*, **31** (3): 772-782.
- Say, L., Pontier, D., & Natoli, E.** (1999). High variation in multiple paternity of domestic cats (*Felis catus* L.) in relation to environmental conditions. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, **266** (1433): 2071-2074.
- Tamura, K., Stecher, G., Peterson, D., Filipski, A., & Kumar, S.** (2013). MEGA 6: Molecular evolutionary genetics analysis version 6.0. *Molecular Biology and Evolution*, **30** (12): 2725-2729.
- Todd, N.** (1977). Cats and commerce. *Scientific American*, **237** (1): 100-107.

# Aspectos bioecológicos de la ostra de agua dulce *Acostaea rivoli* (Mollusca, Etheriidae) en el río Opia, Tolima, Colombia

Nohora Efigenia Gutiérrez-Hoyos<sup>1,\*</sup>, Edwin Orlando Lopez<sup>1</sup>, Gladys Reinoso-Florez<sup>1</sup>,  
Jesús Manuel Vásquez-Ramos<sup>2</sup>, Francisco Villa-Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Zoología, Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

<sup>2</sup>Universidad de Los Llanos, Grupo de Investigación Evaluación, Manejo y Conservación de Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros (GHIPES), Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Departamento de Biología y Química, Villavicencio, Meta, Colombia

## Resumen

La ostra de agua dulce *Acostaea rivoli* es una especie endémica de Colombia, que desempeña un papel ecológico relevante en el ecosistema acuático. El presente estudio se realizó en la cuenca del río Opia departamento del Tolima en los meses de septiembre y octubre de 2009, donde se establecieron 18 estaciones de muestreo, en cada una de las estaciones fueron empleados cuadrantes de 1m<sup>2</sup> distribuidos en diez transectos longitudinales. Adicionalmente, fue evaluada la distribución vertical entre 1 y 3 m de profundidad. Paralelamente se evaluaron variables fisicoquímicas in situ y se tomaron muestras de agua para la determinación de 12 variables fisicoquímicas. Para evaluar la relación entre la especie y las variables fisicoquímicas se realizó un análisis de componentes principales y una correlación de Spearman. Fueron observados 303 organismos, donde la mayor densidad se presentó en la estación Lorencito con 6,67 ind/m<sup>2</sup> y la menor densidad en las estaciones puente Doima, molino federal y quebrada Opia en donde no se registró ningún individuo. Con relación al perfil vertical la mayor densidad se presentó en el primer metro con 29,62 ind/m<sup>2</sup> y la menor en el tercer metro con 4,50 ind/m<sup>2</sup>. Las variables fisicoquímicas que influyeron de forma significativa en la distribución y densidad de la población fueron la alcalinidad ( $r=0,698$ ;  $p=0,001$ ), dureza ( $r=0,650$ ;  $p=0,004$ ), pH ( $r=0,714$ ;  $p=0,001$ ), cloruros ( $r= -0,530$ ;  $p=0,024$ ), fosfatos ( $r= -0,603$ ;  $p=0,008$ ), nitratos ( $r= -0,490$ ;  $p=0,039$ ) y coliformes totales ( $r= -0,540$ ;  $p=0,021$ ). Estas variables podrían estar relacionados con los procesos de mineralización de la cuenca, que junto con un alto porcentaje de calcio, una buena oxigenación del agua y un sustrato adecuado estarían relacionados con la presencia de esta especie en la zona de estudio. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Endémica; Ostra; Tolima; Variables fisicoquímicas.

**Bioecological aspects of the freshwater oyster *Acostaea rivoli* (Mollusca, Etheriidae) in the Opia river, Tolima, Colombia**

## Abstract

The freshwater oyster (*Acostaea rivoli*) is an endemic Colombian species that plays an important ecological role in the aquatic ecosystem. The present study was performed in the Opia river basin, in the Tolima department. 18 sampling stations were evaluated during September and October of 2009. In each location quadrants of 1 m<sup>2</sup> were distributed in ten longitudinal transects. Additionally, the vertical distribution was evaluated between 1 and 3 m deep. Parallely, water samples were taken to analyzed 12 physicochemical variables, some of them were evaluated in situ and the others in the laboratory. In order to identify the relationships between the population and the physicochemical variables a principal component analysis and a Spearman correlation were performed. A total of 303 individuals were observed, the greatest density was recorded in the sampling site Lorencito with 6.67 ind/m<sup>2</sup> and the lowest (0 ind/m<sup>2</sup>) was recorded in the sites Puente Doima, Molino el Federal and Quebrada Opia. As regards to the vertical profile, the highest density was registered in the first meter with 29.62 ind/m<sup>2</sup> and the lowest in the third meter with just 4.50 ind/m<sup>2</sup>. In relation to the water parameters, variables such as: alkalinity ( $r=0.698$ ;  $p=0.001$ ), hardness ( $r=0.650$ ;  $p=0.004$ ), pH ( $r=0.714$ ;  $p=0.001$ ), chlorides ( $r= -0.530$ ;  $p=0.024$ ), phosphates ( $r= -0.603$ ;  $p=0.008$ ), nitrates ( $r= -0.490$ ;  $p=0.039$ ) and total coliforms ( $r= -0.540$ ;  $p=0.021$ ) were significantly correlated with population's abundance and distribution. These variables could be related to mineralization processes in the basin, that combined with high values of calcium, high levels of water oxygen and proper habitats would allow this specie to inhabit the study area. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Endemic; Oyster; Tolima; Physicochemical variable.

## \*Correspondencia:

Nohora E. Gutiérrez Hoyos, [nohoragutierrezhoyos@outlook.com](mailto:nohoragutierrezhoyos@outlook.com); **Recibido:** 09 de mayo de 2016; **Aceptado:** 30 de mayo de 2017

## Introducción

Los moluscos son de gran importancia para el hombre, por ser un recurso económico y gastronómico explotable. Además, son relevantes en el ecosistema acuático porque son buenos indicadores del estado y funcionamiento de los ecosistemas, debido a que son sensibles a las variaciones del medio ya que dependen de ciertas variables fisicoquímicas para su desarrollo (Strayer, 2008).

En Colombia su uso como fuente de alimento se hace casi exclusivamente en forma artesanal en las zonas costeras. Un grupo relevante entre los moluscos son los bivalvos, entre los que sobresale la ostra de agua dulce (*A. rivoli*) registrada en el río Opia y endémica de la cuenca del río Magdalena (López, Vásquez, Reinoso, Vejarano & García, 2009). En el departamento del Tolima esta especie se explota a nivel turístico y alimenticio (López, *et al.*, 2009).

Esta especie pertenece al orden Unionoidea, comúnmente conocido como mejillones u ostras de agua dulce, este orden es muy diverso y cuenta con más de 150 géneros distribuidos en todos los continentes salvo en la Antártida (Haas, 1969). Este orden está catalogado a nivel mundial por los malacólogos como “en peligro” dado que tiene un valor extremadamente interesante desde la perspectiva biológica, ya que posee un único ciclo de vida que incorpora cuidado parental y parasitismo larval en peces (López, *et al.*, 2009).

La mayoría de los trabajos realizados sobre *A. rivoli* son muy antiguos y en la actualidad no se cuenta con trabajos ecológicos y mucho menos sobre el estado de la población. Según Granados (1973), los reportes más antiguos que se tienen son las publicaciones realizadas por Ferussac (1823), d'Orbigny (1851) y Yonge (1978) quienes hacen una descripción morfológica de la especie, hablan sobre la procedencia de las conchas y sobre la evolución de la familia Etheriidae. Granados (1973) realizó averiguaciones de posibles sitios en donde pudo existir o existen individuos de *A. rivoli*, determinando su distribución geográfica, así como algunos aspectos morfológicos y ecológicos.

Laverde (1982) reporto para Colombia algunos géneros de la familia Unionidae incluyendo a *A. rivoli*. Arteaga (1993), realizó un estudio en el que hace referencia al ciclo de vida de la ostra hasta su fase parasita (lasidium), denotando también algunos aspectos de su morfología, variables fisicoquímicas del hábitat y condiciones para su cultivo. Graf y Cummings (2006) en su trabajo dan algunos aspectos de distribución y diversidad del orden Unionoidea. Bogan y Hoeh (2000) hablan de las relaciones evolutivas entre los géneros de la familia Etheriidae.

Las valvas de *A. rivoli* se caracterizan por tener formas variadas de acuerdo a la superficie sobre la cual se han fijado, presentando generalmente asimetría entre las mismas, adquiriendo la valva fija la forma del sustrato al crecer sobre éste. La concha es de color verde oliva con líneas concéntricas bien definidas, cuya cara interna presenta una coloración gris metálico y se aprecia fácilmente en ellas la inserción tanto del músculo aductor como del manto.

En la charnela se puede observar un apéndice o gancho el cual puede ser indicador del tamaño de fijación al sustrato (Arteaga-Sogamoso, 1993). Yonge (1978) considera al gancho como la característica más llamativa de la concha, así como que la forma de la concha depende enteramente del hábitat donde crezca la ostra (Figura 1).

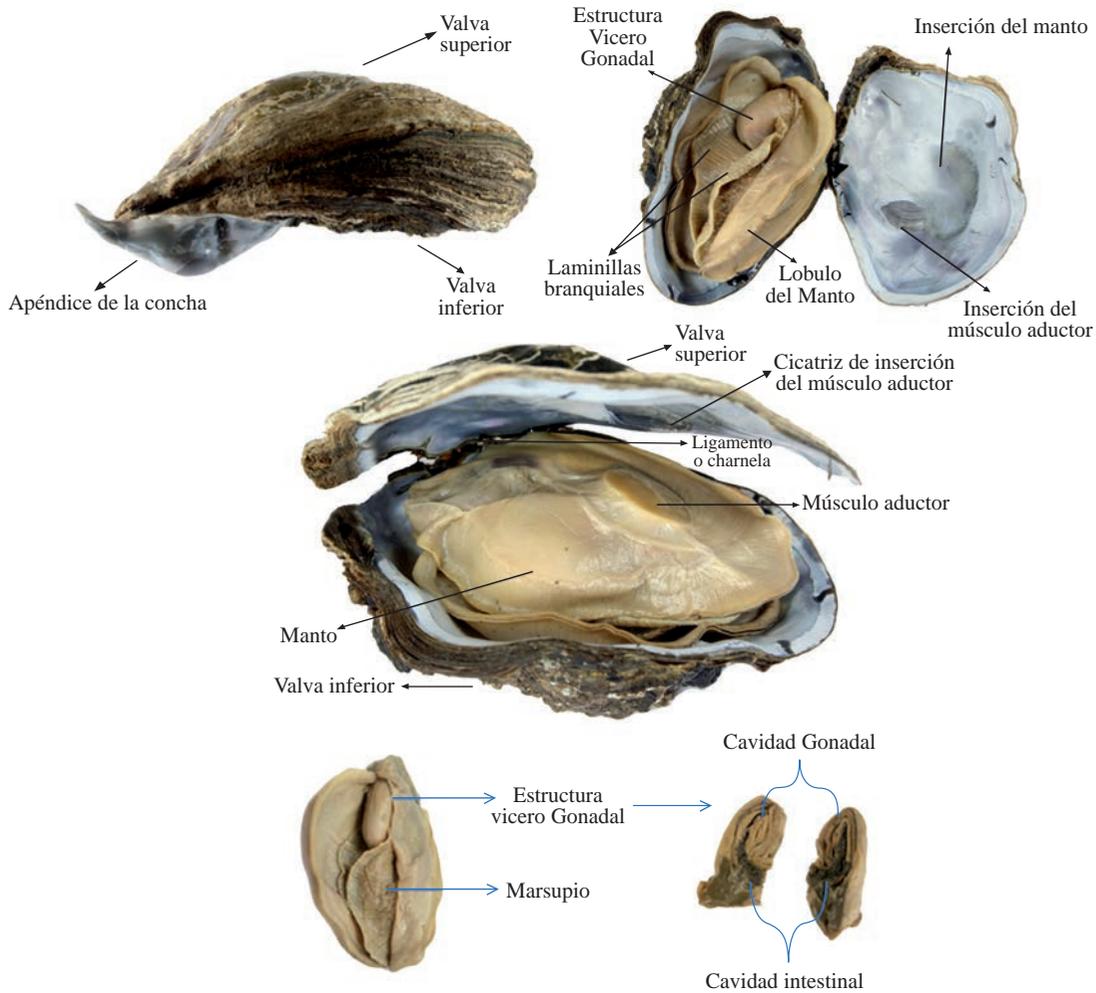
En la morfología interna de *A. rivoli* en el área central de la masa corporal, es posible distinguir fácilmente la presencia de un solo músculo aductor, el cual se haya fijado a las caras internas de las valvas. La presencia de un solo músculo aductor (monomiarianismo) es característico de la especie (Granados, 1973). La masa corporal se encuentra cubierta (excepto el músculo aductor) por los dos lóbulos del manto, que son libres y se extienden desde la parte dorsal cubriéndola en ambos lados (Arteaga-Sogamoso, 1993). *A. rivoli* se caracteriza por presentar sexos separados. Como en casi todos los bivalvos de agua dulce *A. rivoli* retiene sus embriones y huevos en un marsupio, el cual ocupa gran parte de la extensión dentro de las dos semi-branquias internas (Arteaga-Sogamoso, 1993).

*A. rivoli* solo ha sido reportada en el departamento del Tolima en los ríos Opia y Cunday (Bonetto, 1997), juega un papel ecológico importante en el ecosistema acuático, además de ser de gran relevancia por su uso comestible y artesanal. El estado actual de la población es completamente incierto debido a que se han realizado estudios de la especie desde hace más de 20 años. Por lo cual es de suma importancia evaluar el estado actual de la población, así como algunos aspectos ecológicos relevantes en la cuenca del río Opia, con el fin de proponer futuros estudios sobre su reproducción, aspectos tróficos, entre otros, que permitan un mayor conocimiento de la especie y a futuro poder generar planes y programas de conservación y manejo de la especie.

Con el fin de determinar el estado actual de la población, se hace necesario evaluar algunos aspectos ecológicos y ambientales que pueden relacionarse con la especie *A. rivoli*, por tal motivo se generaron las siguientes preguntas; 1. En qué condiciones (densidad y distribución) se encuentra la población de *A. rivoli* en la cuenca del río Opia, 2. Existen diferencias a lo largo del gradiente longitudinal de *A. rivoli* en la cuenca del río Opia y 3. Esta la distribución de *A. rivoli* determinada por las variables ambientales presentes en la cuenca del río Opia. Para resolver estas preguntas se evaluó la distribución espacial y vertical a lo largo de un gradiente longitudinal, así como las posibles relaciones entre *A. rivoli* y las variables fisicoquímicas de la cuenca del río Opia.

## Materiales y métodos

**Área de estudio.** La cuenca del río Opia se encuentra localizada al noroeste del departamento del Tolima, abarcando los municipios de Ibagué y Piedras. El área de la cuenca es de aproximadamente 325,16 km<sup>2</sup>, con una longitud aproximada de 65 km, una elevación media de 593,5 m y una pendiente superficial media de 18,60%, caracterizando el terreno como suavemente inclinado. Nace a los 1038 m de altura y desemboca (en el río Magdalena) a los 254



**Figura 1.** Características morfológicas externas e internas de *Acostaea rivoli* del río Opia.

m. La cuenca del río Opia se caracteriza por dos tipos de zonas de vida, el bosque húmedo pre-montano, el cual tiene una temperatura promedio de 18 a 24 C°, con promedios anuales de precipitación entre 1000 y 2000 mm anuales. La selección de las estaciones se llevó a cabo teniendo como base el área del río, la intervención antropogénica, el acceso al río, entre otros. Se determinaron 18 estaciones de muestro a lo largo de la cuenca desde los 230 m (desembocadura al río Magdalena) hasta los 936 m (Figura 2).

**Trabajo de campo.** Se llevó a cabo un muestreo de 12 días entre los meses de septiembre y octubre de 2009, donde se establecieron 18 estaciones de muestreo en las cuales se evaluó la distribución espacial y el tamaño de la población de *A. rivoli*. Adicionalmente, se realizó el conteo de los especímenes en 10 transectos longitudinales usando para ello un cuadrante de 1 m<sup>2</sup>, realizando un conteo visual por unidad de esfuerzo de acuerdo a la metodología propuesta por **Smith** (2006). Adicionalmente, se evaluaron profundidades de 1 a 3 m, dependiendo de las características del sitio de muestreo, con el fin de determinar la distribución vertical de la especie (**Krebs**, 1998).

En cada estación de muestreo paralelo a la colecta del material biológico se tomaron muestras de agua (4 litros), para la determinación de alguna variables fisicoquímicas del agua, tales como; temperatura, turbiedad, conductividad, dureza, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno, pH, alcalinidad, nitratos, nitrito, fosfatos, demanda química de oxígeno, sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos. Así mismo, fueron tomadas muestras de agua en frascos esterilizados para la evaluación de coliformes fecales y totales.

**Trabajo de laboratorio.** Los individuos fueron medidos y pesados para determinar la talla promedio; midiendo el ancho, alto y longitud de los individuos de *A. rivoli*. Se determinó el peso completo (concha y partes blandas), el peso de las partes blandas y el peso del complejo gonadal.

**Análisis de datos.** Para determinar la distribución espacial y vertical, se realizó un análisis descriptivo de los datos utilizando la densidad de la especie en cada una de las estaciones y profundidades evaluadas. Con el fin de determinar el estado de la población se establecieron tallas promedio y biomasa de los individuos. Para determinar

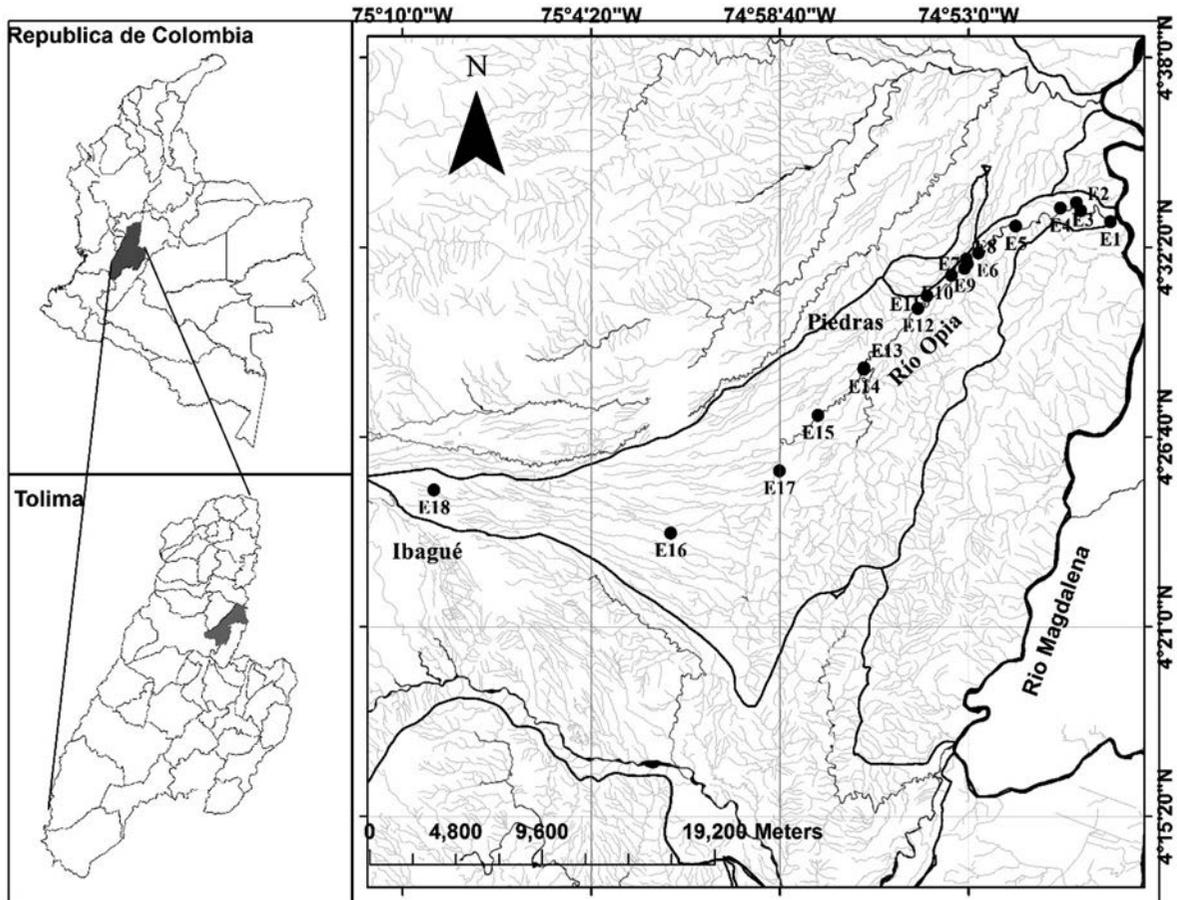


Figura 2. Estaciones de muestreo en la cuenca del río Opia-Tolima

diferencias estadísticas en las densidades de la especie en las diferentes profundidades se utilizó un análisis de varianza no paramétrico de Kruskal-Wallis. Con el fin de identificar las variables con mayor influencia sobre las dinámicas fisicoquímicas de la cuenca se realizó un análisis de componentes principales. Posteriormente, para determinar si existía alguna relación entre la densidad de *A. rivoli* y las variables fisicoquímicas se realizó un análisis de correlación de Spearman (no paramétrico) ya que las variables no presentaron una distribución normal. Las pruebas se realizaron mediante el paquete estadístico R usando la librería Vegan (R Development Core Team 2016).

## Resultados

**Distribución de la Población.** Se observaron 303 organismos en 18 estaciones. La mayor densidad se presentó en la estación Lorencito con 6,67 ind/m<sup>2</sup> y la menor en las estaciones Puente Doima, Molino Federal y Quebrada Opia con 0 ind/m<sup>2</sup> (Tabla 1). La mayoría de los individuos se encuentran viviendo por separado y ocasionalmente forman colonias en las que las ostras jóvenes se adhieren a las conchas de las ostras más viejas (Yonge, 1978). *A. rivoli* se encuentra en profundidades que varían entre 1 y 3 m, generalmente fijos sobre rocas cuyo diámetro varía entre 0,3

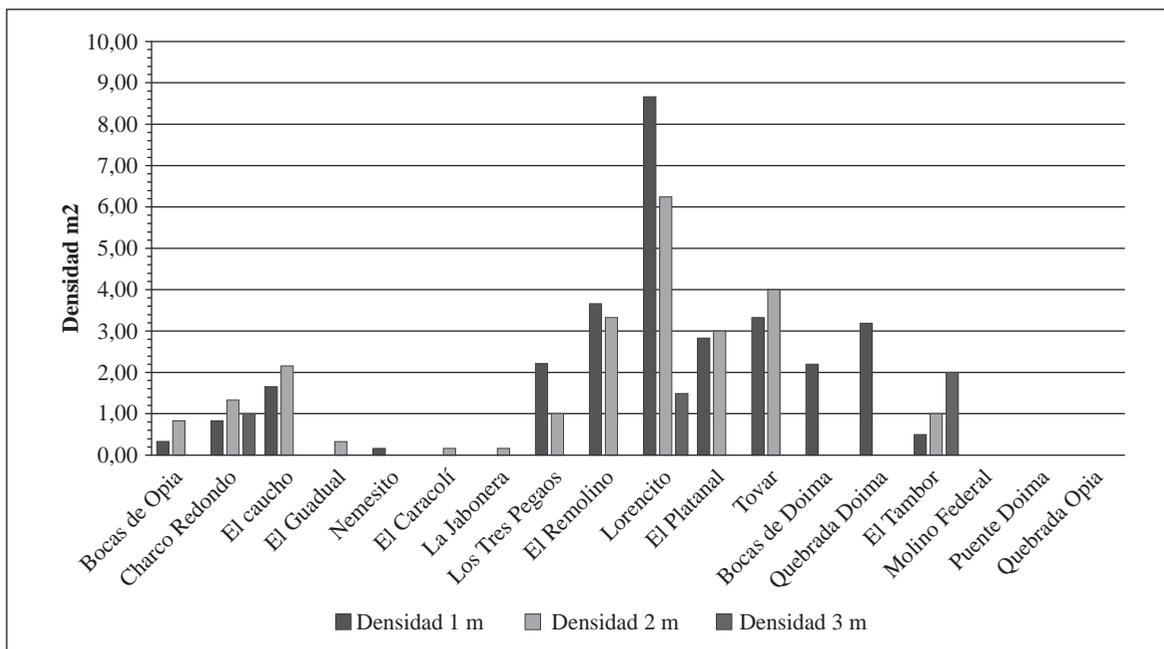
y 2 m<sup>2</sup>. En el perfil vertical la mayor densidad se presentó en el primer metro con 29, 62 ind/m<sup>2</sup> y la menor en el tercer metro con 4,50 ind/m<sup>2</sup> (Figura 3). La prueba de Kruskal-Wallis mostró diferencias significativas en la profundidad entre las estaciones (Test statistic = 11,9349, P-Value = 0,00256082) (Figura 4).

*Acostaea rivoli* presenta un rango de peso completo de 11,1 a 142,2 gr con un peso promedio de 50,61 gr (n=64). El rango de peso para las partes blandas es de 1,8 a 15,2 gr con un promedio de 8,04 gr (n=64). El rango para el complejo gonadal es de 0,5 a 4,7 gr con un promedio de 1,87 gr (n=64), siendo mayores los pesos en individuos maduros. El rango de talla oscilo entre 5,0 y 11,7 cm de longitud con un promedio de 8,1 cm (n=64), un rango de 3,1 a 7,3 cm de ancho con un promedio de 5,4 cm (n=64), y un rango de 1,5 a 4,8 cm de altura con un promedio de 2,5 cm (n=64).

**Aspectos fisicoquímicos y su relación con *Acostaea rivoli*.** El comportamiento de las variables fisicoquímicas de la cuenca del río Opia puede corroborarse con el análisis de componentes principales (ACP), el cual mostró que el factor 1 representa el 43,6% y el factor 2 el 23,4%, acumulando así el 67% de la variación total de los datos. El primer factor se caracterizó por variables como alcalinidad (0,933), dureza (0,99), turbidez (-0,93), nitratos (-0,99) y coliformes (-0,90).

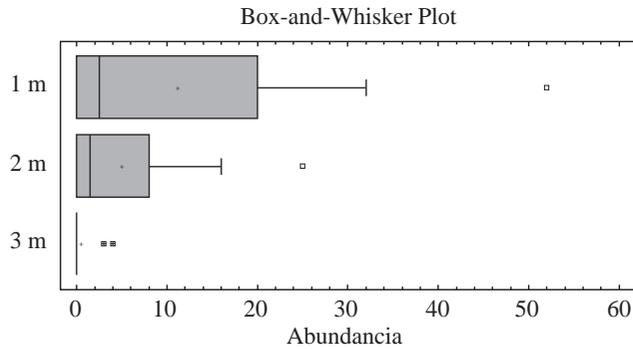
**Tabla 1.** Densidad de la población de *A. rivoli* en la cuenca del río Opia-Tolima.

Estación	Densidad (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Coordenadas
Bocas de Opia	0,77	230	4° 33' 05.7" N 74° 48' 44.1" W
El Caucho	0,80	263	4° 33' 25.4" N 74° 49' 37.8" W
Charco Redondo	1,93	267	4° 33' 39.9" N 74° 49' 45.6" W
El Guadual	0,16	277	4° 33' 30.2" N 74° 50' 14.5" W
Nemesito	0,17	321	4° 32' 58.0" N 74° 51' 34.7" W
El Caracolí	0,08	365	4° 32' 09.7" N 74° 52' 42.2" W
La Jabonera	0,08	375	4° 31' 58.6" N 74° 53' 03.9" W
Los Tres Pegaos	2,10	380	4° 32' 01.2" N 74° 53' 16.4" W
El Remolino	3,20	386	4° 32' 00.3" N 74° 53' 15.3" W
Lorencito	6,67	397	4° 31' 38.7" N 74° 53' 43.7" W
El Platanal	3,30	428	4° 31' 05.9" N 74° 54' 22.2" W
Tovar	3,60	432	4° 30' 37.1" N 74° 54' 43.5" W
Bocas de Doima	2,20	499	4° 28' 54.5" N 74° 56' 20.6" W
Quebrada Doima	3,20	501	4° 28' 55.6" N 74° 56' 18.6" W
El Tambor	0,93	541	4° 27' 17.4" N 74° 57' 22.5" W
Puente Doima	0,00	626	4° 25' 51.8" N 74° 58' 51.9" W
Molino Federal	0,00	689	4° 23' 58.3" N 75° 02' 08.2" W
Quebrada Opia	0,00	936	4° 25' 04.6" N 75° 09' 03.4" W

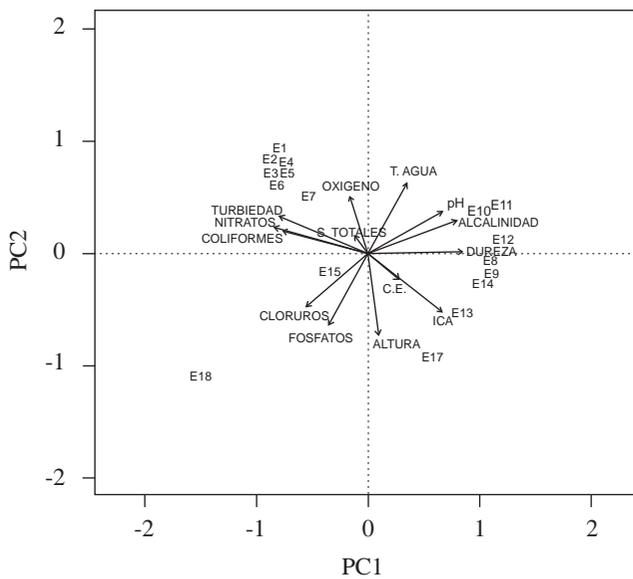
**Figura 3.** Densidad de la población de *A. rivoli* en el perfil vertical

El segundo factor solo aportó una variable nueva altura (-0,85). En el diagrama de ordenación se evidenciaron dos grupos, el primero ubicado a la izquierda, caracterizado por las variables coliformes, sólidos totales, turbidez y nitratos, en este grupo se encuentran las estaciones que tienen niveles elevados de estas variables, lo que puede significar gran

cantidad de materia orgánica en el cuerpo de agua. El grupo 2 ubicado a la derecha, está relacionado con las variables pH, alcalinidad y dureza, las estaciones que se asocian a estas variables son las que presentan los valores más altos, evidenciando así posibles procesos de mineralización en estas localidades (Figura 5).



**Figura 4.** Diagrama de caja y bigotes para la profundidad en las diferentes estaciones evaluadas. Se indica el valor promedio y el límite de confianza del 95%.



**Figura 5.** Diagrama de ordenación de las variables fisicoquímicas en los componentes I y II del análisis de componentes principales en la cuenca del río Opia.

Con el fin de determinar si existe alguna relación entre la densidad de *A. rivoli* y las variables fisicoquímicas se realizó un análisis de correlación de Spearman. Este análisis mostro una correlación significativa de la densidad con algunas variables. Se observó una correlación positiva con el pH, la conductividad, la alcalinidad y la dureza, todas con un coeficiente de correlación superior al 50%. Las variables cloruros, fosfatos, nitratos y coliformes presentaron una correlación negativa con la densidad y con coeficientes de correlación superiores al 50% (Tabla 2) (Figura 6).

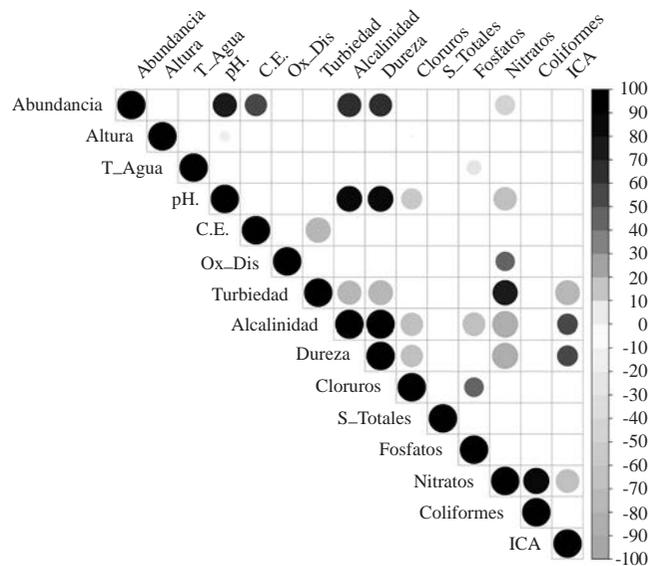
### Discusión

Con relación a la densidad de ostras por estación, la localidad que registró la mayor densidad fue la estación Lorencito, lo que probablemente está relacionado con sus características fisicoquímicas las cuales podrían ser adecuadas para el óptimo desarrollo de la especie (Strayer, 2008), pues

registró los valores más altos de dureza, alcalinidad y pH. Esta estación presentó una zona de bosque que que no ha sido muy impactada debido a que es de difícil acceso para el hombre, permitiendo que la población se encuentre en buenas condiciones. La baja densidad en Nemesito, Caracolí y la Jabonera probablemente se debe a que son estaciones cercanas al casco urbano, zonas impactadas por actividades agrícolas, turismo y sobre explotación de la especie. Las estaciones que no presentaron organismos son las de mayor altitud (626 a 936 m), las cuales presentan características topográficas distintas ya que son quebradas sin presencia de paredes inclinadas (peñas), por lo cual no hay presencia de un sustrato adecuado para el establecimiento de la especie.

**Tabla 2.** Correlación de Spearman entre las 18 variables fisicoquímicas y la densidad de *A. rivoli* en la cuenca del río Opia.

Variable	Spearman	p-valor
Altura (m)	-0,124	0,623
Temperatura agua	0,451	0,061
pH	0,714	<b>0,001</b>
Conductividad	0,600	<b>0,009</b>
Oxígeno disuelto	0,348	0,157
Turbiedad	-0,414	0,087
Alcalinidad	0,698	<b>0,001</b>
Dureza	0,650	<b>0,004</b>
Cloruros	-0,530	<b>0,024</b>
Sólidos totales	0,143	0,571
Fosfatos	-0,603	<b>0,008</b>
Nitratos	-0,490	<b>0,039</b>
Coliformes totales	-0,540	<b>0,021</b>
ICA	0,395	0,105



**Figura 6.** Gráfico de correlación de Spearman.

La cuenca del río Opia cuenta con una alta densidad de organismos según lo expuesto por **Villela y Smith** (2005), ya que la presencia de  $\geq 1$  ostra/m<sup>2</sup> es signo de alta densidad. El número de animales vivos es mayor en cuevas y en las grietas de las rocas, ya que son zonas de difícil acceso para el hombre (**Arteaga-Sogamoso**, 1993; **López, et al.**, 2009). Sin embargo la sobreexplotación a la que se ve sometida la especie como fuente de alimento puede llevar a una drástica disminución de su densidad, así como los impactos en el hábitat por extracción de agua para riego, adecuación de balnearios para recreación y a la contaminación de las aguas por aguas residuales y agrícolas (**Granados**, 1973; **Strayer**, 2008, **Bogan**, 2008).

La mayor densidad en el primer y segundo metro se debe probablemente a la oferta de alimento, ya que *A. rivoli* se alimenta de fitoplancton y este se encuentra en mayor número en la zona fótica. Durante el primer metro las comunidades fitoplanctónicas son más productivas ya que las condiciones de luz y temperatura son óptimas para su desarrollo (**Roldán & Ramírez**, 2008), proporcionando así, condiciones ideales para que la población de *A. rivoli* se establezca y desarrolle un gran número de individuos.

La gran densidad de organismos en el primer metro concuerda con lo reportado por **Granados** (1973) y **Yonge** (1978), quienes ubican a la especie en aguas poco profundas y rara vez a profundidades mayores a un metro. El tamaño de los ejemplares recolectados posiblemente está indicando que la población se encuentra envejecida, esto se debe a que la tasa de crecimiento del orden Unionidae es muy baja, los individuos crecen de 1 a 2 mm por año (**Neves & Moyer**, 1988) y al solo encontrarse organismos de tallas superiores a 5 cm podría indicar que la mayoría de los organismos son adultos, con una edad aproximada de 25 a 50 años.

El análisis de componentes principales muestra que existe una posible descarga de materia orgánica en las aguas del río Opia, provocando un incremento de microorganismos descomponedores que causan desequilibrios en el ecosistema, reflejando un cambio en la calidad del agua (**Roldán & Ramírez**, 2008). En el grupo de la izquierda (Figura 5) encontramos las estaciones que presentan una mayor actividad antrópica (Agricultura, descarga de aguas residuales, etc.) lo que ocasiona el incremento en los coliformes y una menor densidad de organismos. La dureza y la alcalinidad denotan procesos de mineralización de las aguas (**Ramírez & Viña**, 1998), por lo que en el río Opia, este proceso se presenta en mayor medida debido a su formación geológica (lecho de rocas y cantos rodados), que a su vez libera iones (carbonato de calcio) que aumentan el pH, dureza y alcalinidad del agua.

Las variables con correlación positiva en el análisis de Spearman, intervienen en los procesos de mineralización de la cuenca y denotan la cantidad de calcio disponible en el río, lo que afecta directamente a la especie. Después de la alimentación, los factores más importantes para los unionoides son el oxígeno para la respiración y el calcio para el

crecimiento de la concha. La dureza está directamente relacionada con la cantidad de calcio presente en el agua, por lo que valores mayores a 150 mgCaCO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup> denotan un agua dura.

El río Opia presentó un rango de agua de moderadamente dura a dura (143 a 192 mgCaCO<sub>3</sub>L<sup>-1</sup>), por lo que la presencia de calcita (CaCO<sub>3</sub>) está muy relacionada con la formación geológica, de la naturaleza del suelo y del grado de meteorización de las rocas. Todos estos factores ayudan a que en la cuenca el ión calcio sea elevado favoreciendo así la formación de las conchas en *A. rivoli* (**Roldán & Ramírez**, 2008). Los unionoides son capaces de sobrevivir en concentraciones de calcio <5 mg/L, sin embargo, concentraciones por debajo de 1 mg/L (aguas suaves) pueden afectar, disminuir y restringir la distribución de la población; algunas especies del orden se limitan exclusivamente a aguas ricas en calcio (**Strayer**, 2008). **Hunter** (1964) plantea que la concentración requerida para la mayoría de los moluscos es >20 mg/L, por lo que aguas duras pueden sostener mejor las poblaciones de moluscos.

La alcalinidad proporciona la acción buffer que amortigua cambios de pH en el agua; así, conociendo la alcalinidad de un cuerpo de agua se tiene una idea de la capacidad que tienen estos de mantener los procesos biológicos, además de una productividad constante y duradera (**Roldán & Ramírez**, 2008). El pH presentó un rango de 7,2 a 8,7 unidades tendiendo siempre a la alcalinidad. Las variaciones bruscas del pH afectan la flora y la fauna acuática al variar las concentraciones de carbono inorgánico total, los valores de pH por fuera de un rango entre 6,5 y 8 disminuyen la diversidad por estrés fisiológico (**Roldán & Ramírez**, 2008).

El pH al estar relacionado con la alcalinidad se comporta de forma estable a lo largo de las estaciones por lo que se encuentra en el rango aceptable para su supervivencia. Las características geológicas e hidrológicas de la cuenca permiten el establecimiento de *A. rivoli*, ya que las concentraciones de calcio son altas y permiten el sostenimiento de la especie, además la meteorización que ejerce el agua en las rocas permite que *A. rivoli* tome los iones necesarios para su formación y desarrollo.

Las variables con correlación negativa (fosfatos, nitratos y cloruros) son factores que se relacionan con la cantidad de nutrientes disponibles en el río, ya sea de forma natural o por escorrentía de los cultivos aledaños al este. La asociación de estas variables con la densidad de *A. rivoli* es inversamente proporcional. El aumento en la carga de materia orgánica y nutrientes puede provocar una disminución en las concentraciones de oxígeno, que puede ser suficiente para afectar a las ostras juveniles impidiendo su desarrollo (**McMahon & Bogan**, 2001).

La presencia de la especie en las estaciones parece estar relacionada con la dureza y consistencia del sustrato. **Strayer** (2008) expone que sustrato adecuado es aquel que proporcione soporte (suficientemente firme para la fijación), que sea estable (que permanece en su lugar durante las inundaciones) y por donde hay flujo de alimentos y materiales

esenciales (oxígeno, calcio, etc). La cuenca del río Opia al tener formaciones rocosas denominadas peñas en la mayor parte de su extensión, presenta las características adecuadas de soporte y estabilidad para que *A. rivoli* se distribuya adecuadamente a lo largo de la cuenca, esto sumado a que la cuenca posee altas concentración de iones de calcio.

### Conclusiones

Las características geológicas de la cuenca del río Opia permiten que ciertas características físicas y químicas del río, como la dureza, el oxígeno y el sustrato rocoso ayuden al sostenimiento de los individuos de *A. rivoli*. Debido a la formación rocosa de la cuenca, el agua presenta un porcentaje alto de calcio, una buena oxigenación y proporciona además un sustrato adecuado para el establecimiento de la población. Con relación a la distribución vertical de la especie el primer metro de profundidad fue el más utilizado para el establecimiento, ya que el sustrato es más adecuado para su fijación y hay una mayor disponibilidad de alimento.

En trabajos futuros con *A. rivoli* se recomienda realizar un seguimiento de la densidad de la población en la cuenca, con el fin de identificar si existe algún grado de amenaza sobre la especie debido a la sobreexplotación por parte de los habitantes de la región. Adicionalmente, es importante realizar estudios más profundos con respecto a la historia de vida de *A. rivoli* para determinar algunos aspectos ecológicos importantes en aras de la conservación de la especie.

### Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero de la Corporación Autónoma Regional del Tolima, al Comité Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima y al Grupo de Investigación en Zoología de la Universidad del Tolima. Expresamos un agradecimiento especial a Iván Gonzales y Néstor Oviedo por su apoyo en campo.

### Conflicto de intereses

No declarado

### Referencias

- Arteaga-Sogamoso, E. (1993). *Contribución al conocimiento del desarrollo larval de la ostra de agua dulce Acostaea rivoli (Deshayes, 1827) (Bivalvia, Etheriidae) en condiciones de laboratorio y algunos aspectos de su biología reproductiva*. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Santa fe de Bogotá.
- Bogan, A. E. (2008). Global diversity of freshwater mussels (Mollusca, Bivalvia) in freshwater. *Hydrobiologia*, **595** (1): 139-147.
- Bogan, A. E., & Hoeh, W. R. (2000). On becoming cemented: evolutionary relationships among the genera in the freshwater bivalve family Etheriidae (Bivalvia: Unionoida). *Geological Society, London, Special Publications*, **177** (1): 159-168.
- Bonetto, A. A. (1997). The freshwater oysters (Muteloidea: Mutelidae). Their taxonomy and geographic distribution in the whole of the naiads of the world. *Biociencias*, **5** (1): 113-142.
- D'Orbigny, A. (1851). Note sur un nouveau genre de Coquille lamellibranche d'eau douce découvert dans les rivières de la Nouvelle-Grenade par M. le colonel ACOSTA, et décrit par M. Alcide d'ORBIGNY. *Revue et Magasin de Zoologie. Pure et Appliquées. ser 2, vol 3*: 183-188.
- Ferussac, J. B. (1823). Notice sur les Ethéries trouvées dans le Nil par M. Cailliaud. *Mémoires de la Société d'Histoire Naturelle* **1**: 353-369.
- Graf, D. L. & Cummings, K. S. (2006). Palaeoheterodont diversity (Mollusca: Trigonioidea+Unionoida): what we know and what we wish we knew about freshwater mussel evolution. *Zoological Journal of the Linnean Society*, **148**: 343-494.
- Granados, H. (1973). Distribución hidrográfica y ecología de *A. rivoli* (Deshayes) de la cuenca del río Magdalena, Colombia (Bivalvia, Etheriidae). *Ciencia*, **28**: 1-16.
- Gutiérrez-Hoyos, N. E. (2011). *Aspectos bioecológicos de la ostra de agua dulce (Acostaea rivoli) en la cuenca del río Opia, Departamento del Tolima*. Universidad del Tolima. Ibagué. Colombia.
- Haas. (1969). Superfamilia Unionacea. *Das Tierreich (Berlin) Lieferung* **88**: Seite I-X: 1-663.
- Hunter, W.R. (1964). Physiological aspects of ecology in non-marine molluscs. En K.M. Wilbur & C.M. Yonge (eds). (1964). *Physiology of Mollusca*. (pp.83-126). New York and London. Academic Press.
- Krebs, C. J. (1998). *Ecological methodology* (2 ed.). United states of America. Benjamin Cummings. Menlo Park, California.
- Laverde, H.A. (1982). Datos sobre colección, inventario y cría artificial de bivalvos de agua dulce en Colombia, *Scientidae*, **1** (2): 165-172.
- López-Delgado, E.O., Vasquez-Ramos, J.M., Reinoso-Florez, G., Vejarano-Delgado, M.A., & Garcia-Melo, J. E. (2009). *Plan de Manejo de la Ostra de agua dulce Acostaea rivoli (Deshayes, 1827) del río Opia, Departamento del Tolima, Ibagué-Tolima*. León Graficas.
- McMahon R. F., & Bogan, A. E. (2001). Mollusca: Bivalvia. En J. H. Thorp & A. P. Covich (eds). *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates (2nd Edition)*. (pp.331-429) San Diego- California. Academic Press.
- Neves, R. J., & Moyer, S. N. (1988). Evaluation of techniques for age determination of freshwater mussels (Unionoida). *American Malacological Bulletin*, **6** (2): 179-188.
- R Development Core Team. (2011). R: A language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria.
- Ramírez, A., & Viña, G. (1998). *Limnología Colombiana: aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis*. Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Roldán, G., & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de Limnología neotropical. Colombia Segunda Edición*. Medellín. Editorial de la Universidad de Antioquia.
- Smith, D. R. (2006). Survey design for detecting rare freshwater mussels. *Journal of the North American Benthological Society*, **5** (3): 701-711.
- Strayer, D. L. (2008). *Freshwater mussel ecology: a multifactor approach to distribution and abundance (Vol 1)*. University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London.
- Villella, R. F., & Smith, D. R. (2005). Two-phase sampling to estimate river-wide populations of freshwater mussels. *Journal North American Benthological*, **24** (2): 357-368.
- Yonge, M. (1978). On the monomyarian, *Acostaea rivoli* and evolution in the family Etheriidae (Bivalvia: Unionacea). *Journal of Zoology, London*, **184** (4): 429-448.
- Young, M. R., & J. C. Williams (1984). The reproductive biology of the freshwater pearl mussel *Margaritifera margaritifera* (Linn.) in Scotland. I. Field studies. *Archiv für Hydrobiologie*, **99**: 405-422.

# Biodiversidad íctica de los mares colombianos: riqueza amenazada

Arturo Acero P.<sup>1,\*</sup>, Andrea Polanco F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Estudios en Ciencias del Mar, Cecimar, Universidad Nacional de Colombia, Playa Salguero, Santa Marta, Colombia

<sup>2</sup>Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Invemar, El Rodadero, Santa Marta, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 31 de mayo de 2017

## Resumen

Se hace un recuento de la riqueza íctica de los mares colombianos, enfatizando en los grupos amenazados de extinción en nuestras aguas y los factores de amenaza que se ciernen sobre ellos. Se detectan claras diferencias entre los peces cartilaginosos y los óseos en cuanto a sus posibilidades de supervivencia, pues mientras de los primeros 33% (41) de las especies conocidas de Colombia se hallan amenazadas o cerca de estarlo, solo 4% (89) de los óseos tienen esa condición. Así mismo, los niveles de conservación existentes en el Pacífico colombiano son aun claramente superiores a los del Caribe, lo cual indudablemente se asocia con la mucha mayor población humana que ocupa la costa norte colombiana. Se detallan los casos de los órdenes Carcharhiniformes (tiburones y toyo), Rhinopristiformes (peces sierra, rayas guitarras, rayas brujas), Elopiformes (sábalo) y Labriformes (peces loro) y de la familia Serranidae (meros) por considerarse ejemplos críticos que muestran la urgencia de una acción rápida, enmarcada tanto en los factores intrínsecos de amenaza de las especies, como en las necesidades de la sociedad para salvaguardar el medio circundante. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras Clave:** Caribe sur; Pacífico oriental tropical; Megabiodiversidad; Ictiofauna.

## Fish biodiversity of Colombian seas: threaten richness

### Abstract

A review of the Colombian marine fish richness is made, emphasizing on those groups susceptible of extinction and on the factors threatening them. There are clear differences between the conservation level of Colombian bony and cartilaginous fishes; 41 species of elasmobranch fishes (33% of total) are threatened or close to be, but only 4% (89 species) of the total figure of bony fishes have such status. Colombian Caribbean fishes are also more severely threatened than Pacific ones, which should be related to the higher density of human population in the northern Colombian coast. The cases of the orders Carcharhiniformes (requiem sharks), Rhinopristiformes (guitarfishes, saw fishes, witch rays), Elopiformes (tarpon) and Labriformes (parrotfishes) and the family Serranidae (groupers) are discussed in detail because they are considered critical examples showing the need of urgent action, based both on intrinsic threat factors as well as on societal needs to manage the environment. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Southern Caribbean; Eastern Tropical Pacific; Megabiodiversity; Fish fauna.

Pisces es el nombre clásico de una de las clases en que históricamente han sido divididos los vertebrados. Sin embargo, es claro que el grupo es una construcción humana, pues sus integrantes carecen de un carácter derivado común que los defina. De ese modo, los peces son reconocidos por ser vertebrados acuáticos de sangre fría, que respiran el oxígeno disuelto en el agua por medio de branquias y que se desplazan por medio de aletas. El problema surge porque todos esos atributos tienen excepciones, es decir, existen numerosos grupos de peces que no se amoldan completamente a esa definición, ya de por sí artificial.

En cualquier caso, los taxa considerados peces superan en riqueza a los demás grupos de vertebrados sumados. Estimaciones recientes de la biodiversidad íctica mundial se

aproximan rápidamente a 34500 especies, dado el intenso ritmo de descripción de nuevas formas, mientras que el resto de los vertebrados (no más de 32000 especies) aumentan sus números a un paso más lento (Nelson, *et al.*, 2016; van der Laan, *et al.*, 2017).

El estudio de los peces colombianos se inició hace poco más de un siglo con la obra del antioqueño Andrés Posada Arango (Acero P., 1988). La primera época de publicación sobre nuestra riqueza íctica marina comprende los trabajos

### \*Correspondencia:

Arturo Acero, [aacerop@unal.edu.co](mailto:aacerop@unal.edu.co)

Recibido: 11 de mayo de 2017

Aceptado: 09 de junio de 2017

del estadounidense **Henry W. Fowler** (1944, 1953) y del sueco **George Dahl** (1964, 1971). La divulgación de la tesis de maestría de **Francisco J. Palacio** (1974) marcó el comienzo de la nueva época de estudio de los peces marinos colombianos. Este trabajo fue seguido por **Acero P., et al.** (1984) y **Rubio, et al.** (1987), reiniciándose así un camino que sería seguido por las nuevas generaciones de ictiólogos nacionales.

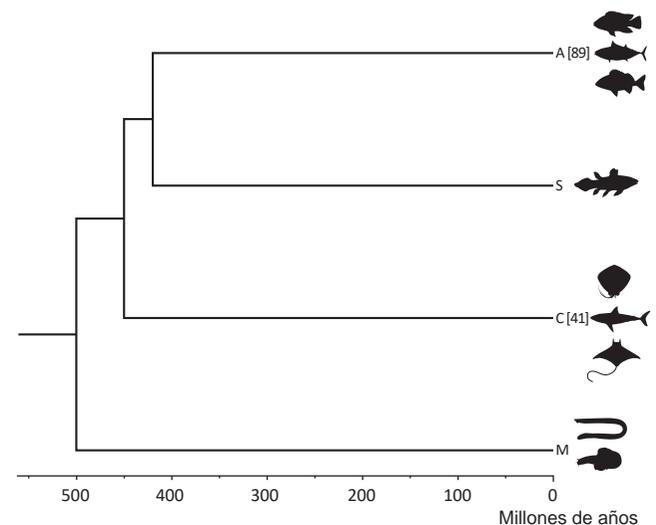
Colombia, con unas 4200 especies conocidas actualmente, alberga una cifra cercana a 12% de la totalidad de la riqueza de peces mundiales. Alrededor de 62% (unas 2600 especies) de la ictiofauna colombiana puede ser considerada marina o, al menos, habitante de los ecosistemas resultantes de la mezcla de las aguas dulces y saladas. Por ser un recurso alimentario fundamental e indispensable de nuestro país, la biodiversidad íctica se encuentra enfrentada a amenazas que hacen necesaria la evaluación periódica del riesgo de extinción de especies. Los mayores procesos de amenaza que dirigen este riesgo de extinción están asociados con el hombre: sobreexplotación del recurso, deterioro o pérdida de hábitat, contaminación, introducción de especies invasoras, cambio climático y la combinación multifactorial de varios de ellos (**Mace, et al.**, 2008). Factores intrínsecos a las especies, tanto biológicos (tasas de fecundidad, tiempos de gestación, tasas de crecimiento, estrategias reproductivas que afectan las tasas de crecimiento poblacional y productividad de la especie) como ecológicos (endemismo, patrones de distribución geográfica, preferencia de hábitat), también entran en juego haciéndolas más o menos resilientes a las amenazas. Esta revisión analiza la biodiversidad de peces marinos colombianos, enfatizando en la alarmante situación de amenaza que se cierne sobre una porción importante de ella.

Varios insumos han sido empleados durante este análisis. En primer lugar, las obras más recientes que discuten y plantean hipótesis evolutivas sobre la sistemática de los peces (**Nelson, et al.**, 2016; **van der Laan, et al.**, 2017; **Betancur-R., et al.**, 2017) facilitaron la comprensión del posicionamiento sistemático de la ictiofauna colombiana. Por otro lado, información actualizada acerca del conocimiento de la riqueza íctica nacional (**Rey Carrasco y Acero P.**, 2002; **Bolaños-Cubillos, et al.**, 2015; **Polanco Fernández, 2015; Polanco F. y Acero P.**, datos inéditos), permitió dar números verídicos a ese acervo biológico. Finalmente, la publicación este año de la segunda edición del Libro Rojo de los Peces Marinos Colombianos (**Chasqui, et al.**, 2017) condujo a la vinculación del conocimiento ictiológico con el estatus de preservación de esa riqueza nacional. Las categorías de amenaza de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) son, de mayor a menor grado de amenaza: En Peligro Crítico, En Peligro y Vulnerable. Además, la IUCN considera otras dos categorías, Casi Amenazado y Datos Deficientes; estas son denominaciones que permiten la inclusión de una especie en el libro rojo, aunque no exista unanimidad acerca de su cuadro de amenaza. Para este análisis se han considerado

como amenazadas todas las especies comprendidas bajo cualquiera de las cinco categorías mencionadas e incluidas en el Libro Rojo siguiendo criterios conservadores (107); igualmente se han adicionado otras especies incluidas en las listas globales (**IUCN**, 2017) en las tres categorías de amenaza (23), pero que no fueron consideradas por **Chasqui, et al.** (2017).

Hoy en día se considera que existen ocho clases de Craniata (**Nelson, et al.**, 2016; **Betancur-R., et al.**, 2017), el nombre más adecuado para el suphyllum que agrupa a la gran mayoría de los cordados (Figura 1). Acrania es el otro suphyllum que incluye a los invertebrados considerados filogenéticamente más cercanos a los craneados, es decir cefalocordados y urocordados. Todas las clases de craneados incluyen animales pisciformes, lo cual está claramente relacionado con el origen íctico de los tetrápodos. De esas ocho clases solo cuatro han sido detectadas en Colombia (Myxini, Chondrichthyes, Actinopteri y Dipnotetrapodomorpha); el grupo que une a los peces pulmonados y a los tetrápodos no tiene representantes marinos pisciformes, mientras que las otras tres clases sí los incluyen.

Los Myxini constituyen un pequeño grupo de seres vermiformes confinados a aguas marinas, que en los mares tropicales existen solo por debajo de las plataformas continentales; son los únicos Craniata que por carecer de vértebras pueden ser considerados invertebrados. Son relativamente conocidos en el Caribe colombiano, donde se hallan representados por unas siete especies (**Mok, et al.**, 2001; **Polanco-Fernández y Fernholm**, 2014; **Polanco-Fernández**, 2015), mientras que ha sido mencionada la existencia en el Pacífico colombiano de dos especies (**Wisner y McMillan**, 1995;



**Figura 1.** Filogenia de los grupos principales de cordados, modificada de **Nelson, et al.** (2016). Se indican el número de especies colombianas consideradas amenazadas o cerca de estarlo de peces cartilaginosos marinos y de peces óseos marinos, así como la edad de los grupos en millones de años; M Myxini, C Chondrichthyes, S Sarcopterygii, A Actinopteri.

**Rubio, et al.**, 2007). Se conocen factores que amenazan la super-vivencia de 19 de estos animales en otras regiones del globo como Australia, Japón y las costas meridionales del Brasil; las afectadas son especies de distribuciones restringidas, caso análogo a los myxínidos colombianos, afectadas por las prácticas destructivas de pesca y la sobreexplotación (**Knapp, et al.**, 2011). Es necesario avanzar más en el conocimiento de nuestras especies para definir el estado de sus poblaciones.

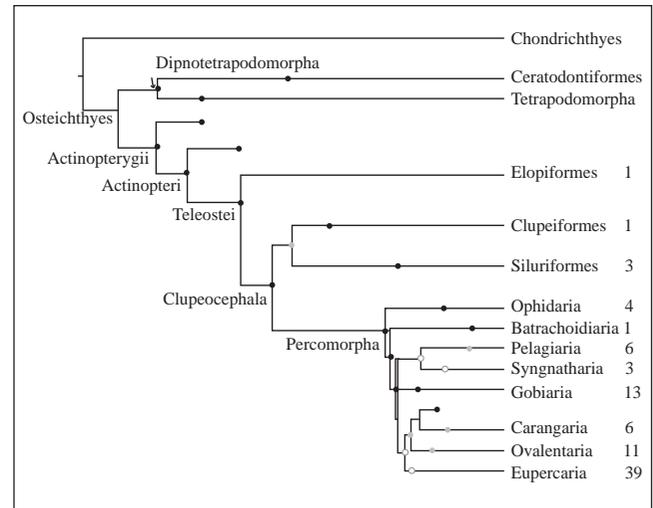
Los peces cartilaginosos (Chondrichthyes), por su parte, son más o menos bien conocidos en los mares colombianos. Ellos pueden ser divididos en tiburones, escualos y rayas (Elasmobranchii), por un lado, y quimeras (Holocephali), por el otro. Modernamente los condriictios se agrupan en trece órdenes: uno para las quimeras (Chimaeriformes), que no incluyen especies amenazadas, y doce para el resto de peces cartilaginosos. Considerando que de aguas colombianas se conocen unas 125 especies de elasmobranquios (**Navia, et al.**, 2016) y 41 de ellas (33%) se hallan amenazadas o próximas a estarlo, es evidente que estos animales se encuentran cerca de ser removidos de nuestros mares, urgiéndose medidas apropiadas del Estado colombiano. Se considera que dos órdenes agrupan a la mayoría de los condriictios amenazados en Colombia: Carcharhiniformes y Rhinoprístiformes. Quizá el primer factor de riesgo para la supervivencia de los peces cartilaginosos es su propia estrategia de vida; ellos dentro de sus factores intrínsecos son animales longevos, generalmente vivíparos, de crecimiento relativamente lento, con tallas de maduración sexual elevadas y, en consecuencia, bajas tasas de crecimiento poblacional; ellos desempeñan en muchas ocasiones el rol de depredadores tope en los diferentes ambientes que ocupan. El orden Carcharhiniformes, el grupo más rico de tiburones (39 especies en Colombia), incluye animales que van desde poco más de medio metro hasta tallas por arriba de cinco metros (**Nelson, et al.**, 2016). Aparte de los rasgos mencionados arriba, estos peces son, por lo general, habitantes de las plataformas continentales que, en muchos casos, usan aguas muy someras, por ejemplo manglares, para liberar sus crías, lo cual los coloca precisamente en ambientes con alta intervención antropogénica. Es así que 19 especies (49% de las conocidas de Colombia) del orden ameritaron su presencia en el libro rojo o se consideran amenazadas por la IUCN, 12 de ellas en la familia Carcharhinidae (**Bent-Hooker, et al.**, 2017b; **Caldas, 2017; Caldas, et al.**, 2017b; **Forbes, et al.**, 2017; **Gómez, et al.**, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d, 2017e; **Navia, et al.**, 2017; **Zapata, et al.**, 2017). Se consideran amenazadas cuatro especies de carcarínidos, tres sphérnidos y tres triákidos, mientras que otras nueve especies se encuentran muy cerca de un nivel concreto de amenaza. Igualmente, es probable que la mayoría de las especies que llegan o sobrepasan los dos metros de longitud estén amenazadas (p. ej. *Carcharhinus leucas*), así no hayan sido incluidas en el libro rojo. Además de los factores de preocupación ya discutidos, los tiburones son perseguidos no solo por su carne, en muchos casos de excelente calidad,

sino por sus aletas, base de platos orientales, que se comercializan a precios elevados. Es por ello que la vigilancia y control efectivos en todos los frentes pueden ayudar a disminuir la enorme presión humana sobre estos peces, que no evolucionaron para enfrentarla.

Rhinoprístiformes es un grupo que solo recientemente ha sido reconocido para agrupar a los peces sierra (Pristidae), a las rayas guitarra (Rhinobatidae) y a las rayas brujas (Trygonorrhinidae) (nueve especies en total en Colombia) (**Last, et al.**, 2016a, 2016b). Las dos especies de peces sierra (*Pristis pectinata* y *P. pristis*) son rayas de gran tamaño (longitudes máximas por encima de 5 m), armadas de una prolongación rostral equipada de grandes escamas modificadas a modo de dientes. Ellas ocurrían en aguas estuarinas y sobre fondos blandos en los mares tropicales con desembocaduras de grandes ríos, pero sus números han disminuido alarmantemente hasta su virtual desaparición de nuestras aguas (**Gómez-Rodríguez, et al.**, 2014; **Caldas y Acero P.**, 2017a; **Caldas, et al.**, 2017a). La causa principal de esta enorme calamidad radica en la indiscriminada pesca de arrastre industrial y artesanal en aguas someras. La sierra y sus dientes se enredan fácilmente en las redes, lo cual conduce a su irremediable extracción. De este modo, ambas especies se encuentran críticamente amenazadas en los mares colombianos (solo *P. pristis* ha sido detectada en el Pacífico oriental), sin que a la fecha parezca posible diseñar una estrategia que busque la recuperación de sus poblaciones. Considerando que *P. pristis* ha sido registrada recientemente en el Pacífico chocoano (**Caldas, et al.**, 2017a), la evaluación del número de ejemplares sobrevivientes, sus tamaños y sexos podría ser un buen comienzo. Las rayas guitarra y las brujas, por su parte, son los únicos batoideos de nuestras aguas que carecen completamente de estructuras o sistemas defensivos. Esto, sumado a sus tamaños medianos, las hacen de cierto interés para los pescadores; de este modo, dos especies de rayas guitarras y una de rayas brujas, todas de nuestro Pacífico, fueron incluidas en el libro rojo colombiano. *Pseudobatos leucorhynchus* es considerada vulnerable pues, aunque no presenta alto valor comercial, es afectada por la captura incidental de la pesca artesanal e industrial del camarón y su carne es vendida localmente (**Payán, et al.**, 2011; **Mejía-Falla, et al.**, 2017a). *Pseudobatos prahli*, categorizada como casi amenazada, presenta una distribución muy fragmentada y puede estar afrontando una pesquería mayor de la registrada al ser confundida con su congénere (ambas son llamadas guitarrillas) (**Mejía-Falla y Navia, 2017a**). *Zapteryx xyster* fue calificada como datos insuficientes, ya que, aunque es incidentalmente capturada en las pesquerías de camarón, tiene bajos registros y sus tendencias poblacionales se desconocen (**Mejía-Falla y Navia, 2017b**).

Los peces óseos (clase Actinopteri) agrupan a la mayoría de los vertebrados pisciformes, tanto a nivel global como nacional. En Colombia se conocen unas 2450 especies de peces óseos marinos, 4% (89 especies) de las cuales se

consideran amenazadas; la asimetría en el estado de amenaza entre peces óseos y cartilagineos separa claramente a esos dos grupos de animales, pues los condriictios se hallan mucho más afectados por la presión humana. Al revisar la Figura 2 se nota que la amenaza, al estar dispersa a lo largo del árbol de los peces óseos, no tiene relación clara con la filogenia, exceptuando probablemente el tamaño máximo alcanzado por una especie. Se analizarán tres casos diferentes dentro de los actinopteros, en los órdenes Elopiformes, Labrifformes y Perciformes. Los Elopiformes son un pequeño grupo de peces generalizados, integrado a nivel mundial por menos de diez especies, tres de las cuales existen en Colombia. La discusión se centrará en el sábalo, *Megalops atlanticus* (familia Megalopidae), un pez que alcanza tallas enormes, por encima de dos metros, originario del océano Atlántico (Caldas y Acero P., 2017b). Considerado muy cerca de su extirpación de nuestro Caribe, el sábalo es un pez altamente nadador que frecuenta aguas de marinas a totalmente dulces; sus registros en nuestra cuenca Caribe van desde Honda (700 km aguas arriba del río Magdalena) hasta las islas cayos del norte de la Reserva Seaflower (Caldas y Acero P., 2017b). Sus hábitos costeros lo enfrentan directamente a las actividades humanas, incluyendo sobrepesca, contaminación y destrucción del hábitat. No obstante, la principal razón de su alarmante disminución se asocia con una de las prácticas más nocivas de la zona costera: la pesca con explosivos. Esa actividad debe ser absolutamente reprimida por todos los medios del Estado dada su cercanía al terrorismo; ella extermina no solo a los peces objetivo sino a toda la vida circundante, aparte de causar graves lesiones a los pescadores. Se hace obligatorio, en este contexto, citar textualmente a George Dahl (1971, p.159) en su aparte sobre el sábalo: "Desgraciadamente, este gran recurso natural ha sido, y sigue siendo tratado de un modo estúpido y criminal. En vez de una pesca deportiva, sensata en los ríos y ciénagas (con la probabilidad del influjo del turismo) y comercial en el mar, utilizando redes agalleras de malla grande que permitan el paso de los individuos inmaduros, se está pescando a todo lo largo de la costa con dinamita. En otras palabras, cuando pasa un cardumen de sábalos, los mal llamados "pescadores" salen en sus botes y le lanzan "tacos" (cargas de dinamita). De los peces muertos y lisiados por tales descargas se recoge posiblemente un 15%, pues el resto se pierde totalmente convirtiéndose en alimento para los tiburones. Por esta razón no es raro que la pesca del "Sábalo" disminuya". En años recientes ha tenido lugar un nuevo desarrollo sobre la bioecología de la especie, su aparición en el Pacífico colombiano (Neira y Acero P., 2016). Ejemplares de sábalo empezaron a cruzar el canal de Panamá desde el Caribe hace ya más de 80 años, de modo que, a la fecha, ya se conoce de su aparición en el río Mira, frontera Colombia-Ecuador. Este evento tiene implicaciones importantes en cuanto a la conservación y manejo de esta especie y, en general, del recurso pesquero del Pacífico colombiano, pues simultáneamente está críticamente amenazada y es una especie invasora.



**Figura 2.** Filogenia de los grupos principales de Actinopterygii, modificada de Betancur-R., et al. (2017). Se indican el número de especies colombianas de peces óseos marinos consideradas amenazadas o cerca de estarlo según los principales taxones que las agrupan.

El orden Labrifformes incluye solo una familia en el hemisferio occidental, la de las doncellas o señoritas y sus parientes los peces loros, Labridae. Debe aclararse que aunque los peces loros sensu stricto (subfamilia Scarinae) constituyen un grupo natural claramente definido, se hallan profundamente anidados sistemáticamente dentro de los lábridos por lo que separarlos a nivel familiar implicaría una inconveniente proliferación de familias (Westneat y Alfaro, 2005). En nuestras aguas han sido registradas 44 especies, 7 (16%) de las cuales se hallan amenazadas. De los lábridos no considerados loros hay dos especie amenazadas, el pargo pluma *Lachnolaimus maximus* y el lorito de Malpelo *Halichoeres malpelo*. El caso del pargo pluma (no un verdadero lutjánido, aunque las estadísticas pesqueras nacionales así lo indiquen) es un ejemplo agravado del caso de muchas especies arrecifales caribeñas con factores intrínsecos que actúan en contra de la resiliencia de sus poblaciones. Presenta un largo ciclo de vida, siendo hermafrodita protogínica, por lo que la captura masiva de hembras inmaduras es frecuente, en tanto que la remoción de un solo macho reduce el rendimiento reproductivo de todo un grupo (Bustos-Montes y Acero P., 2017). Los arrecifes coralinos y rocosos son cotidianamente visitados por toda clase de buzos, tanto profesionales como aficionados, que practican la pesca indiscriminada con arpones, bien sea a pulmón o con equipo autónomo. El factor agravante para el pargo pluma es que se trata de una especie de mediano tamaño e increíblemente mansa, que incluso se acerca al buceador; esto, sumado a la excelente calidad de su carne, tiene a la especie en peligro. La captura del pargo pluma con arpón, así como su comercialización, deben ser actividades vedadas, sin importar las circunstancias. El lorito de Malpelo es, por el contrario, una especie pequeña; su

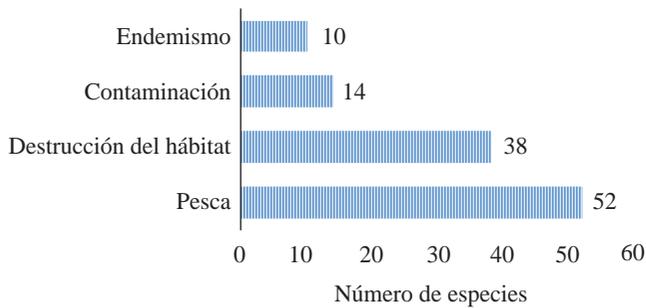
principal factor de amenaza es el endemismo, pues solo se conoce de Malpelo, la única isla oceánica colombiana del Pacífico Oriental, la cual se halla expuesta a fenómenos oceánicos abruptos consecuencia del cambio climático que podrían afectar negativamente su población (**Zapata y Chasqui V.**, 2017).

La situación de los scarinos guarda alguna semejanza con la del pargo pluma, aunque esas especies no alcanzan el mismo nivel de aprecio. Los peces loro que crecen hasta tallas más grandes, pudiendo sobrepasar al metro de longitud (*Scarus coelestinus*, *S. coeruleus* y *S. guacamaia*), han sido erradicados de la gran mayoría de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano (**Bolaños-Cubillos, et al.**, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d, 2017e). Esto es una calamidad enorme si se considera que son especies claves, encargadas de mantener a raya a las macroalgas que, aprovechando el cambio climático, han proliferado, cubriendo y matando a los corales por sombrío en muchos casos; igualmente, hallazgos recientes indican que los loros diseminan en sus heces a las zooxantelas, simbiontes indispensables para el crecimiento y la salud arrecifal (**Castro-Sanguino y Sánchez**, 2012). La situación de la más grande de estas tres especies (*S. guacamaia*) se agrava al considerar que su reclutamiento ocurre principalmente en lagunas de manglar, las cuales se hallan bajo amenaza de degradación ambiental y desaparición en razón de los desarrollos costeros fuera de control. Aparte de las tres grandes especies ya mencionadas, existen otros dos peces loros caribeños que fueron catalogados este año como casi amenazados: *Scarus vetula* y *Sparisoma viride* (**Bolaños-Cubillos**, 2017d, 2017e). Esas especies, de talla mediana (máximo 65 cm), están siendo extraídas sin ningún control por los arponeros, al igual que por la pesca con nasas. De no tomarse medidas inmediatas es posible predecir la extirpación de estos loros en pocos años, lo cual sin duda será el golpe de gracia a nuestros ya degradados arrecifes coralinos. Solo se vislumbra como solución la eliminación total de la pesca no científica con arpones en los arrecifes y la prohibición de la comercialización de los scarinos.

Dentro del recientemente restringido orden Perciformes se sitúa la familia Serranidae, que incluye a peces tan estimados comercialmente como los meros. Se trata de una familia de especies hermafroditas protogínicas, en el caso de la subfamilia Epinephelinae (meros), o simultáneas, como los Serraninae. Es así que 18 de 34 (53%) especies de epinefélidos colombianos se encuentran en alguna categoría de amenaza o cerca de ella. La situación del mero guasa (*Epinephelus itajara*) y del mero criollo (*E. striatus*), especies caribeñas críticamente amenazadas, es particularmente alarmante. En el caso del primero coinciden numerosos factores de amenaza, que van de la sobrepesca con toda clase de artes, lícitos e ilícitos, hasta la destrucción de su hábitat de reclutamiento (manglares); la captura de ejemplares de mediano tamaño agrava la situación, pues la primera madurez ocurre a tallas de poco menos de un metro (**Polanco F., et al.**, 2017), lo cual se asemeja a lo que sucede con el sábalo. La

incidencia definitiva de la sobrepesca se nota con claridad en el caso del mero criollo (**Bent-Hooker, et al.**, 2017a). Por ejemplo, todavía en la década de los años 80 del siglo pasado la especie era frecuente y abundante en la Reserva de la Biosfera Seaflower (**Garzón y Acero P.**, 1983; **Acero P. y Garzón-Ferreira**, 1991). Hoy en día el mero criollo ha sido prácticamente extirpado de las islas que conforman el departamento archipiélago (Acero P., datos inéditos). En este contexto de depauperación de la fauna de epinefélidos, la presencia en el Parque Nacional Natural Corales de Profundidad del mero negro (*Hyporthodus nigrilus*) (**Polanco F. y Acero P.**, 2017a), una especie críticamente amenazada en todo su ámbito de distribución en el océano Atlántico, es una noticia estimulante que debe aportar a defender la adecuada conservación de ese ecosistema. Por otro lado, el único serranino incluido en el libro rojo es *Hypoplectrus providencianus*, cuya distribución abarca totalmente a la Reserva de Biosfera Seaflower. Sin embargo, dado que la especie aparece en otras localidades caribeñas, se le consideró solo como casi amenazada (**Polanco F. y Acero P.**, 2017b).

El anexo 1 lista las especies de peces marinos colombianos consideradas amenazadas (o cerca de estarlo), indicando los factores que más inciden en ese diagnóstico. La observación detenida de dicho cuadro ratifica que la principal amenaza que afronta nuestra riqueza íctica es la pesca indiscriminada, empleando incluso métodos en extremo dañinos. Es posible, así mismo, corroborar que la pesca carente de regulación y control perjudica mucho más notoriamente a los peces cartilaginosos que a los óseos. Es así que prácticamente para todos los elasmobranchios incluidos en el libro rojo colombiano (34 de 35 especies) se considera que la pesca es su principal amenaza. En el caso de los peces óseos, la amenaza proveniente de la actividad pesquera parece menos determinante, pues se conceptuó que de 74 especies de actinopteros, 69% padece esa problemática. Para los peces óseos, en promedio más pequeños que los cartilaginosos, se consideró que la destrucción del hábitat incide en 51% de las especies amenazadas; este factor es mencionado en solo 36% de los elasmobranchios amenazados. La contaminación ambiental es vista como un peligro potencial para 14 especies que ocupan ambientes estuarinos durante parte o la totalidad de su ciclo vital. Fenómenos de origen global, como el El Niño Oscilación del Sur y en general el cambio climático, pueden acarrear daño a especies arrecifales o extremadamente restringidas. El endemismo es otra circunstancia a tener cuenta; es así que diez especies endémicas de nuestros mares se hallan amenazadas (Figura 3). Es imperioso que el Estado colombiano mire nuestro acervo marino y pesquero con otros ojos; que en lugar de una sucesión de entidades burocráticas inoperantes, exista por fin una política integral que vele realmente por nuestra riqueza biológica y por la seguridad alimentaria de los colombianos, claramente amenazadas hoy en día.



**Figura 3.** Principales factores que amenazan a las especies de peces marinos colombianos.

Un aspecto geográfico interesante es que los peces caribeños están mucho más amenazados que los del Pacífico americano. Descontando las 19 especies presentes en ambas costas (anfiamericanas o circuntropicales), 80 especies (62%) de peces amenazados colombianos son caribeños, mientras que menos de la mitad (31) son exclusivos del Pacífico. El área de las aguas territoriales colombianas en el Caribe es algo más de 1.7 veces el de las aguas nacionales en el Pacífico. El estado de mayor amenaza de la ictiofauna caribeña, por encima del doble en número de especies, está seguramente relacionado con la marcada diferencia en habitantes humanos y desarrollo entre las dos regiones. Puede tratarse, en todo caso, de una combinación en el Pacífico de menor presión antrópica directa y menor posibilidad de difusión de información fidedigna sobre el estatus de las poblaciones ícticas.

Aparte de los ya mencionados factores de amenaza que se ciernen sobre la ictiofauna marina colombiana, desde hace casi una década nuestras aguas caribeñas han sido invadidas por una presencia altamente nociva, el scorpénido originario del Indo-Pacífico conocido como *Pterois volitans* o simplemente como pez león (González, et al., 2009; Betancur-R., et al., 2011; González-Corredor, et al., 2016). Este voraz depredador combina numerosas características y estrategias que, dado su carácter novedoso en el Atlántico occidental tropical, le han permitido proliferar de manera alarmante. Las consecuencias de su accionar en nuestros ecosistemas someros, ya de por sí en avanzado estado de deterioro, aún no han sido bien estimadas en su totalidad, pero es claro que puede coadyuvar a que peces óseos ya bajo amenaza y que recluten en los ecosistemas donde el invasor prolifera reciban un golpe definitivo. Por otro lado, dada la naturaleza oportunista del pez león, su accionar depredador se centra con frecuencia en especies pequeñas de peces. Es así que peces comunes en sitios arrecifales someros, tales como *Thalassoma bifasciatum*, *Gramma loreto* o *Stegastes partitus*, son algunas de las presas más importantes del invasor (Acero P, datos inéditos). Interesantemente, el más reciente informe de la IUCN sobre los peces amenazados incluye como vulnerables a ocho especies del género *Coryphopterus* (Linardich, et al., 2017), pequeños gobis comunes en los fondos someros, y una de las presas favoritas del depredador invasor.

## Agradecimientos

A nuestras instituciones, Universidad Nacional de Colombia sede Caribe e Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, por permitarnos discutir y transmitir nuestras inquietudes. A todo el grupo de trabajo del libro rojo de peces marinos colombianos por horas de fructífera discusión sobre nuestra riqueza íctica, amenazada o no. A Maija Karala por el esquema de *Latimeria*. Contribución No. 456 del Instituto de Estudios en Ciencias del Mar y No. 1159 del Invemar.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## Referencias

- Acero P., A. 1988. Andrés Posada Arango, pionero de la ictiología en Colombia. *Actual. Biol.*, **17** (63): 49-54.
- Acero P., A. y J. Garzón-Ferreira. 1991. Meros, chernas y cabrillas del Caribe colombiano (Pisces: Serranidae: Epinephelinae: Epinephelini). *Caldasia*, **16** (78): 355-376.
- Acero P., A., J. Garzón F. y F. Köster. 1984. Lista de los peces óseos conocidos de los arrecifes del Caribe colombiano, incluyendo 31 nuevos registros y descripciones. *Caldasia*, **14** (66): 37-84.
- Acero P., A., D. Bustos-Montes, P. Pabón y A. Sanjuan. En prensa. Feeding habits of *Pterois volitans*: A real threat to Caribbean coral reef biodiversity. En: Makowski, C. (Ed.) *Impacts of invasive species on coastal environments: Coasts in crisis*. Springer.
- Bent-Hooker, H., A. Rojas Archbold, N. Bolaños-Cubillos, A. Polanco F. y A. Acero P. 2017a. *Epinephelus striatus* (Bloch, 1792): 65-68. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Bent-Hooker, H., C. Ballesteros y J.P. Caldas. 2017b. *Galeocerdo cuvier* (Peron & Lesueur, 1822): 274-277. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Betancur-R., R., A. Hines, A. Acero P., G. Ortí, A.E. Wilbur y D.W. Freshwater. 2011. Reconstructing the lionfish invasion: insights into Greater Caribbean biogeography. *J. Biogeogr.*, **38**: 1281-1293.
- Betancur-R., R., E. O. Wiley, G. Arratía, A. Acero P., M. Miya, G. Lecointre y G. Ortí. 2017. Phylogenetic classification of bony fishes. *BMC Evolution. Biol.*,
- Bolaños-Cubillos, N., A. Abril-Howard, H. Bent-Hooker, J.P. Caldas y A. Acero P. 2015. Lista de peces conocidos del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Reserva de Biosfera Seaflower, Caribe occidental colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, **44** (1): 127-162.
- Bolaños-Cubillos, N., A. Acero P., A. Rojas Archbold, H. Bent-Hooker, A. Polanco F. y J.D. González. 2017a. *Scarus coelestinus*: 81-85. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.

- Bolaños-Cubillos, N., A. Acero P., A. Rojas Archbold, H. Bent-Hooker, A. Polanco F. y J.D. González.** 2017b. *Scarus coeruleus*: 86-90. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Bolaños-Cubillos, N., A. Acero P., A. Rojas Archbold, H. Bent-Hooker, A. Polanco F. y J.D. González.** 2017c. *Scarus guacamaia*: 91-95. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Bolaños-Cubillos, N., A. Acero P., A. Rojas Archbold, H. Bent-Hooker, A. Polanco F. y J.D. González.** 2017d. *Scarus vetula* (Bonnaterre, 1788): 328-332. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Bolaños-Cubillos, N., A. Acero P., A. Rojas Archbold, H. Bent-Hooker, A. Polanco F. y J.D. González.** 2017e. *Sparisoma viride* (Bloch & Schneider, 1801): 333-337. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Bustos-Montes, D. y A. Acero P.** 2017. *Lachnolaimus maximus* (Walbaum, 1792): 77-80. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Caldas, J.P.** 2017. *Carcharhinus longimanus* (Poey, 1861): 131-134. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Caldas, J.P. y A. Acero P.** 2017a. *Pristis pectinata* Latham, 1794: 44-47. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Caldas, J.P. y A. Acero P.** 2017b. *Megalops atlanticus* Valenciennes, 1847: 53-47. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Caldas, J.P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia y A. Acero P.** 2017a. *Pristis pristis* (Linnaeus, 1758): 48-52. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Caldas, J.P., P.A. Mejía-Falla y A.F. Navia.** 2017b. *Prionace glauca* (Linnaeus, 1758): 281-284. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Castro-Sanguino, C. y J. A. Sánchez.** 2012. Dispersal of *Symbiodinium* by the stoplight parrotfish *Sparisoma viride*. Biol. Let., **8**: 282-286.
- Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.).** 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Dahl, G.** 1964. Los peces cartilaginosos y del estuario de la bahía de Cispatá y del estuario del río Sinú. Rev. Acad. Colomb. Cienc., **12** (46): 175-195.
- Dahl, G.** 1971. Los peces del norte de Colombia. Inderena, Bogotá. 391 p.
- Forbes, T., A. Rojas Archbold, A. Acero P., J.P. Caldas, E. Castro, L.O. Duarte y F. Gómez.** 2017. *Negaprion brevirostris* (Poey, 1868): 278-280. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Fowler, H.W.** 1944. Results of the Catherwood-Chaplin West Indies Expedition, 1948. Part III. The fishes. Proc. Acad. Nat. Sci. Phila., **102**: 69-93.
- Fowler, H.W.** 1953. The shore fishes of the Colombian Caribbean. Caldasia, **6** (27): 43-73.
- Garzón, J. y A. Acero P.** 1983. Notas sobre la pesca y los peces comerciales de la Isla de Providencia (Colombia), incluyendo nuevos registros para el Caribe occidental. Carib. J. Sci., **19** (3-4): 9-19.
- Gómez, F., A. Acero P., J.P. Caldas, E. Castro y L.O. Duarte.** 2017a. *Carcharhinus perezii* (Poey, 1876): 285-288. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A. F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Gómez, F., A. Acero P., J.P. Caldas, E. Castro, L.O. Duarte y M. Amanza.** 2017b. *Rhizoprionodon porosus* (Poey, 1861): 270-273. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Gómez, F., A. Acero P., J.P. Caldas, E. Castro y L.O. Duarte.** 2017c. *Carcharhinus acronotus* (Poey, 1860): 383-385. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Gómez, F., A. Acero P., J.P. Caldas, E. Castro y L.O. Duarte.** 2017d. *Carcharhinus obscurus* (Lesueur, 1818): 386-388. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Gómez, F., A. Acero P., J.P. Caldas, E. Castro y L.O. Duarte.** 2017e. *Carcharhinus porosus* (Ranzani, 1839): 389-391. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Gómez-Rodríguez, S., J.P. Caldas, A. Acero P., M.A. Martínez-Silva, P. Saénz-Okuyama, C.A. Lasso y O.M. Lasso-Alcalá.** 2014. Geographic distribution and conservation

- status of sawfish *Pristis* spp. (Pristiformes: Pristidae) in the southern Caribbean sea. *Biota Col.*, **15** (Supl. 1): 109-117.
- González, J., M. Grijalba-Bendeck, A. Acero P. y R. Betancur-R.** 2009. The invasive red lionfish, *Pterois volitans* (Linnaeus 1758), in the southwestern Caribbean Sea. *Aq. Invas.*, **4** (3): 507-510.
- González-Corredor, J.D., A. Acero P. y R. García-Urueña.** 2016. Densidad y estructura de tallas del pez león *Pterois volitans* (Scorpaenidae) en el Caribe occidental insular colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, **45** (2): 317-333.
- IUCN.** 2017. The IUCN red list of threatened species. <http://www.iucnredlist.org/>
- Knapp, L., M.M. Mincarone, H. Harwell, B. Polidoro, J. Sanciangco y K. Carpenter.** 2011. Conservation status of world's hagfish species and the loss of phylogenetic diversity and ecosystem function. *Aq. Conserv. Mar. Freshwater Ecosyst.*, **21**: 401-411.
- Last, P.R., B. Seret y G.J.P. Naylor.** 2016a. A new species of guitarfish, *Rhinobatos borneensis* sp.nov. with a redefinition of the family-level classification in the order Rhinopristiformes (Chondrichthyes : Batoidea). *Zootaxa*, **4117** (4): 451-475.
- Last, P.R., W.T. White, M.R. de Carvalho, B. Séret, M.F.W. Stehmann y G.J.P. Naylor (Eds.).** 2016b. Rays of the world. Cornell, Ithaca, EE. UU. 790 p.
- Linardich, C., G. Ralph, K. Carpenter, N. Cox, D.R. Robertson, H. Harwell, A. Acero P., K. Aiken, W. Anderson Jr., F. Barthelat, J. Bouchereau, J. Brown, J. Buchanan, D. Buddo, G. Bustamante, B. Collette, M. Comeroy-Raynal, M. Craig, M. Curtis, T. Defex, J. Dooley, C. Elfes Livsey, W. Eschmeyer, T. Fraser, R. Gilmore Jr., L. Grijalba Bendeck, A. Hines, R. Kishore, K. Lindeman, J. Marechal, J. McEachran, R. McManus, J. Moore, T. Munroe, H. Oxenford, F. Pezold, F. Pina Amargós, A. Polanco Fernández, B. Polidoro, C. Pollock, R. Robins, B. Russell, C. Sayer, S. Singh-Renton, W. Smith-Vaniz, L. Tornabene, J. Van Tassell, J.-C. Vié, J. Williams y B. Zane.** 2017. The conservation status of marine bony shorefishes of the greater Caribbean. Gland, Switzerland: IUCN. viii + 75 p.
- Mace, G.M., N.J. Collar, K.J. Gaston, C. Hilton -Taylor, H.R. Akcakaya, N. Leader-Williams, E.J. Milner-Gulland y S.N. Stuart.** 2008. Quantification of extinction risk: IUCN's system for classifying threatened species. *Conserv. Bio.*, **22** (6): 1424-1442. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2008.01044.x
- Mejía-Falla, P.A. y A.F. Navia.** 2017a. *Pseudobatos prahli* (Acero P. & Franke 1995): 297-299. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Mejía-Falla, P.A. y A.F. Navia.** 2017b. *Zapteryx xystr* Jordan & Evermann, 1896: 392-394. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Mejía-Falla, P.A., A.F. Navia, S. Teillaud, L.H. Rodríguez, A. Suárez y L.A. Zapata.** 2017a. *Pseudobatos leucorhynchus* (Günther, 1867): 148-151. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Mok, H.K., L. Saavedra y A. Acero P.** 2001. Two new species of *Eptatretus* and *Quadratus* (Myxinidae: Myxiniformes) from the Caribbean coast of Colombia. *Copeia*, **2001** (4): 1026-1033.
- Navia, A.F., P.A. Mejía-Falla y J.S. Hleap.** 2016. Zoogeography of elasmobranchs in the Colombian Pacific Ocean and Caribbean Sea. *Neotrop. Ichthyol.*, **14** (2): e140134. Epub July 07, 2016. <https://dx.doi.org/10.1590/1982-0224-20140134>
- Navia, A.F., P.A. Mejía-Falla, S. Teillaud, M.C. Diazgranados, A. Suárez, V. Puentes, L.A. Zapata, F. Gómez, A. Acero P., J.P. Caldas, E. Castro y L.O. Duarte.** 2017. *Carcharhinus limbatus* Müller y Henle, 1839: 126-130. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Neira, A. y A. Acero P.** 2016. *Megalops atlanticus* (Megalopidae), un nuevo pez en el océano Pacífico; información sobre su importancia pesquera. *Rev. MVZ Córdoba*, **21** (3): 5525-5534.
- Nelson, J. S., T.C. Grande y M.V.H. Wilson.** 2016. Fishes of the world. Quinta edición. Wiley, New Jersey. 707 p.
- Palacio, F. J.** 1974. Peces colectados en el Caribe colombiano por la Universidad de Miami. *Bol. Mus. Mar.*, **6**: 116 p.
- Payán, L.F., A.F. Navia, E.A. Rubio y P.A. Mejía-Falla.** 2011. Biología de la raya guitarra *Rhinobatos leucorhynchus* en el Pacífico colombiano. *Latin Am. J. Aq. Res.*, **39** (2): 286-296.
- Polanco Fernández, A.** 2015. Dynamics of the continental slope demersal fish community in the Colombian Caribbean – Deep sea research in the Caribbean. Dis. Doct. Interinst. Cienc. Mar, Univ. Nal. Col., Santa Marta.
- Polanco F., A. y A. Acero P.** 2017a. *Hyporthodus nigratus* (Holbrook, 1855): 440-442. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Polanco F., A. y A. Acero P.** 2017b. *Hypoplectrus providencianus* Acero P. & Garzón-Ferreira, 1994: 341-343. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Polanco Fernández, A. y B. Ferholm.** 2014. A new species of hagfish (Myxinidae: *Eptatretus*) from the Colombian Caribbean. *Copeia*, **2017** (3): 530-533.
- Polanco F., A., A. Acero P. y M. Almanza.** 2017. *Epinephelus itajara*: 61-64. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invemar 93, Santa Marta. 552 p.
- Rey Carrasco, I. y A. Acero P.** 2002. Biodiversidad íctica del Caribe colombiano. Univ. Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. 190 p. [http://avalon.utadeo.edu.co/dependencias/publicaciones/pelect\\_biologia.php](http://avalon.utadeo.edu.co/dependencias/publicaciones/pelect_biologia.php).
- Rubio, E. A., B. Gutiérrez y R. Franke.** 1987. Peces de la isla Gorgona. Univ. Valle, Cali. 315 p.

- Rubio, E.A., M.J. Pedraza, J. Milton y L.A. Zapata.** 2005. Primer hallazgo de *Myxine circifrons* Garman 1899 (AGNATHA: MYXINIDAE) en la costa del Pacífico de Colombia. *Gayana (Concepción)*, **69** (1): 118-121.
- van der Laan, R., W. N. Eschmeyer and R. Fricke.** Family-group names (<http://www.calacademy.org/scientists/catalog-of-fishes-family-group-names/>).
- Westneat, M.W. y M.E. Alfaro.** 2005. Phylogenetic relationship and evolutionary history of the reef fish family Labridae. *Mol. Phylogen. Evol.*, **36**: 370-390.
- Wisner, R.L. y C.B. McMillan.** 1995. Review of new world hagfishes of the genus *Myxine* (Agnata: Myxinidae) with descriptions of nine new species. *Fish. Bull.*, **93** (3): 530-550.

- Zapata, F. y L. Chasqui V.** 2017. *Halichoeres malpelo* Allen & Robertson, **1992**: 219-221. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invenmar 93, Santa Marta. 552 p.
- Zapata, L.A., A.F. Navia, J.P. Caldas, P.A. Mejía-Falla, J. Botero, S. Teillaud, M.C. Diazgranados, A. Suárez, V. Puentes y C.J. Polo Silva.** 2017. *Carcharhinus falciformis* Müller y Henle, **1839**: 121-125. En: Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A.F. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas (Eds.). Libro rojo de peces marinos de Colombia. Serie Publicaciones Generales Invenmar 93, Santa Marta. 552 p.

## Anexo

Lista filogenética de los peces marinos amenazados de Colombia. De cada especie se indican la distribución en Colombia (C Caribe, P Pacífico, CP ambos mares), la categoría de amenaza (CR críticamente amenazada, EN en peligro, VU vulnerable, NT casi amenazada y DD datos insuficientes) y, para las especies incluidas en el Libro Rojo, los factores de amenaza detectados (SP sobrepesca, DH destrucción del hábitat, HV historia de vida, ENSO El Niño Oscilación del Sur, CO colisiones) según los autores de cada ficha en el Libro Rojo (**Chasqui V., et al.**, 2017). Las especies colombianas categorizadas como amenazadas por la IUCN, pero no incluidas en la segunda edición del Libro Rojo colombiano se indican con un asterisco (\*).

Taxa	Distribución	Categoría	Amenazas
<b>Clase Chondrichthyes</b>			
<b>Orden Orectolobiformes</b>			
Familia Rhincodontidae			
<i>Rhincodon typus</i> Smith, 1828	CP	DD	CO
Familia Ginglymostomidae			
<i>Ginglymostoma cirratum</i> (Bonnaterre, 1788)	C	VU	SP, DH, HV
<b>Orden Lamniformes</b>			
Familia Odontaspidae			
<i>Odontaspis ferox</i> (Risso, 1810)*	P	VU	
Familia Lamnidae			
<i>Isurus oxyrinchus</i> Rafinesque, 1810	C	DD	SP
<i>Isurus paucus</i> Guitart Manday, 1966*	C	VU	
Familia Alopiidae			
<i>Alopias pelagicus</i> Nakamura, 1935	P	VU	SP
<i>Alopias superciliosus</i> Lowe, 1841	CP	NT	SP
<b>Orden Carcharhiniformes</b>			
Familia Triakidae			
<i>Mustelus henlei</i> (Gill, 1863)	P	VU	SP
<i>Mustelus lunulatus</i> Jordan y Gilbert, 1882	P	VU	SP
<i>Mustelus minicanis</i> Heemstra, 1997	C	VU	SP
Familia Carcharhinidae			
<i>Carcharhinus acronotus</i> (Poey, 1860)	C	DD	SP, DH
<i>Carcharhinus falciformis</i> (Müller y Henle, 1839)	CP	VU	SP
<i>Carcharhinus limbatus</i> (Müller y Henle, 1839)	CP	VU	SP, DH, HV
<i>Carcharhinus longimanus</i> (Poey, 1861)	CP	VU	SP
<i>Carcharhinus obscurus</i> (Lesueur, 1818)	C	DD	SP, DH
<i>Carcharhinus perezii</i> (Poey, 1876)	C	NT	SP
<i>Carcharhinus porosus</i> (Ranzani, 1839)	C	DD	SP, DH

Taxa	Distribución	Categoría	Amenazas
<i>Carcharhinus signatus</i> (Poey, 1868)*	C	VU	
<i>Galeocerdo cuvier</i> (Péron y Lesueur, 1822)	CP	NT	SP, HV
<i>Negaprion brevirostris</i> (Poey, 1868)	CP	NT	SP, HV
<i>Prionace glauca</i> (Linnaeus, 1758)	CP	NT	SP
<i>Rhizoprionodon porosus</i> (Poey, 1861)	C	NT	SP
Familia Sphyrnidae			
<i>Sphyrna corona</i> Springer, 1940	P	NT	SP
<i>Sphyrna lewini</i> (Griffith y Smith, 1834)	CP	VU	SP, HV
<i>Sphyrna mokarran</i> (Ruppell, 1837)	CP	VU	SP, HV
<i>Sphyrna tudes</i> (Valenciennes, 1822)*	C	VU	
<b>Orden Torpediniformes</b>			
Familia Narcinidae			
<i>Diplobatis colombiensis</i> Fechhelm y McEachran, 1984	C	EN	SP
<i>Diplobatis guamachensis</i> Martín Salazar, 1957	C	VU	SP
<i>Diplobatis ommata</i> (Jordan y Gilbert, 1890)*	P	VU	
<i>Narcine bancroftii</i> (Griffith y Smith, 1834)*	C	CR	
<i>Narcine leoparda</i> Carvalho, 2001	P	NT	SP, DH
<b>Orden Rhinopristiformes</b>			
Familia Trygonorrhinidae			
<i>Zapteryx xyster</i> Jordan y Evermann, 1896	P	DD	SP
Familia Rhinobatidae			
<i>Pseudobatos leucorhynchus</i> (Günther, 1867)	P	VU	SP, DH
<i>Pseudobatos prahli</i> (Acero P. y Franke, 1995)	P	NT	SP, DH
Familia Pristidae			
<i>Pristis pectinata</i> Latham, 1794	C	CR	SP, DH, HV
<i>Pristis pristis</i> (Linnaeus, 1758)	CP	CR	SP, HV
<b>Orden Myliobatiformes</b>			
Familia Dasyatidae			
<i>Hypanus americanus</i> (Hildebrand y Schroeder, 1928)	C	NT	SP, DH
<i>Hypanus longus</i> (Garman, 1880)	P	VU	SP
Familia Aetobatidae			
<i>Aetobatus narinari</i> (Euphrasen, 1790)	C	NT	SP, DH, HV
Familia Rhinopteridae			
<i>Rhinoptera brasiliensis</i> Müller, 1836*	C	EN	
Familia Mobulidae			
<i>Manta birostris</i> (Walbaum, 1792)	CP	DD	SP, HV
<b>Clase Actinopteri</b>			
<b>Orden Elopiformes</b>			
Familia Megalopidae			
<i>Megalops atlanticus</i> Valenciennes, 1847	CP	CR	SP, DH, HV
<b>Orden Clupeiformes</b>			
Familia Engraulidae			
<i>Cetengraulis edentulus</i> (Cuvier, 1829)	C	NT	SP, DH
<b>Orden Siluriformes</b>			
Familia Ariidae			
<i>Ariopsis canteri</i> Acero P., Betancur-R. y Marceniuk, 2017	C	EN	SP, DH
<i>Cathorops mapale</i> Betancur-R. y Acero P., 2005	C	VU	SP, DH
<i>Sciades proops</i> (Valenciennes, 1840)	C	VU	SP, DH

Taxa	Distribución	Categoría	Amenazas
<b>Orden Ophidiiformes</b>			
Familia Bythitidae			
<i>Ogilbichthys ferocis</i> Møller, Schwarzhans y Nielsen, 2004*	C	VU	
<i>Parasaccogaster melanomycter</i> (Cohen, 1981)	C	DD	DH
Familia Ophidiidae			
<i>Brotula clarkae</i> Hubbs, 1944	P	NT	SP
<b>Orden Batrachoidiformes</b>			
Familia Batrachoididae			
<i>Batrachoides manglae</i> Cervigón, 1964	C	VU	DH
<b>Orden Scombriformes</b>			
Familia Pomatomidae			
<i>Pomatomus saltatrix</i> (Linnaeus, 1766)*	C	VU	
Familia Scombridae			
<i>Katsuwonus pelamis</i> (Linnaeus, 1758)	CP	DD	SP
<i>Scomberomorus sierra</i> Jordan y Starks, 1895	P	NT	SP
<i>Thunnus alalunga</i> (Bonnaterre, 1788)	C	DD	SP
<i>Thunnus albacares</i> (Bonnaterre, 1788)	CP	NT	SP
<i>Thunnus obesus</i> (Lowe, 1839)	CP	VU	SP
<b>Orden Syngnathiformes</b>			
Familia Syngnathidae			
<i>Hippocampus erectus</i> Perry, 1810	C	VU	SP, DH
<i>Hippocampus ingens</i> Girard, 1858	P	VU	SP, DH
<i>Hippocampus reidi</i> Ginsburg, 1939	C	VU	SP, DH
<b>Orden Gobiiformes</b>			
Familia Gobiidae			
<i>Coryphopterus alloides</i> Böhlke y Robins, 1960*	C	VU	
<i>Coryphopterus eidolon</i> Böhlke y Robins, 1960*	C	VU	
<i>Coryphopterus hyalinus</i> Böhlke y Robins, 1960*	C	VU	
<i>Coryphopterus lipernes</i> Böhlke y Robins, 1960*	C	VU	
<i>Coryphopterus personatus</i> (Jordan y Thompson, 1905)*	C	VU	
<i>Coryphopterus thrix</i> Böhlke y Robins, 1960*	C	VU	
<i>Coryphopterus tortugae</i> (Jordan, 1904)*	C	VU	
<i>Coryphopterus venezuelae</i> Cervigón, 1966*	C	VU	
<i>Chriolepis lepidota</i> Findley, 1975	P	DD	ENSO
<i>Elacatinus prochilos</i> (Böhlke y Robins, 1968)*	C	VU	
<i>Gobiosoma spilotum</i> (Ginsburg, 1939)*	C	VU	
<i>Priolepis robinsi</i> Garzón-Ferreira y Acero P., 1991	C	DD	DH
<i>Tigrigobius nesiotes</i> (Bussing, 1990)	P	VU	ENSO
<b>Carangaria (orden incertae sedis)</b>			
Familia Centropomidae			
<i>Centropomus armatus</i> Gill, 1863	P	DD	SP
<i>Centropomus undecimalis</i> (Bloch, 1792)	C	VU	SP, HV
Familia Sphyraenidae			
<i>Sphyraena barracuda</i> (Edwards, 1771)	C	NT	SP, DH
<b>Orden Istiophoriformes</b>			
Familia Istiophoridae			
<i>Makaira nigricans</i> Lacepède, 1802	CP	VU	SP
Familia Xiphiidae			
<i>Xiphias gladius</i> Linnaeus, 1758	CP	DD	SP

Taxa	Distribución	Categoría	Amenazas
<b>Orden Carangiformes</b>			
Familia Carangidae			
<i>Caranx hippos</i> (Linnaeus, 1766)	C	VU	SP, HV
<b>Ovalentaria (orden incertae sedis)</b>			
Familia Pomacentridae			
<i>Stegastes beebei</i> (Nichols, 1924)	P	VU	ENOS
<b>Orden Beloniformes</b>			
Familia Belonidae			
<i>Tylosurus pacificus</i> (Steindachner, 1876)	P	DD	SP
<b>Orden Cyprinodontiformes</b>			
Familia Poeciliidae			
<i>Gambusia aestiputeus</i> Fowler, 1950	C	VU	DH
<i>Gambusia lemaitrei</i> Fowler, 1950	C	CR	DH
<b>Orden Mugiliformes</b>			
Familia Mugilidae			
<i>Joturus pichardi</i> Poey, 1860	C	VU	SP, DH, HV
<i>Mugil incilis</i> Hancock, 1830	C	VU	SP, DH
<i>Mugil liza</i> Valenciennes, 1836	C	VU	SP, HV
<b>Orden Blenniiformes</b>			
Familia Chaenopsidae			
<i>Acanthemblemaria stephensi</i> Rosenblatt y McCosker, 1988	P	VU	ENOS
<i>Emblemariopsis tayrona</i> (Acero P., 1987)	C	DD	DH
Familia Tripterygiidae			
<i>Axoclinus rubinoffi</i> Allen y Robertson, 1992	P	VU	ENOS
<i>Lepidonectes bimaculatus</i> Allen y Robertson, 1992	P	VU	ENOS
<b>Eupercaria (orden incertae sedis)</b>			
Familia Sciaenidae			
<i>Cynoscion phoxocephalus</i> Jordan y Gilbert, 1882	P	VU	SP
<b>Orden Gerreiformes</b>			
Familia Gerreidae			
<i>Eugerres plumieri</i> (Cuvier, 1830)	C	VU	DH
<b>Orden Labriformes</b>			
Familia Labridae			
<i>Halichoeres malpelo</i> Allen y Robertson, 1992	P	VU	ENOS
<i>Lachnolaimus maximus</i> (Walbaum, 1792)	C	EN	SP, DH, HV
<i>Scarus coelestinus</i> Valenciennes, 1840	C	EN	SP, DH
<i>Scarus coeruleus</i> (Edwards, 1771)	C	EN	SP, DH, HV
<i>Scarus guacamaia</i> Cuvier, 1829	C	EN	SP, DH, HV
<i>Scarus vetula</i> Bloch y Schneider, 1801	C	NT	SP, DH
<i>Sparisoma viride</i> (Bonnaterre, 1788)	C	NT	SP, DH
<b>Orden Lutjaniformes</b>			
Familia Haemulidae			
<i>Anisotremus moricandi</i> (Ranzani, 1842)	C	VU	DH
Familia Lutjanidae			
<i>Lutjanus analis</i> (Cuvier, 1828)	C	VU	SP, DH
<i>Lutjanus campechanus</i> (Poey, 1860)*	C	VU	
<i>Lutjanus cyanopterus</i> (Cuvier, 1828)	C	VU	SP, DH, HV
<i>Lutjanus guttatus</i> (Steindachner, 1869)	P	NT	SP
<i>Lutjanus jocu</i> (Bloch y Schneider, 1801)	C	DD	SP

Taxa	Distribución	Categoría	Amenazas
<i>Lutjanus peru</i> (Nichols y Murphy, 1922)	P	NT	SP
<i>Ocyurus chrysurus</i> (Bloch, 1791)	C	NT	SP
<i>Rhomboplites aurorubens</i> (Cuvier, 1829)*	C	VU	
<b>Orden Spariformes</b>			
Familia Sparidae			
<i>Pagrus pagrus</i> (Linnaeus, 1758)	C	DD	SP
<b>Orden Tetraodontiformes</b>			
Familia Molidae			
<i>Mola mola</i> (Linnaeus, 1758)*	CP	VU	
Familia Balistidae			
<i>Balistes caprisicus</i> Gmelin, 1789*	C	VU	
<i>Balistes vetula</i> Linnaeus, 1758	C	EN	SP
Familia Tetraodontidae			
<i>Sphoeroides georgemilleri</i> Shipp, 1972	C	DD	SP
<b>Orden Perciformes</b>			
Familia Serranidae			
<i>Dermatolepis inermis</i> (Valenciennes, 1833)	C	DD	DH
<i>Epinephelus cifuentesi</i> Lavenberg y Grove, 1993	P	VU	SP
<i>Epinephelus guttatus</i> (Linnaeus, 1758)	C	NT	SP, DH
<i>Epinephelus itajara</i> (Lichtenstein, 1822)	C	CR	SP, DH, HV
<i>Epinephelus quinquefasciatus</i> (Bocourt, 1868)	P	DD	SP
<i>Epinephelus striatus</i> (Bloch, 1792)	C	CR	SP, DH
<i>Hypoplectrus providencianus</i> Acero P. y Garzón-Ferreira, 1994	C	NT	DH
<i>Hyporthodus acanthistius</i> (Gilbert, 1892)	P	NT	SP
<i>Hyporthodus nigritus</i> (Holbrook, 1855)	C	DD	DH
<i>Hyporthodus niphobles</i> (Gilbert y Starks, 1897)	P	DD	SP
<i>Hyporthodus niveatus</i> (Valenciennes, 1828)	C	DD	SP
<i>Mycteroperca bonaci</i> (Poey, 1860)	C	VU	SP, DH, HV
<i>Mycteroperca cidi</i> Cervigón, 1966	C	VU	SP
<i>Mycteroperca interstitialis</i> (Poey, 1860)*	C	VU	
<i>Mycteroperca olfax</i> (Jenyns, 1840)	P	VU	SP
<i>Mycteroperca tigris</i> (Valenciennes, 1833)	C	NT	SP, DH
<i>Mycteroperca venenosa</i> (Linnaeus, 1758)	C	VU	SP, DH
<i>Mycteroperca xenarcha</i> Jordan, 1888	P	DD	SP

# Environmental Scanning Electron Microscopy of the Infection Process of *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* in Seedlings of Passionfruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*)

Jacobo Robledo-Buriticá, Carolina Ángel-García, Jairo Castaño-Zapata\*

Departamento de Producción Agropecuaria, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo de Investigación y Proyección Producción Agropecuaria (GIPPA), Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

## Abstract

Environmental scanning electron microscopy (ESEM) was performed in seedlings of *Passiflora edulis* f. *flavicarpa* inoculated with *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* (teleomorph: *Haematonectria haematococca*) causal agent of passionfruit collar rot. Inoculations were carried out every 24 h until the seventh day and from this day until the fifteenth the interval of inoculation was 72 h. The pathogen isolated in PDA media was placed on the surface of the collar through the modified test-tube screening methodology. Epidermis of collar, stem, and leaves and longitudinal sections of collar and stem were observed. After 24 h of inoculation, conidia and dense septate mycelium were observed over the epidermis of the stem and the collar, respectively. Hypertrophy and cell wall degradation of the vascular tissues were also found during this period. Five days after the inoculation macroconidia were formed from monophialides in the aerial mycelium on the stem. Ten days after inoculation, xylem and pith cells of the collar were colonized by hyphae, inclusions, and mature sporodochia over the stem surface. Hyphae colonization started six days after inoculation on stomata and thirteen days after inoculation monophialides with *in situ* microconidia were observed over the surface of the leaves. Based on the evidence and previous studies, internal hyphae colonization of *F. solani* f. sp. *passiflorae* concentrates on the collar area and the damages of the cells indicate an extracellular enzymatic activity of the fungus. The incubation and latent periods of *F. solani* f. sp. *passiflorae* were 1.4 and 4 days, respectively. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key Words:** Plant diseases; fungal diseases; Passifloraceae; collar rot; scanning microscopy.

**Microscopía electrónica de barrido ambiental del proceso de infección de *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* en plántulas de maracuyá (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*)**

## Resumen

Se realizó microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) en plántulas de maracuyá (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) inoculadas con *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* (teleomorfo: *Haematonectria haematococca*) agente causal de la secadera. Las inoculaciones se realizaron cada 24 h hasta el séptimo día y hasta el día quince el intervalo fue de 72 h. El aislamiento en medio de papa (PDA) se colocó sobre el cuello de la raíz mediante la metodología de cribado en tubos de ensayo modificada. La superficie del cuello, tallo, hojas y secciones longitudinales del cuello y tallo fueron observadas. Después de 24 h de la inoculación, se observaron conidios y micelio denso septado sobre la epidermis del tallo y el cuello e hipertrofia y degradación de la pared celular de los tejidos vasculares. Al quinto día se formaron macroconidios a partir de monofialides en el micelio aéreo en el tallo. Diez días después, las células del xilema y médula del cuello fueron colonizadas por hifas, esporodocios maduros e inclusiones. La colonización de las estomas por las hifas comenzó seis días después de la inoculación y trece días después de la inoculación se observaron monofialides con microconidios *in situ* sobre la superficie foliar. Basados en la evidencia y estudios previos, la colonización interna por hifas de *F. solani* f. sp. *passiflorae* se concentra en el área del cuello y los daños de las células indican una actividad enzimática extracelular del hongo. El periodo de incubación y latencia de *F. solani* f. sp. *passiflorae* fue de 1,4 y 4 días, respectivamente. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Enfermedades de plantas; Enfermedades fungosas; Passifloraceae; Pudrición del cuello; Microscopía de barrido.

## \*Corresponding autor:

Jairo Castaño-Zapata, [jairo.castano\\_z@ucaldas.edu.co](mailto:jairo.castano_z@ucaldas.edu.co); **Received:** April 28, 2017; **Accepted:** June 9, 2017

## Introduction

Yellow passionfruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Degener) is one of the most important fruits of *Passiflora* genus and Passifloraceae family (Isaacs, 2009; Miranda, et al. (2008); Ocampo, 2007; Souza, et al., 2002). Passionfruit is widely used in the food industry due to its edible qualities while passionflower (flowers of *P. edulis*) is recognized by its effects in the Central Nervous System and its implementation in traditional medicine in South America and India (Patel, 2009; Montanher, et al., 2007; Ocampo, 2007). However, many diseases in the plantations of *P. edulis* f. *flavicarpa* decrease yield, reduce productive life of the plants, and in some cases, can completely destroy the crops (Vaca-Vaca, et al., 2016; Ocampo, et al., 2013; Cavichioli, et al., 2011; Fischer, et al., 2010; Fischer, et al., 2005).

Diseases in passionfruit crops caused by phytopathogenic species of *Fusarium* genus produce significant crop losses (Oliveira-Freitas, et al., 2016; Preisigke, et al., 2015a; Preisigke, et al., 2015b; Silva, et al., 2013; Fischer, et al., 2010; Bueno, 2009). Although four species of fungi belonging to *Fusarium* have been described producing symptoms in *P. edulis* f. *flavicarpa* in Colombia, *Fusarium oxysporum* Schltdl. and *F. solani* f. sp. *passiflorae* proposed by Bueno, et al. (2014) [teleomorph: *Haematonectria haematococca* (Berk. & Broome) Samuels & Rossman] represent the most common source of Fusarium wilt (Ortíz, et al., 2014; Londoño, 2012; Gardner, 1989). Both *F. oxysporum* and *F. solani* produce structural damages in xylem, phloem, cambium, and parenchymatous cells (Saniewska, Dyki, & Jarecka, 2004; Bishop & Cooper, 1983). However, *F. oxysporum* penetrates through the roots and moves into the vascular system and *F. solani* f. sp. *passiflorae* concentrates in the collar area causing the collar rot disease of *P. edulis* (Ortíz, et al., 2014).

Plants of *P. edulis* infected by *Haematonectria haematococca* (Anamorph: *F. solani* f. sp. *passiflorae*) present a progressive loss of vigor, wilt, defoliation, roughness in the fruits, chlorosis, vascular necrosis, eventually perithecia formation, collar rot and finally death (Ortíz & Hoyos, 2012). *F. solani* is favored by high temperature and relative humidity. Irrigation water, rainfalls, and wind are dissemination factors of reproductive structures of the fungus (Nelson, Toussoun, & Marasas, 1983). Chemical and biological control of passionfruit collar rot is ineffective due to the presence of resistance structures of *F. solani* (chlamydospores) in the soil for long periods of time. This fact forces to eradicate complete crops and performs the cultivation in new areas free from the pathogen (Flores, et al., 2012; Londoño, 2012; Castaño-Zapata, 2009; Agrios, 2005; Nelson, Dignani, & Anaissie, 1994).

Histopathological features of plants of passionfruit infected by *F. solani* f. sp. *passiflorae* and its symptomatology associated with collar rot have been studied in detail (Ortíz, et al., 2014; Ortíz & Hoyos, 2012). However, damages produced by this pathogen in the surface of the plant

and its progress over time in *P. edulis* f. *flavicarpa* are not well known. This study aims to perform environmental scanning electron microscopy (ESEM) in *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings inoculated with *F. solani* f. sp. *passiflorae* observing the progress of the damages over time.

## Materials and methods

Seeds of *Passiflora edulis* f. *flavicarpa*, obtained from susceptible commercial crops located in the department of Caldas (Colombia), were planted under controlled conditions of temperature and light at 29°C and 12 h photoperiod in autoclaved soil. When seeds germinated and reached two true leaves (three to four weeks after planting), they were carefully removed from the soil and disinfested by immersing each seedling in 2% sodium hypochlorite and 70% ethanol for 2 minutes and 50 seconds, respectively. Posteriorly, seedlings were washed with sterile distilled water and inoculated by placing a segment of potato dextrose agar (PDA) media with the fungus using the modified test-tube screening methodology proposed by Ángel-García, Robledo-Buriticá, & Castaño-Zapata (submitted Boletín Científico Centro de Museos, 2017). Inoculations were carried out in three seedlings every 24 h until the seventh day. From this day to the fifteenth day the interval of inoculation was 72 h. Inoculated seedlings grew up under the same conditions previously mentioned.

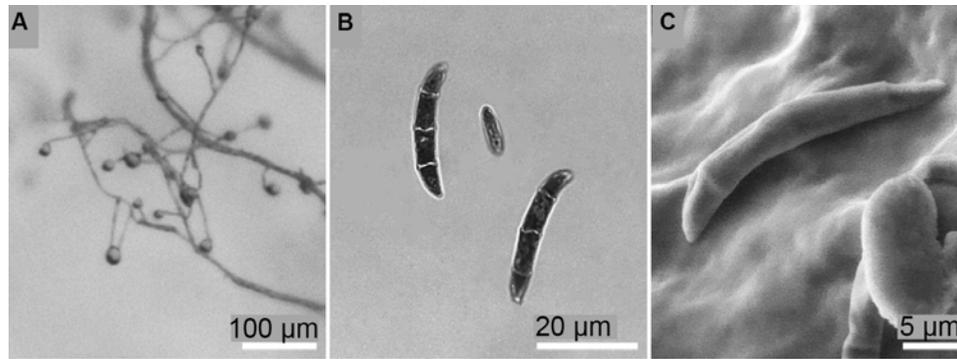
The monosporic isolate of *F. solani* f. sp. *passiflorae* MViRi01 was used as inoculum. This isolate was tested for its pathogenicity following the Koch's postulates. Morphological characterization was performed through optical and electronic microscopy on carnation leaf agar (CLA) and PDA media (Figure 1) following the recommendations of Leslie & Summerell (2006). For the inoculation, *F. solani* f. sp. *passiflorae* MViRi01 was cultivated in PDA media until reproductive structures (microconidia) were observed.

Samples of 5 mm length of the external surface (Figure 2A) and longitudinal section (Figure 2B) of tissues from collar, stem and leaves of each inoculated plant were observed. Sections of the tissues were operated manually after treating them at temperature of 4°C for two minutes. Every tissue was submitted to an amplification of 200x, 500x, 1000x, 2000x, 5000x, and a maximum of 8000x. The total number of observations was 30 plants.

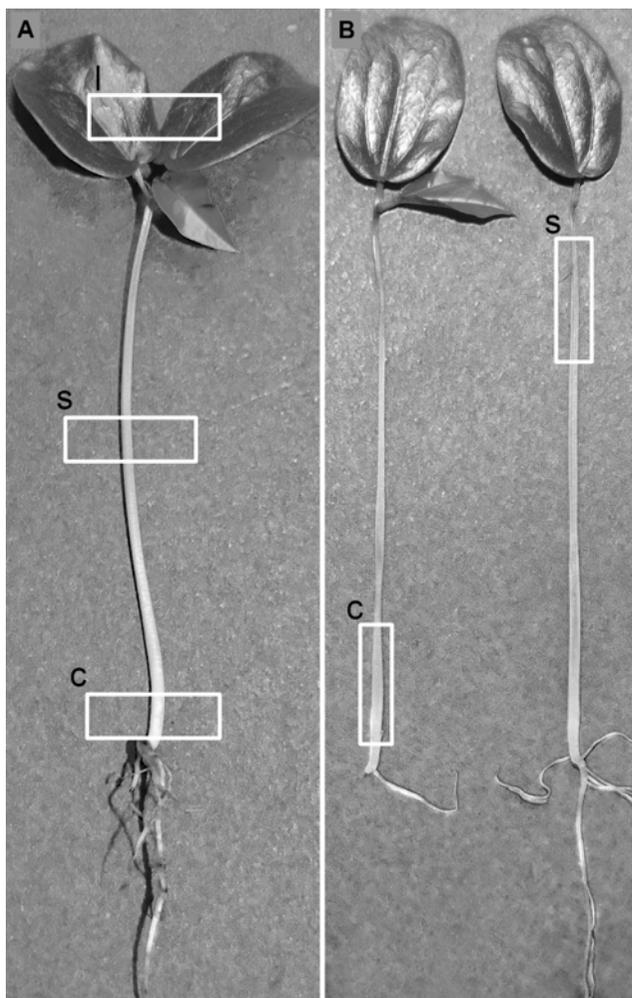
Observation was carried out by using a scanning electron microscope FEI-QUANTA FEG 250 in environmental scanning electron microscopy (ESEM<sup>TM</sup>) mode at low vacuum (2.600 Pa) and at an acceleration voltage of 10 kV. Images were analyzed by using the software ImageJ (Schneider, Rasband, & Eliceiri, 2012).

## Results

**Surface and longitudinal section of the collar.** Epidermal cells of the collar of non-inoculated seedlings of *P. edulis* f. *flavicarpa* presented a rectangular, semi-square, and polygonal shape with an average surface area of 536.2  $\mu\text{m}^2$ , well-defined

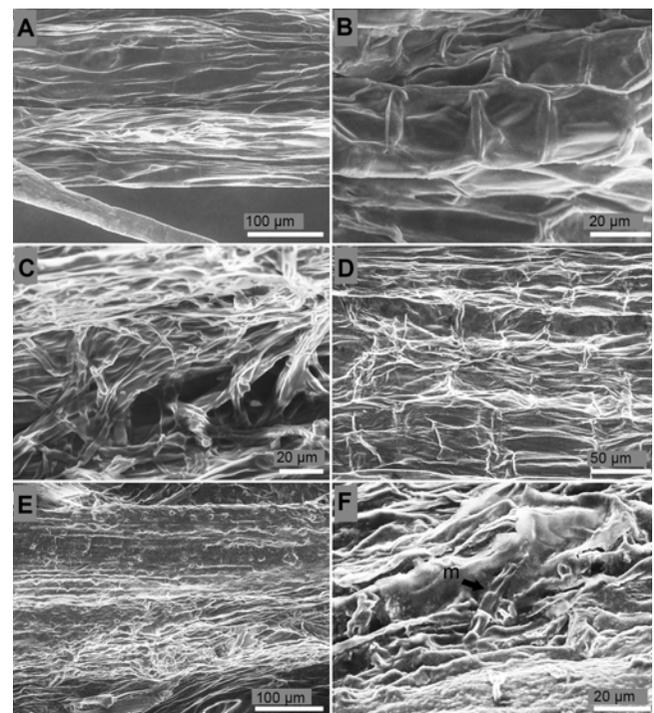


**Figure 1.** Morphological features of *F. solani* MViRi01 isolate on CLA. (A) Monophialides with microconidia *in situ*. (B) Macroconidia and microconidium. (C) Scanning electron microscopy of a macroconidium.



**Figure 2.** Observed areas in *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings. (A) Examination sites on the surface of the seedling: *c*, collar; *s*, stem; *l*, leaves. (B) Examination sites of longitudinal sections of the seedling: *c*, collar; *s*, stem.

cell walls, and complete absence of hyphae and reproductive structures of the fungus (Figure 3A, B). Inoculated plants 24 h after inoculation were deeply overgrown with septate hyphae



**Figure 3.** Surface of the collar of *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings. (A, B) Surface of the collar of non-inoculated seedling. (C) Septate hyphae colonization over the surface of the collar 24 h after inoculation. (D) Cell wall degradation and loss of turgor pressure of the epidermal cells of the collar four days after inoculation. (E) Degradation of the epidermis of the collar ten days after inoculation. (F) Single macrocodium (*m*) on rot tissues over the epidermis of the collar ten days after inoculation.

causing moderate rugosity over the collar epidermis (Figure 3C). Epidermal cells of the collar four days after inoculation showed severe rugosity, 25% reduction of the cell wall thickness, and cell wall collapse (Figure 3D). Collar cells of the seedlings ten days after inoculation were unrecognizable, cell walls were not distinguished, the collar total width was reduced from 539.7  $\mu\text{m}$  to 258.3  $\mu\text{m}$ , and the tissue presented a heterogeneous texture indicating

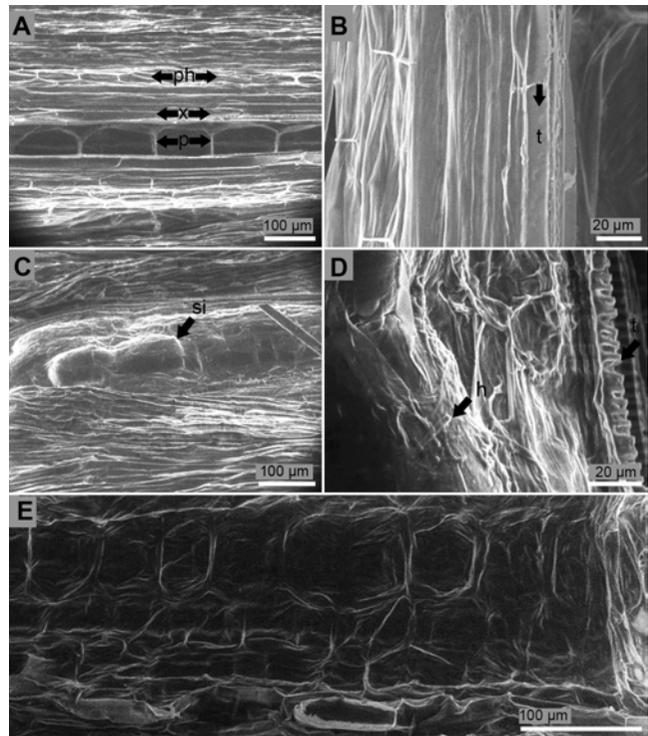
rot (Figure 3E). Although reproductive structures were not observed massively in the collar surface, some areas of the collar presented disperse macroconidium (Figure 3F).

Longitudinal section of the collar of non-inoculated seedlings presented parenchymatous elongated cells in the center (pith or medulla) separated by an average length of 126.9  $\mu\text{m}$ . Xylem cells surrounded pith cells and subsequently phloem cells encircled xylem cells. No hyphae or conidia were found in the collar of non-inoculated seedlings (Figure 4A, B). Pith cells ten days after inoculation suggested the presence of inclusions (Figure 4C) and hyphae colonization (Figure 4C, D). Phloem and xylem cells developed hypertrophy, degradation of the cell wall, and rot (Figure 4E). No conidia were found inside the tissue of the collar.

**Surface and longitudinal section of the stem.** Stem surface of non-inoculated seedlings of *P. edulis* f. *flavicarpa* were completely free from mycelia and conidia (Figure 5A). On the surface of the seedlings 24 hours after inoculation straight and slightly curved macroconidia of 36  $\mu\text{m}$  length, blunt apical cell, and barely notched basal cell were observed. Microconidia of 8.3  $\mu\text{m}$  length, ellipsoid, reniform and fusiform shape were also detected (Figure 5B). Five days after inoculation formation of macroconidia in a dense non mature sporodochium and aerial mycelium in short monophialides were distinguished (Figure 5C, D). During this period abundant mycelium was observed around the stem (Figure 5E). Ten days after inoculation microconidia were developed in relatively long and abundant monophialides (Figure 5F). Thirteen days after inoculation sporodochia were fully developed (Figure 5G) and monophialides with microconidia *in situ* reached a spherical shape with equal longitudinal and transversal radio of 9.9  $\mu\text{m}$  length (Figure 5H).

Rectangular elongated cells with cell walls well defined composed the healthy stem from non-inoculated seedlings (Figure 6A). Phloem cells from 24 hours after inoculation seedlings presented degradation. However, xylem cells did not acquire any damage (Figure 6B) and tracheid side-to-side hyphae colonization was not seen (Figure 6C). Four days after inoculation both phloem and cortex cells presented rugosity indicating water deficit (Figure 6D). Five days after inoculation structure of the cells of stem of inoculated seedlings was destroyed, no cell walls were distinguished, and cell structure was non-functional (Figure 6E). Similar results were obtained seven days after inoculation (Figure 6F).

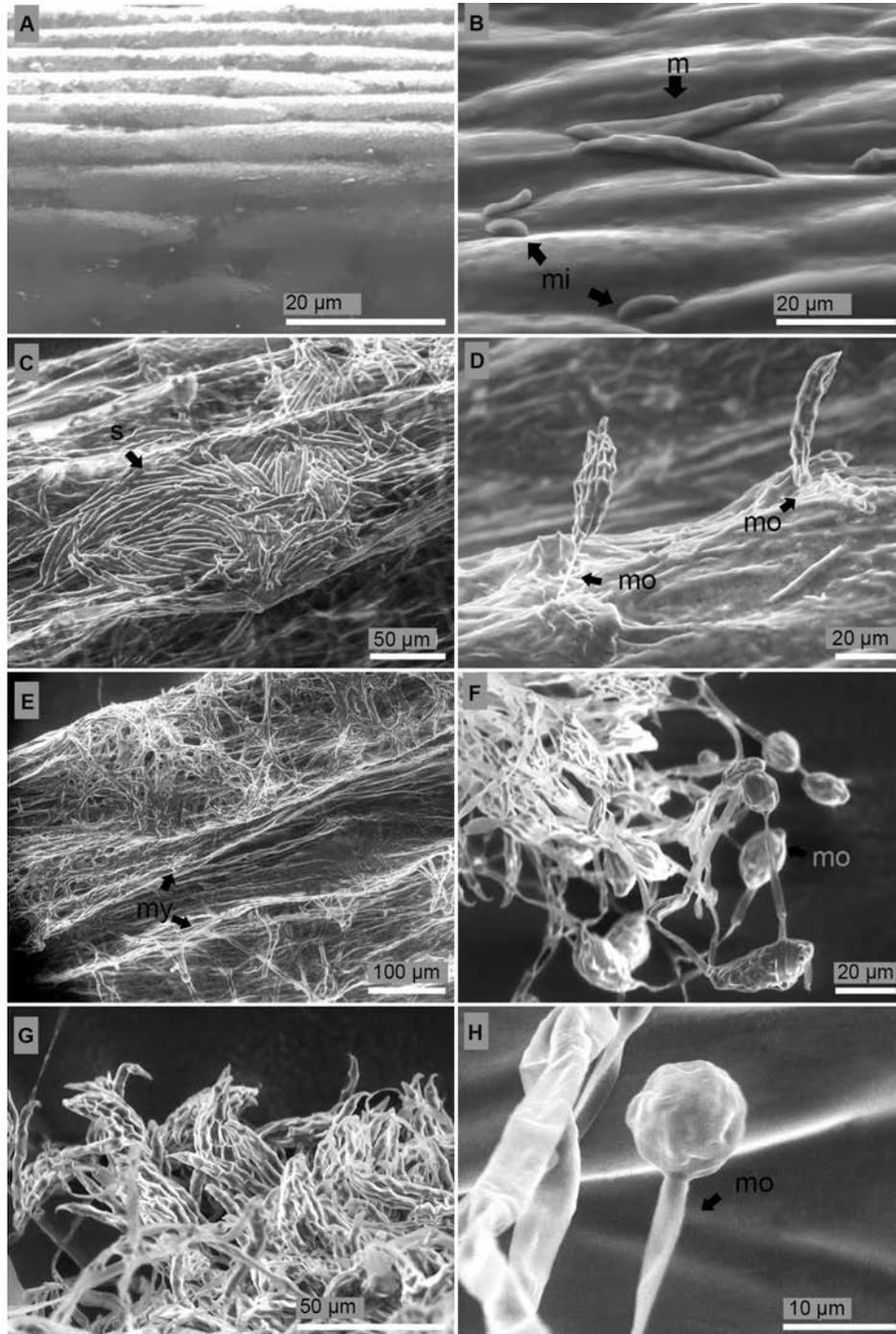
**Surface of the leaves.** *Fusarium* structures over the leaf surface came out from stomata six days after inoculation (Figure 7B). Leaf surface of non-inoculated seedlings were not overgrowth with mycelia of the fungus and stomata were free from any sign of the pathogen (Figure 7A, D). Thirteen days after inoculation monophialides appeared. Apical cell (false heads) of monophialides was joined to a relatively long conidiophore (74  $\mu\text{m}$  length). Microconidia *in situ* were observed thirteen days after inoculation in leaf surface (Figure 7C) while macroconidia were not observed in these tissues. Deep colonization of leaf surface was carried out thirteen days after inoculation (Figure 7E).



**Figure 4.** Longitudinal section of the collar of *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings. (A, B) Non-inoculated seedling: *p*, pith; *ph*, phloem; *x*, xylem; *t*, tracheid. (C) Suggested inclusion (*si*) inside pith cells of the collar ten days after inoculation. (D) Hyphae (*h*) colonization of the inner tissues of the collar ten days after inoculation: *t*, tracheid. (E) Degraded cells and cell walls of the inner tissues of the collar ten days after inoculation.

## Discussion

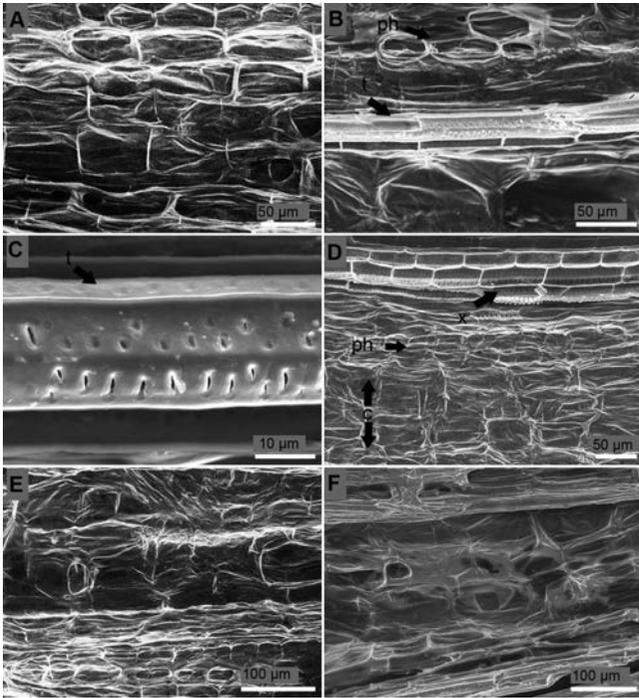
Environmental scanning electron microscopy (ESEM) performed in this study allowed to reveal the presence, progress, distribution and localization of *F. solani* f. sp. *passiflorae* hyphae and reproductive structures (macro and microconidia) on the surface of collar, stem, and the leaves of infected *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings. The results suggest that, even though mycelium was detected in the external of both leaves and stem, faster and larger amount of hyphae colonization appear over the collar surface and concentrate on the collar internal tissues after hyphae penetrate from the epidermis to the xylem and pith. These observations coincide with studies developed on seedlings of pea inoculated with *Fusarium solani* f. sp. *pisi* that claim that infection of this pathogen can start at the base of the stem or stomata through directly cuticle degradation via cutinase enzymes (Pietro, *et al.*, 2003; Rogers, Flaishman, & Kolattukudy, 1994; Köller, Allan, & Kolattukudy, 1982; Shaykh, Soliday, & Kolattukudy, 1977). Natural infection of *Fusarium solani* in *P. edulis* f. *flavicarpa* occurs from the periderm to the pith of the collar tissues directly associated with symptoms observed in the field (Ortiz, *et al.*, 2014; Ortiz & Hoyos, 2012).



**Figure 5.** Surface of the stem of *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings. (A) Non-inoculated seedling. (B) Macro (*m*) and microconidia (*mi*) 24 h after inoculation. (C) Non-mature sporodochium (*s*) five days after inoculation. (D) Monophialides (*mo*) containing macroconidia five days after inoculation. (E) Dense mycelium (*my*) five days after inoculation. (F) Mature sporodochium with monophialides ten days after inoculation. (G) Mature sporodochium thirteen days after inoculation. (H) Monophialide (*mo*) with microconidia *in situ* thirteen days after inoculation.

The surface of the leaves of inoculated seedlings suggested an infection caused by hyphae. However, hyphae colonization in these tissues was significantly lower compared to those obtained in collar sections. Images from internal tissues of the stem did not reveal presence of hyphae. Nevertheless, hypertrophy, cell wall degradation, losses of turgor

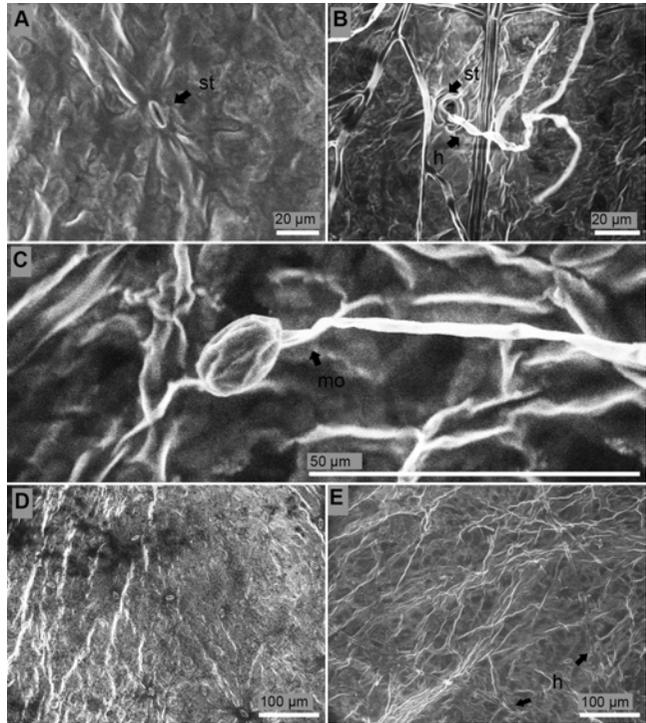
pressure in the cells, and rot was observed in stem internal tissues. These symptoms are likely a sign of enzymatic activity produced by the fungus (Ortiz, *et al.*, 2014; Köller, *et al.*, 1982; Bateman & Basham, 1976). According to Bueno, *et al.* (2009) different isolates of *F. solani* f. sp. *passiflorae* from collar rot tissues of *P. edulis* f. *flavicarpa*



**Figure 6.** Longitudinal section of the stem of *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings. (A) Non-inoculated seedling. (B) Degraded vascular vessels 24 hours after inoculation: *t*, tracheid; *ph*, phloem. (C) Tracheid (*t*) with no signs of side-to-side hyphae colonization 24 h after inoculation. (D) Losses of turgor pressure of parenchymatous cells of the cortex four days after inoculation: *c*, cortex; *ph*, phloem; *x*, xylem. (E) Rot tissues five days after inoculation. (F) Rot tissues seven days after inoculation.

produce extracellular enzymes such as amylase, lipase, cellulase, protease, and lacase. Some similar symptoms of cell degradation have been reported in wheat infected by *F. culmorum* and *F. graminearum* (Jackowiak, *et al.*, 2005; Kang & Buchenauer, 2002; Schwarz, *et al.*, 1997; Meyer, Weipert, & Mielke, 1986) banana infected by *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (Meiting & Shaosheng, 2010), potato infected by *F. roseum* (Mullen & Bateman, 1975), and maize infected by *F. graminearum* (Gao, *et al.*, 2004).

According to Ángel-García, Robledo-Buriticá, Castaño-Zapata (submitted Boletín Científico Centro de Museos, 2017) the first symptoms of collar rot of *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings in the modified test-tube screening methodology appear 2.4 days after inoculation. Results obtained in this study show that infection starts within 24 h after inoculation and 5 days after inoculation reproductive structures of *F. solani* f. sp. *passiflorae* were observed. These values suggest an approximate incubation period and latent period (respectively defined by Van der Plank (1963) as the time needed for infection to become visible and the time infected tissues take to become infectious) of 1.4 and 4 days. Similar results have been obtained in *F. solani* f. sp. *pisi* by Short & Lacy (1974) who determine that chlamydospores of the pathogen germinate after 24 h when a germinating seed



**Figure 7.** Surface of the leaves of *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings. (A) Stoma (*st*) of non-inoculated seedling. (B) Hyphae (*h*) colonized stomata (*st*) six days after inoculation. (C) Monophialide (*mo*) with microconidia *in situ* thirteen days after inoculation. (D) Healthy leaves. (E) Presence of hyphae (*h*) thirteen days after inoculation.

is placed 7 mm away. Shaykh, *et al.* (1977) also claim that this pathogen began to penetrate the host within 10 h after inoculation and after 18 h the hyphae penetrates the tissue.

Although reproductive structures of *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* were mainly observed over the surface of the stem and leaves, no conidia were detected into internal tissues, and side-to-side vessel colonization was not confirmed. In addition, images that suggest inclusions inside pith cells of the collar are not conclusive and new studies must be proposed. However, Ortíz, *et al.* (2014) report that *F. solani* f. sp. *passiflorae* possibly colonizes from the collar to the stem through the xylem, microconidia are present among vessel lumen in *P. edulis* tissues, and gels are the most common type of inclusion. Morphology of macroconidia, microconidia and monophialides presented on the stem and leaves surface always coincide with the description of *F. solani* reported by Leslie & Summerell (2006).

## Conclusions

1. Hyphae of *F. solani* f. sp. *passiflorae* colonize collar, stem, and leaves surface of *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings. However, hyphae colonization of internal structures concentrates on the collar while macroconidia, microconidia, and monophialides concentrate mainly on the stem epidermis and at lower levels on the leaves.

2. Damages caused in the cell wall of pith, xylem, phloem, and parenchymatous tissues of *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings, even when hyphae colonization is not present; indicate an extracellular enzymatic activity produced by *F. solani* f. sp. *passiflorae*.
3. Based on this study and additional studies, the incubation and latent periods of *F. solani* f. sp. *passiflorae* inoculated through the modified test-screening methodology in *P. edulis* f. *flavicarpa* seedlings are 1.4 days and 4 days, respectively
4. Although inclusions in pith cells is suggested in this study and related studies, new research is needed in order to verify this hypothesis.

### Acknowledgments

The authors would like to thank to the GIPPA Research Group of the Universidad de Caldas, doctor Nelson Ceballos-Aguirre, doctor Alejandro Hurtado-Salazar, Engineer Gustavo Adolfo Bolaños-Gallardo, M.Sc. Walter Ricardo López, Mr. Luis Bernardo Gutierrez-Ríos, and Juan Pablo Ríos-Restrepo for their contributions through this study.

### Conflict of interest

The paper was prepared and reviewed with the participation of the authors, who declare that there is no conflict of interest that put in risk the validity of the results obtained in this research.

### References

- Agrios, G. N.** (2005). Plant pathology (Vol. 5). Burlington: Elsevier Academic Press.
- Bateman, D. F., & Basham, H. G.** (1976). Degradation of plant cell walls and membranes by microbial enzymes. In R. Heitefuss, & P.H. Williams, (eds.). *Physiological Plant Pathology*. (pp.316-355). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Bishop, C. D., & Cooper, R. M.** (1983). An ultrastructural study of vascular colonization in three vascular wilt diseases I. Colonization of susceptible cultivars. *Physiological Plant Pathology*, **23** (3): 323-343.
- Bueno, C. J., Fischer, I. H., Rosa, D. D., & Furtado, E. L.** (2009). Production of extracellular enzymes by *Fusarium solani* from yellow passionfruit. *Tropical Plant Pathology*, **34** (5): 343-346.
- Bueno, C. J., Fischer, I. H., Rosa, D. D., Firmino, A. C., Harakava, R., Oliveira, C. M. G., & Furtado, E. L.** (2014). *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae*: a new forma specialis causing collar rot in yellow passion fruit. *Plant Pathology*, **63** (2): 382-389.
- Castaño-Zapata, J.** (2009). Important diseases of Passifloraceae in Colombia. In D. Miranda, G. Fischer, C. Carranza, S. Magnitskiy, F. Casierra, W. Piedrahíta, & L.E. Flórez (eds.). *Cultivo, Poscosecha y Comercialización de las Pasifloráceas en Colombia: Maracuyá, Granadilla, Gulupa y Curuba*. (pp.223-245). Bogotá: Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas.
- Cavichioli, J. C., Corrêa, L. de S., Boliani, A. C., & Dos Santos, C. P.** (2011). Growth and yield of yellow passionfruit grafted on three rootstocks. *Revista Brasileira de Fruticultura*, **33** (2): 558-566.
- Fischer, I. H., de Almeida, A. P., Fileti, M. de S., Bertani, R. M. de A., de Arruda, M. C., & Bueno, C. J.** (2010). Evaluation of passifloraceas, fungicides and *Trichoderma* for passionfruit collar rot handling, caused by *Nectria haematococca*. *Revista Brasileira de Fruticultura*, **32** (3): 709-717.
- Fischer, I. H., Lourenço, S. A., Martins, M. C., Kimati, H., & Amorim, L.** (2005). Selection of resistant plants and fungicides for the control of passionfruit collar rot, caused by *Nectria haematococca*. *Fitopatologia Brasileira*, **30** (3): 250-258.
- Flores, P. S., Otoni, W. C., Dhingra, O. D., de Souza Diniz, S. P. S., dos Santos, T. M., & Bruckner, C. H.** (2012). *In vitro* selection of yellow passionfruit genotypes for resistance to *Fusarium* vascular wilt. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, **108** (1): 37-45.
- Gao, H., Chen, J., He, J., Ning, J., Yu, B., Liu, J., & Ha, J.** (2004). The character of cell wall degradation enzyme produced by *Fusarium graminearum*. *Journal of Maize Sciences*, **13** (3): 112-113.
- Gardner, D. E.** (1989). Pathogenicity of *Fusarium oxysporum* f. sp. *passiflorae* to banana poka and other *Passiflora* spp. in Hawaii. *Plant Disease*, **73** (6): 476-478.
- Isaacs, M.** (2009). National and international markets of Passifloraceae fruit crops. In D. Miranda, G. Fischer, C. Carranza, S. Magnitskiy, F. Casierra, W. Piedrahíta, & L.E. Flórez (eds.). *Cultivo, Poscosecha y Comercialización de las Pasifloráceas en Colombia: Maracuyá, Granadilla, Gulupa y Curuba*. (pp.327-344). Bogotá: Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas.
- Jackowiak, H., Packa, D., Wiwart, M., & Perkowski, J.** (2005). Scanning electron microscopy of *Fusarium* damaged kernels of spring wheat. *International Journal of Food Microbiology*, **98** (2): 113-123.
- Kang, Z., & Buchenauer, H.** (2002). Studies on the infection process of *Fusarium culmorum* in wheat spikes: degradation of host cell wall components and localization of trichothecene toxins in infected tissue. *European Journal of Plant Pathology*, **108** (7): 653-660.
- Köller, W., Allan, C. R., & Kolattukudy, P. E.** (1982). Role of cutinase and cell wall degrading enzymes in infection of *Pisum sativum* by *Fusarium solani* f. sp. *pisi*. *Physiological Plant Pathology*, **20** (1): 47-60.
- Leslie, J., & Summerell, B.** (2006). *The Fusarium laboratory manual*. New York: Blackwell Publishing Professional.
- Londoño, J.** (2012). Evaluación de la resistencia genética de especies de *Passiflora* spp. a *Fusarium* spp. agente causal de la secadera. (M.Sc. Thesis), Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
- Meiting, L., & Shaosheng, Z.** (2010). Induction of extracellular cell wall-degrading enzymes from *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and their effect on degradation of banana tissue. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, **5**: 048.
- Meyer, D., Weipert, D., & Mielke, H.** (1986). Effects of *Fusarium culmorum* infection on wheat quality. *Getreide Mehl. Brot.*, **40**: 35-39.
- Miranda, P. M., Carvalho, C. R., Marcelino, F. C., Andréia, M., & Mendonça, C.** (2008). Morphological aspects of *Passiflora edulis* f. *flavicarpa* chromosomes using acridine orange banding and rDNA-FISH tools. *Caryologia*, **61** (2): 154-159.

- Montanher, A. B., Zucolotto, S. M., Schenkel, E. P., & Fröde, T. S.** (2007). Evidence of anti-inflammatory effects of *Passiflora edulis* in an inflammation model. *Journal of Ethnopharmacology*, **109** (2): 281-288.
- Mullen, J. M., & Bateman, D. F.** (1975). Enzymatic degradation of potato cell walls in potato virus X-free and potato virus X-infected potato tubers by *Fusarium roseum* 'Avenaceum'. *Phytopathology*, **65** (7): 797-802.
- Nelson, P. E., Dignani, M. C., & Anaissie, E. J.** (1994). Taxonomy, biology, and clinical aspects of *Fusarium* species. *Clinical Microbiology Reviews*, **7** (4): 479-504.
- Nelson, P. E., Toussoun, T. A., & Marasas, W. F. O.** (1983). *Fusarium* species: an illustrated manual for identification. Pennsylvania: Pennsylvania State University Press.
- Ocampo, J.** (2007). Study of the genetic diversity of genus *Passiflora* L. (Passifloraceae) and its distribution in Colombia. (Ph.D. Thesis). Montpellier: Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier – SupAgro.
- Ocampo, J., Urrea, R., Wyckhuys, K., & Salazar, M.** (2013). Exploration of the genetic variability of yellow passionfruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Degener) as basis for a breeding program in Colombia. *Acta Agronómica*, **62** (4): 352-360.
- Oliveira-Freitas, J. C. de, Viana, A. P., Santos, E. A., Paiva, C. L., de Lima e Silva, F. H., do Amaral Jr., A. T., & Dias, V. M.** (2016). Resistance to *Fusarium solani* and characterization of hybrids from the cross between *P. mucronata* and *P. edulis*. *Euphytica*, **208** (3): 493-507.
- Ortiz, E., & Hoyos, L.** (2012). Description of the symptomatology associated with fusariosis and its comparison with other diseases for the purple passionfruit (*Passiflora edulis* Sims.) in the Sumapaz region (Colombia). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, **6** (1): 110-116.
- Ortiz, E., Cruz, M., Melgarejo, L. M., Marquínez, X., & Hoyos-Carvajal, L.** (2014). Histopathological features of infections caused by *Fusarium oxysporum* and *F. solani* in purple passionfruit plants (*Passiflora edulis* Sims). *Summa Phytopathologica*, **40** (2): 134-140.
- Patel, S. S.** (2009). Morphology and pharmacology of *Passiflora edulis*: a review. *Journal of Herbal Medicine and Toxicology*, **3** (1): 1-6.
- Pietro, A. D., Madrid, M. P., Caracuel, Z., Delgado-Jarana, J., & Roncero, M. I. G.** (2003). *Fusarium oxysporum*: exploring the molecular arsenal of a vascular wilt fungus. *Molecular Plant Pathology*, **4** (5): 315-325.
- Preisigke, S. da C., Martini, F. V., Rossi, A. A. B., Serafim, M. E., Barelli, M. A. A., da Luz, P. B., & Neves, L. G.** (2015a). Genetic variability of *Passiflora* spp. against collar rot disease. *Australian Journal of Crop Science*, **9** (1): 69-74.
- Preisigke, S. da C., Neves, L. G., Araújo, K. L., Barbosa, N. R., Serafim, M. E., & Krause, W.** (2015b). Multivariate analysis for the detection of *Passiflora* species resistant to collar rot. *Bioscience Journal*, **31** (6): 1700-1707.
- Rogers, L. M., Flaishman, M. A., & Kolattukudy, P. E.** (1994). Cutinase gene disruption in *Fusarium solani* f. sp. *pisi* decreases its virulence on pea. *The Plant Cell*, **6** (7): 935-945.
- Saniewska, A., Dyki, B., & Jarecka, A.** (2004). Morphological and histological changes in tulip bulbs during infection by *Fusarium oxysporum* f. sp. *tulipae*. *Phytopathologia Polonica*, **34**: 21-39.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W.** (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, **9** (7): 671-675.
- Schwarz, P., Casper, H., Barr, J., & Musial, M.** (1997). Impact of *Fusarium* head blight on the malting and brewing quality of barley. *Cereal Research Communications*, 813-814.
- Shaykh, M., Soliday, C., & Kolattukudy, P. E.** (1977). Proof for the production of cutinase by *Fusarium solani* f. *pisi* during penetration into its host, *Pisum sativum*. *Plant Physiology*, **60** (1): 170-172.
- Short, G.E., & Lacy, M.L.** (1974). Germination of *Fusarium solani* f. sp. *pisi* chlamydospores in the spermosphere of pea. *Phytopathology*, **64**: 558-562.
- Silva, S., Oliveira, E. J. de, Haddad, F., Laranjeira, F. F., Jesus, N. de, Oliveira, S. A. S. de, ... do Amaral Jr., A. T.** (2013). Identification of passionfruit genotypes resistant to *Fusarium oxysporum* f. sp. *passiflorae*. *Tropical Plant Pathology*, **38** (36): 236-242.
- Souza, M. M. de, Santana-Pereira, T. N., Hoffmann, M., Melo, E. J. T. de, & Pereira-Louro, R.** (2002). Embryo sac development in yellow passionfruit *Passiflora edulis* f. *flavicarpa* (Passifloraceae). *Genetics and Molecular Biology*, **24** (4): 471-475.
- Vaca-Vaca, J. C., Carrasco-Lozano, E. C., Rodríguez-Rodríguez, M., Betancur-Perez, J. F. and López-López, K.** (2016). First report of a begomovirus presents in yellow passionfruit [*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* (Degener)] in Valle del Cauca, Colombia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, **18** (2): 56-65.
- Van der Plank, J. E.** (1963). *Plant diseases: epidemics and control*. New York: Elsevier Academic Press.

# Efecto del contenido de oxígeno y metano en la cinética de oxidación de un carbonizado de carbón

Jennifer Laverde- Múnera<sup>1</sup>, Pedro Nel Alvarado-Torres<sup>2</sup>, Wilson Ruiz- Machado<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente, Instituto de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

<sup>2</sup> Materiales Avanzados y Energía (MATYER), Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Medellín, Colombia

<sup>3</sup> Grupo de Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente, Instituto de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

## Resumen

Se evaluó el efecto de la adición de metano en un carbonizado de carbón sometido a reacción con concentraciones de oxígeno bajas. Desde un punto de vista cinético, dicho efecto es determinando por la energía de activación ( $E_a$ ) y por el factor preexponencial para diferentes concentraciones de oxígeno y mezclas de oxígeno y metano. Se preparó un carbonizado con un tamaño de partícula de 75 a 150  $\mu\text{m}$  a partir de un carbón bituminoso altamente volátil, y se determinaron los parámetros cinéticos de la oxidación empleando el método termogravimétrico de velocidad máxima. Las variables evaluadas en la cinética de oxidación fueron la concentración de oxígeno (5, 8 y 21 %), y el efecto de la adición de metano en el medio de reacción (5, 10 y 14 % de metano mezclado con 5 % de oxígeno). Los resultados mostraron que la  $E_a$  disminuía al aumentar la concentración de oxígeno, en tanto que al agregar metano se observó un efecto promotor cuando este correspondía al 5 % de la mezcla total; sin embargo, cuando el porcentaje de metano aumentaba, la  $E_a$  también lo hacía debido a la rápida reacción del oxígeno con el metano en fase homogénea comparada con la reacción heterogénea del oxígeno con el carbonizado. La  $E_a$  obtenida con 5 % de oxígeno fue de 122,9 kJ/mol y con 21 %, de 90,69 kJ/mol; en presencia de metano al 5 % y 5 % de oxígeno, la  $E_a$  fue de 110,7 kJ/mol, y aumentó hasta 170,8 kJ/mol cuando el metano representaba el 14 % de la mezcla. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Parámetros cinéticos; Carbonizado de carbón pulverizado; Contenido de metano; Contenido de oxígeno.

## Effect of oxygen and methane on the oxidation kinetics of coal char

### Abstract

In this work we evaluated the effect of adding methane during the oxidation process of a coal char with low oxygen concentration. We analyzed the effect from a kinetic point of view and we determined the activation energy ( $E_a$ ) and the pre-exponential factor ( $A$ ) with different oxygen concentrations and oxygen and methane mixtures. We used a coal char from a highly volatile bituminous coal with particle size of 75 to 150  $\mu\text{m}$ ; the kinetic parameters were determined by thermogravimetric method (TGA) with the high-velocity model; oxygen concentration variations were studied with 5, 8 and 21% of oxygen, as well as the effect of adding methane (5, 10 and 14%) when oxidation occurred with 5% of oxygen. The results showed that the  $E_a$  decreased when oxygen concentration increased, and that adding 5% of methane to the total mixture enhanced the effect. Instead, when we increased the methane percentage, the  $E_a$  increased due to the rapid reaction of oxygen and methane in the homogeneous phase as compared with the heterogenous reaction of oxygen and coal char. With 5% oxygen the  $E_a$  value was 122.9 kJ/mol and with 21%, it was 90.69 kJ/mol; when methane was added at 5%, the  $E_a$  value was 110.7 kJ/mol, and it increased to 170.8 kJ/mol when there was 14% of methane in the mixture. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Kinetic parameters; Pulverized coal char; Methane content; Oxygen content.

## Introducción

A través de los años el carbón ha sido un recurso de vital importancia ya que a partir de éste se obtiene energía por medio del proceso de combustión, allí se encuentran involucradas diferentes etapas que pueden ocurrir de manera consecutiva o simultáneamente y cuando se realiza de manera convencional genera además del  $\text{CO}_2$  grandes emisiones de

contaminantes a la atmósfera de especies tales como  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ . Las emisiones de óxidos de nitrógeno dependen del tipo de tecnología empleada, existiendo numerosas investigaciones

### \*Correspondencia:

Wilson Ruiz- Machado, [wilson.ruiz@udea.edu.com](mailto:wilson.ruiz@udea.edu.com)

**Recibido:** 07 de febrero de 2017

**Aceptado:** 01 de abril de 2017

que apuntan a la reducción de éstas de acuerdo a la variación de parámetros de operación, como por ejemplo, la tecnología de captura de CO<sub>2</sub> conocida como oxicomustión en la que se emplea oxígeno puro obtenido de la separación del nitrógeno del aire disminuyendo drásticamente las emisiones de los NO<sub>x</sub> por la ausencia de nitrógeno (Perrin, *et al.*, 2014). Existen además otro tipo de tecnologías, las cuales emplean para la reducción de contaminantes técnicas de “reburning”, donde en una de las etapas se inyecta combustible para crear una zona de atmósfera reductora y así reducir las especies de NO a N<sub>2</sub>, mientras que en una etapa posterior se inyecta sólo aire para obtener un exceso de éste y quemar el combustible del “reburning” (Shen, Liu, Ma, Zhang, & Jiang, 2015). Actualmente se están adelantando estudios sobre una nueva metodología de combustión que se caracteriza por una combustión volumétrica, éste concepto fue propuesto inicialmente en el año 2008 caracterizándose por un mezclado intenso de los gases y una alta recirculación de ellos dentro de las cámaras de combustión, por tanto, la combustión se presenta en una zona extensa evitando la formación de pequeños lugares de reacción ya que hay una mejor distribución de las especies reactantes, los flujos y las temperaturas (J. Li, Yang, Blasiak, & Ponzio, 2012); a éste tipo de proceso de combustión también se le conoce como combustión sin llama o MILD combustion (por sus siglas, moderate or intense low-oxygen dilution) y puede ser aplicada tanto para carbón como para metano; gracias a sus características se logra una baja concentración de oxígeno al interior del horno (menor a 8%) debido a la alta recirculación de los gases que lo diluyen y se genera una gran disminución en las emisiones de NO (menores a 400 ppm, valores obtenidos para la combustión sin llama del carbón comparativamente con valores de 800-1000 ppm obtenidos para combustión convencional) (Cavaliere, & De Joannon, 2004) (Weber, Smart, & Vd Kamp, 2005). También existen trabajos que se enfocan principalmente en dar explicación a las rutas de formación de los óxidos de nitrógeno bajo éste régimen cuando el combustible empleado es el metano como el presentado por (Alvarado, Cadavid, Mondragón, Ruiz, & Amell, 2009), o estudios que evalúan parámetros de variación de diseño del quemador que opera bajo éste régimen como por ejemplo, la posición de inyectores para mejorar el sistema de recirculación de los gases, haciendo que las emisiones de NO sean reducidas incluso hasta valores tan bajos como 200 ppm aproximadamente (Bilgen, 2014). Sin embargo, a pesar de ofrecer la gran ventaja de disminuir las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>, se ha demostrado en recientes estudios que la técnica tiene como desventaja la generación de cantidades considerables de inquemados sólidos al emplearse para la combustión de carbón disminuyendo la eficiencia del proceso, en la tesis doctoral de (Torres Alvarado, 2014), se concluye que cuando hay baja concentración de oxígeno durante la combustión de un material carbonoso, la reactividad disminuye conforme incrementa la conversión y lo asocian a la disminución

de especies reactivas de tipo sp<sup>3</sup> de estructura amorfa que conlleva al aumento del grado de ordenamiento del material haciendo que este sea menos reactivo. Otros trabajos evalúan el efecto del tamaño de partícula para un carbón de bajo rango, se ve una dependencia del tamaño con el porcentaje de consumo del mismo, donde a mayores tamaños de partícula, el consumo total de carbono es menor, esto es debido a que el tamaño de partícula se asocia con el tiempo de residencia ya que partículas más grandes son más pesadas que las de menor tamaño requiriendo entonces mayor tiempo de residencia para lograr su consumo (Medwell & Chinnici, 2017).

Con el fin de lograr una disminución de los inquemados sólidos debidos a la baja concentración de oxígeno, se ha planteado la co-combustión de carbón pulverizado con metano bajo régimen de combustión sin llama o MILD combustion como estrategia útil, ya que la adición de metano podría tener un efecto químico en cuanto a incrementar la cantidad de radicales que pueden mejorar la reactividad del material carbonoso gracias a la promoción de especies radicalarias como \*OH que son útiles durante el proceso de oxidación especialmente en la etapa de terminación (Liotta, R., Brons, G., Isaacs, 1983). Sin embargo, existe una limitante en cuanto a la poca información sobre estudios que ayuden a explicar el efecto que tendría el metano durante la oxidación del carbonizado de carbón. Por lo tanto para tener una aproximación al proceso de co-combustión y entenderlo, es importante comenzar a realizar estudios fundamentales del fenómeno tales como la determinación de los parámetros cinéticos para la oxidación heterogénea del carbonizado cuando en la atmósfera de reacción se incluye el metano, ya que la obtención de parámetros cinéticos se puede relacionar con condiciones de diseño de cámaras de combustión que operen bajo este régimen; la técnica termogravimétrica ha sido de gran utilidad para desarrollar métodos de obtención de estos parámetros, siendo sencilla y de bajo costo (Shi, Liu, Guo, He, & Liu, 2014); para el caso de la oxidación se encuentra gran cantidad de reportes donde la técnica es empleada para determinar modelos cinéticos de oxidación a temperaturas altas y bajas mostrando resultados favorables y reproducibles (Jones, Chiz, Koh, & Matthew, 1996).

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la relación O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> en la cinética de la reacción con baja concentración de oxígeno de un carbonizado de carbón pulverizado, empleando la técnica termogravimétrica no-isotérmica como herramienta para la obtención de los parámetros cinéticos.

## Metodología

**Preparación del material carbonoso.** El material seleccionado fue un carbón Colombiano tipo bituminoso alto en volátiles proveniente de la región de Amagá-Antioquia, cuyo poder calorífico superior es de 24,33 MJ/Kg (medido en bomba calorimétrica), este tipo de carbón se selecciona debido a que existen estudios que demuestran que para carbonos de alto rango la cantidad de inquemados sólidos es

mayor comparativamente con carbones de menor rango, en un estudio realizado por investigadores del Centre for Energy Technology de la universidad de Adelaida en Australia, se obtuvo un porcentaje de inquemados cercano al 10% para un carbón de rango bajo, mientras que el porcentaje de inquemados para un carbón de alto rango tipo antracita fue de alrededor del 60% (Saha, Chinnici, Dally, & Medwell, 2015). El carbón fue pulverizado en un molino de bolas y tamizado con mallas 200-100 que según la norma ASTM (United & Of, n.d.) corresponden a un tamaño de partícula entre 75-150 µm. El carbonizado se obtuvo por medio de proceso de pirólisis en un horno horizontal como empleando atmósfera de nitrógeno con flujo total de 100mL/min, empleando una velocidad de calentamiento de 20°C/min hasta una temperatura final de 950°C, donde se mantuvo en isoterma por una hora. Posteriormente la muestra se enfrió hasta temperatura ambiente y se guardó el carbonizado obtenido en un desecador para evitar adsorción de humedad. El análisis próximo y elemental tanto para el carbón fresco como el carbonizado se presenta en Tabla 1.

De acuerdo a los porcentajes mostrados en la Tabla 1, el carbón es clasificado como bituminoso-alto en volátiles, con un poder calorífico superior de 23,96 MJ/kg calculado de acuerdo a la ecuación propuesta por Lloyd-Davenport (Friedl, Padouvas, Rotter, & Varmuza, 2005) tomando en cuenta el análisis último, resultado que tiene concordancia con el obtenido por medio de la medida obtenida en la bomba calorimétrica cuyo valor fue de 24,33 MJ/kg y que es correspondiente a éste tipo de carbones, afianzando así los resultados de caracterización. La ecuación 1 muestra la aproximación de Lloyd-D:

$$HHV \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 357.77C + 917.58H - 84.51O - 59.38N + 111.87S \quad (1)$$

### Cinética de la oxidación del carbonizado con diferentes concentraciones de oxígeno y mezclas de oxígeno/metano.

Los experimentos para determinar los parámetros cinéticos se llevaron a cabo en un analizador termogravimétrico de la serie SDT Q-600 de TA Instruments. Para las reacciones se empleó un tamaño de muestra de 10-20 mg de carbonizado sobre crisoles de óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y la energía de activación (Ea) y el factor pre-exponencial (A) fueron obtenidos empleando el método de la velocidad máxima (Acelas, 2010) donde las velocidades de calentamiento empleadas fueron (3,5,10,15 y 20) °C/min. Se evaluaron 3 concentraciones de oxígeno: 5,8 y 21%, dos correspondientes a atmósfera diluida (5% y 8%) y una correspondiente a atmósfera convencional

(21%). Estas concentraciones se lograron al mezclar oxígeno puro con argón para un flujo total de 100 mL/min empleando controladores de flujo másico marca Brooks 5850e. Con el fin de evaluar el efecto del metano en la cinética de la oxidación del carbonizado bajo régimen de combustión sin llama o MILD combustion, se realizaron mezclas de metano-oxígeno, manteniendo 5% de oxígeno (concentración típicamente obtenida bajo este régimen de combustión) y variando el metano a 5%, 10% y 14% en la mezcla gaseosa total. Las muestras fueron calentadas desde temperatura ambiente hasta una temperatura final de 850°C y mantenidas en isoterma por 30 minutos.

### Modelo matemático empleado para la determinación de parámetros cinéticos

**Método de la velocidad máxima.** Para las reacciones heterogéneas como la oxidación del carbón, la cinética se puede determinar por el cambio de las propiedades del material sólido con el tiempo, ésta reacción está gobernada por la ley de primer orden de Arrhenius (Gil, Casal, Pevida, Pis, & Rubiera, 2010), así la cinética de la reacción vendrá dada por la ecuación 2

$$\frac{dx}{dt} = A \exp \left( \frac{-E}{RT} \right) * f(x); x = \left( \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_\infty} \right) \quad (2)$$

En esta ecuación x representa la conversión, m la masa, t el tiempo y f(x) es el modelo de mecanismo de reacción de la partícula. Por principio matemático (Masel, 1996), la velocidad máxima del proceso de oxidación puede ser obtenida de acuerdo a la ecuación 3 así:

$$\left( \frac{dX^2}{dT^2} \right) = 0 \quad (3)$$

La descomposición de un sólido desde un punto cinético es usualmente descrita como:

$$\left( \frac{dX}{dt} \right) = A e^{-\left( \frac{E_a}{RT} \right)} (1-x)^n; \text{ con}$$

*n* = orden de reacción,  
*R* = constante de los gases, (4)  
*A* = factor pre-exponencial y  
*Ea* = energía de activación

Expresando entonces la ecuación cinética 4 en función de la velocidad de calentamiento:

$$\left( \frac{dX}{dt} \right) = \left( \beta \frac{dX}{dT} \right) = A e^{-\left( \frac{E_a}{RT} \right)} (1-x)^n \quad (5)$$

La ecuación 3 puede ser expresada como:

$$\left( \frac{dX^2}{dT^2} \right) = \frac{d \left( -\beta \frac{dX}{dT} \right)}{dT} = 0 \quad (6)$$

**Tabla 1.** Análisis próximo y último del material carbonoso.

Muestra	*Análisis Próximo			Análisis Elemental				
	Volátiles	Carbón Fijo	Cenizas	C	H	N	**O	S
Carbón fresco	42,80	51,30	5,92	61,30	4,66	1,26	26,30	0,45
Carbonizado	7,140	84,70	8,13	72,10	1,46	0,90	16,80	0,59

\*Sobre base seca, \*\*Porcentaje obtenido por diferencia

Si se reemplaza la ecuación 5 en la ecuación 6 y se resuelve la derivada se obtiene:

$$\ln \left[ \frac{\beta^2}{T_m^2 (1-X_m)^{n-1}} \right] = \ln \frac{nAR}{E_a} - \frac{E_a}{RT_m} \quad (7)$$

Siendo  $T_m$  la temperatura a la velocidad máxima de reacción, en este caso la reacción de oxidación, y  $X_m$  es la conversión a la velocidad máxima de reacción, teniendo en cuenta como orden de reacción para el carbonizado con el oxígeno como  $n=1$  (Wang, Zhang, Shao, Sun, & Zuo, 2014), la ecuación 7 se transforma en:

$$\ln \frac{\beta}{T_m^2} = \ln \frac{AR}{E_a} - \frac{E_a}{RT_m} \quad (8)$$

Para obtener los parámetros cinéticos a partir de la ecuación 8 se necesita determinar experimentalmente la temperatura a la velocidad máxima de reacción que es obtenida a partir de las curvas DTG a diferentes velocidades de calentamiento, ésta temperatura es necesaria para graficar  $\ln(\beta/T_m^2)$  vs  $1/T_m$  y así determinar los parámetros cinéticos deseados a partir de la pendiente y el intercepto obtenidos de la regresión lineal (S. Li, & Yue, 2003); en este artículo se hablará de éste modelo como **velocidad máxima A**.

Gracias a las diferentes velocidades de calentamiento empleadas experimentalmente, también es posible obtener los valores de conversión máxima a una temperatura máxima ( $T_m$ ) de reacción, estas conversiones se pueden emplear de igual manera en la determinación de los parámetros cinéticos al aproximar la ecuación 8 de la siguiente manera:

$$\ln \left[ \frac{(1 - \ln(1 - X_{max}))\beta}{T_m^2} \right] \approx \ln \frac{AR}{E_a} - \frac{E_a}{RT_m} \quad (9)$$

Es así como, los parámetros cinéticos son calculados a partir de la pendiente e intercepto de la línea recta obtenida al graficar  $\ln \left[ \frac{(1 - \ln(1 - X_{max}))\beta}{T_m^2} \right]$  respecto al inverso de la temperatura máxima, en el presente artículo se hablará de éste modelo como **velocidad máxima B**.

Al emplear diferentes velocidades de calentamientos se obtiene un valor de temperatura máxima asociada a cada velocidad tal como se muestra en la Figura 1, además a cada una de estas temperaturas se asocia de igual manera un valor de conversión máxima, con los datos obtenidos se pueden hallar los parámetros cinéticos para cada atmósfera de reacción de acuerdo a los modelos de regresión lineal antes mencionados.

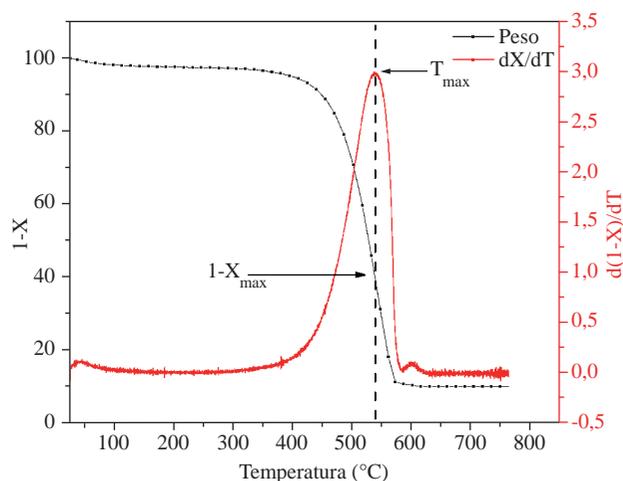
## Resultados

### Cinética de la oxidación del carbonizado con diferentes concentraciones de oxígeno y mezclas de oxígeno/metano

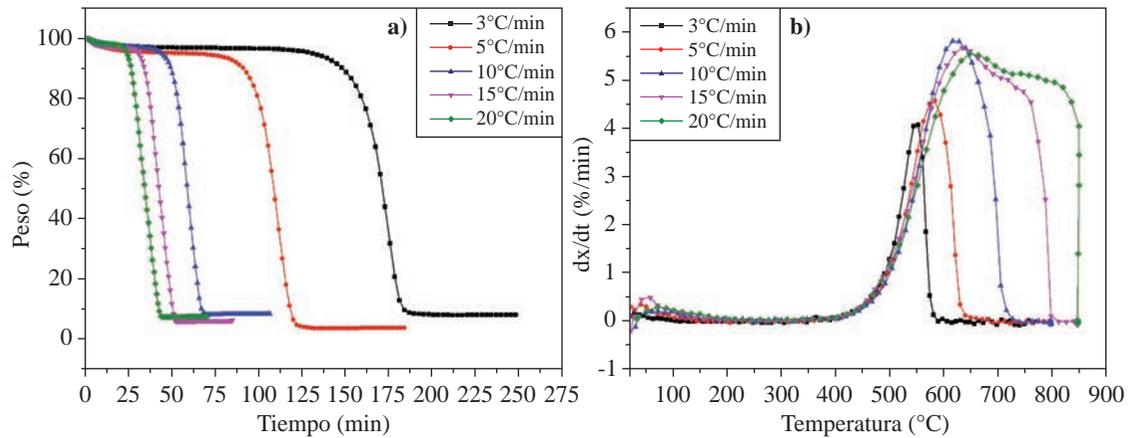
**Efecto de la velocidad de calentamiento.** Un perfil de combustión típico para los carbonizados de carbón es como el que se presenta en la Figura 2a donde se grafica la pérdida de peso con respecto al tiempo, con una concentración de oxígeno de 8% y a diferentes velocidades de calentamiento. La primera pérdida que ocurre antes de los 20 min corresponde a la humedad (a una temperatura de 120°C aproximadamente), luego se observa una segunda pérdida importante de peso correspondiente a la oxidación de

carbonizado la cual comienza entre 350-426 °C, valores típicos reportados en la literatura (Wang, et al., 2014). Cuando se comparan las diferentes velocidades de calentamiento empleadas, se observa una dependencia de la oxidación con ésta, donde la conversión máxima se desplaza a temperaturas mayores implicando tiempos menores cuando la velocidad de calentamiento incrementa, lo que se evidencia en la Figura 2b, afectando la temperatura inicial de pérdida de masa, haciendo que el tiempo de oxidación a altas velocidades de calentamiento sea menor.

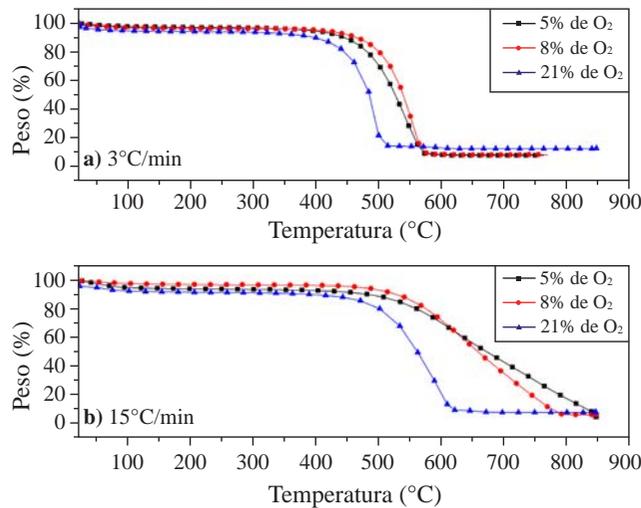
**Efecto de la concentración de oxígeno.** Para evaluar el efecto de la concentración de oxígeno sobre la energía de activación, se hicieron reacciones con concentraciones de 5%, 8% y 21% de oxígeno, usando éste último porcentaje como comparativo con atmósfera de combustión convencional; además de determinar el efecto de la concentración de oxígeno, se realizó la oxidación del carbonizado empleando mezclas de 5% de oxígeno con (5, 10 y 14%) de metano para observar el efecto que tiene el metano en el proceso de oxidación; la Figura 3a muestra los perfiles de conversión variando la concentración de oxígeno para la oxidación del carbonizado cuando se mantiene una velocidad de calentamiento de 3°C/min (esta velocidad se toma para comparar el efecto observado a cada concentración de oxígeno a la menor velocidad de calentamiento), se puede observar que a medida que se incrementa la concentración de oxígeno en la atmósfera, la temperatura inicial de reacción no varía significativamente cuando se tiene 5% y 8% de oxígeno, siendo esta de aproximadamente 400°C, sin embargo, cuando se incrementa la concentración de oxígeno a 21%, la temperatura inicial de reacción es de aproximadamente 360°C, esto debido a la alta disponibilidad de oxígeno en el ambiente de reacción que hace posible que la reacción se lleve a cabo mucho más rápido y consecuentemente a más baja temperatura, lo que se ve reflejado en el tiempo donde



**Figura 1.** Curvas de TGA y DTG de la oxidación del carbonizado de carbón a 5°C/min para la obtención de los parámetros cinéticos para una atmósfera de 5% de oxígeno.



**Figura 2.** Perfiles de oxidación a diferentes velocidades de calentamiento para una atmósfera compuesta por 8% de oxígeno.

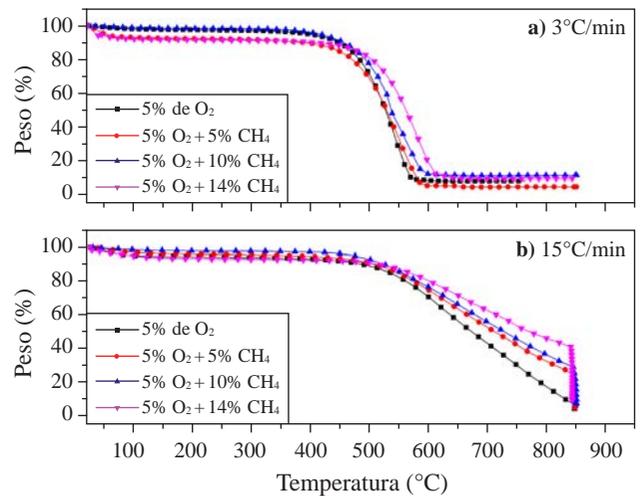


**Figura 3.** Efecto de la atmósfera en el perfil de oxidación variando la concentración de oxígeno en dos velocidades de calentamiento, a) 3°C/min, b) 15°C/min.

finaliza la reacción, siendo más corto cuando se emplea 21% de oxígeno; en la Figura 3b se muestran los perfiles de conversión al variar la concentración de oxígeno pero cuando se tiene una velocidad de calentamiento mayor, 15°C/min, notándose en este caso que la temperatura inicial de reacción se desplaza a valores más altos que cuando se tiene velocidad de calentamiento más baja, a 500°C aproximadamente para 5% y 8% de oxígeno y a 450°C cuando se tiene 21% de oxígeno, el comportamiento de los perfiles al inicio es similar al obtenido cuando se calienta a 3°C/min, pero al final de la reacción se nota que cuando se emplea 5% de oxígeno no se alcanza a oxidar completamente el carbonizado ya que no se ve estabilización de la señal de pérdida de peso, mientras que con 8% y 21% de oxígeno sí, notándose estabilización de la señal cuando llega a los 800°C para el caso de 8% de oxígeno y 620°C para el caso de 21%; lo que quiere decir que a bajas velocidades de calentamiento se tiene el tiempo suficiente para que exista la reacción entre el oxígeno y el

carbonizado logrando una conversión mayor que cuando se emplean velocidades de calentamiento mayores donde el tiempo de contacto entre el gas y el carbonizado es más corto obteniéndose combustión incompleta.

En la Figura 4a existe ya adición de metano a la atmósfera de reacción y con una velocidad de calentamiento baja; al inicio de la reacción se observa un perfil similar al observado cuando la atmósfera de reacción sólo contiene oxígeno, pero cuando se analiza el tiempo de finalización de la reacción se observa que a medida que se incluye más cantidad de metano al medio, la finalización del consumo de carbonizado ocurre a temperaturas un poco más elevadas (576°C cuando solo hay 5% de oxígeno y 617°C cuando en el medio de reacción hay 5% de oxígeno y 14% de metano), además el porcentaje de conversión también se ve afectado, disminuyendo cuando se incluye el metano, efecto que se nota más claramente cuando se emplea una velocidad de calentamiento de 15°C/min tal y como se observa en la Figura 4b, donde se obtiene



**Figura 4.** Efecto de la atmósfera en el perfil de oxidación cuando se adiciona metano al medio de reacción en dos velocidades de calentamiento, a) 3°C/min, b) 15°C/min.

una conversión de 41% aproximadamente; esto debido a que ya existe en el sistema una mezcla de dos combustibles en diferente estado de agregación, donde las reacciones en fase homogénea del oxígeno con el metano ocurren de maneras más rápida que las de fase heterogénea, haciendo que se retrase el consumo del carbonizado ya que se debe incluir el efecto de la velocidad de los fenómenos de transferencia entre fases sobre la velocidad propia de la reacción (**Izquierdo & Torres, 2004**), efecto que se verá reflejado en los valores de energía de activación obtenidos, siendo en mayor medida cuando se emplea la mezcla de 5% O<sub>2</sub> con 14% CH<sub>4</sub>. El comportamiento general con la velocidad de calentamiento es similar al obtenido con atmósfera de oxígeno, donde a velocidades mayores se requiere más tiempo de isoterma para lograr que finalice el consumo del carbonizado.

Las temperaturas de inicio del proceso de oxidación para cada atmósfera estudiada, así como las temperaturas máximas de conversión se encuentran en la Tabla 2, se observa en el caso de las atmósferas compuestas solo por oxígeno, que al aumentar la concentración de este disminuyen las temperaturas de inicio de la oxidación y de conversión máxima, esto debido a la alta disponibilidad de oxígeno que favorece el proceso haciendo que ocurra a menos temperaturas; al incluir metano en el medio de reacción sucede el caso contrario, se observa un aumento de estas cuando el porcentaje de metano en la mezcla aumenta, este comportamiento puede ser debido a las reacciones competitivas de oxidación del metano con respecto a la oxidación del carbonizado de carbón que hacen que el proceso requiera mayor energía para poder que oxide el carbonizado.

**Determinación de los parámetros cinéticos.** Al evaluar los modelos matemáticos de **velocidad máxima A** y **B** se obtienen como resultado los valores de energía de activación mostrados en la Tabla 3, se puede ver que las energías de activación obtenidas tienen la coherencia esperada de disminuir a medida que aumenta el porcentaje de oxígeno en la mezcla debido a la mayor disponibilidad de éste para reaccionar con el carbonizado de carbón; en cualquiera de los dos casos de modelo evaluados, la energía de activación tiene un valor similar al reportado en la literatura para oxidación con 21% de oxígeno (se reporta una energía de activación de 93,87 kJ/mol cuando el método no isotérmico se realiza con múltiples velocidades de calentamiento) (**Wang, et al., 2014**). La Figura 5 muestra como ejemplo la comparación de los datos de regresión lineal cuando se emplean los métodos de **velocidad máxima A** y **B** los cuales son empleados para determinar los parámetros cinéticos a una concentración de 5% de oxígeno.

Para evaluar los parámetros cinéticos de la mezcla de reacción O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> con carbonizado de carbón, elegimos el método de **velocidad máxima A**, debido a la concordancia con el valor reportado en la literatura cuando se realiza la oxidación con 21% de oxígeno a diferentes velocidades de calentamiento y por el valor de R<sup>2</sup> que indica mejor correlación en la regresión lineal realizada.

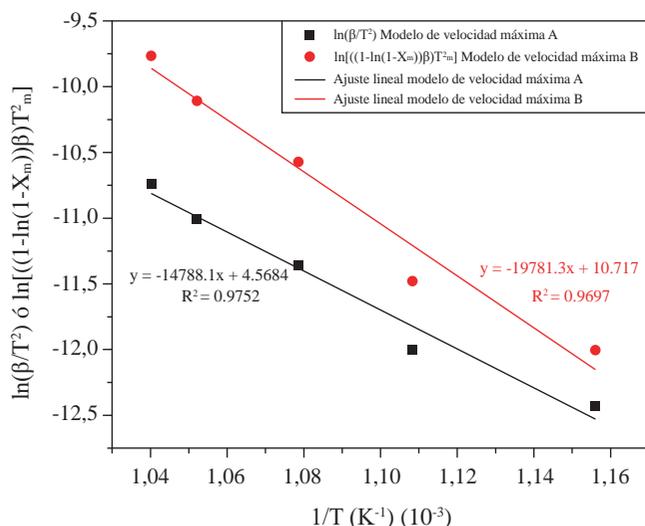
**Tabla 2.** Temperaturas de conversión para la oxidación con las diferentes atmósferas empleadas.

Velocidad de calentamiento (°C/min)	Atmósfera	Temperatura de inicio de la oxidación (°C)	Temperatura de oxidación máxima (°C)
3	5% O <sub>2</sub>	440,8	590,9
	8% O <sub>2</sub>	379,7	549,5
	21% O <sub>2</sub>	282,8	490,6
	5% O <sub>2</sub> ; 5% CH <sub>4</sub>	298,8	539,9
	5% O <sub>2</sub> ; 10% CH <sub>4</sub>	321,0	552,3
	5% O <sub>2</sub> ; 14% CH <sub>4</sub>	392,9	579,8
15	5% O <sub>2</sub>	468,4	674,4
	8% O <sub>2</sub>	392,9	637,1
	21% O <sub>2</sub>	375,1	613,1
	5% O <sub>2</sub> ; 5% CH <sub>4</sub>	313,0	614,1
	5% O <sub>2</sub> ; 10% CH <sub>4</sub>	336,9	625,8
	5% O <sub>2</sub> ; 14% CH <sub>4</sub>	396,5	643,3

**Tabla 3.** Energías de activación obtenidas cuando se emplean las ecuaciones 8 y 9.

Contenido de O <sub>2</sub>	Modelo Cinético	Energía de activación (kJ/mol)	R <sup>2</sup>	
5%	Velocidad máxima	A	122,90	0,9752
		B	164,50	0,9697
8%	Velocidad máxima	A	102,70	0,9787
		B	123,20	0,9598
21%	Velocidad máxima	A	90,69	0,9986
		B	103,90	0,9952

Las energías de activación obtenidas y el factor pre-exponencial para cada reacción se muestran en la Tabla 4, la disminución de la energía de activación con el aumento del porcentaje de oxígeno sin incluir metano en la mezcla puede ser debido a un mecanismo cinético global el cual es gobernado por la difusión entre el sólido (fase heterogénea) y el gas donde existe mayor cantidad de oxígeno disponible que ayuda a oxidar el material carbonoso. Cuando se incluye metano en la mezcla de reacción con oxígeno al 5 %, se observa una disminución de aproximadamente el 10% en el valor de Ea con respecto al valor obtenido cuando la atmósfera está compuesta únicamente por 5% de oxígeno, lo que podría estar relacionado con un aumento de la producción de radicales por parte del metano en la fase homogénea tales como CH<sub>3</sub>OO\*, HOO\* y en mayor proporción los radicales \*OH que es obtenido por abstracción del hidrógeno del metano por compuestos oxidantes. Estas



**Figura 5.** Regresiones lineales para ambos modelos matemáticos empleados en la determinación de los parámetros cinéticos cuando se emplea 5% de oxígeno como atmósfera de reacción.

**Tabla 4.** Parámetros cinéticos obtenidos con cada una de las atmósferas empleadas.

Carbonizado de carbón (75-150) μm			
Oxígeno %	Metano %	Ea (kJ/mol)	A (s <sup>-1</sup> )
5	0	122,90	96,39
	0 (reproducibilidad)	123,90	114,20
	5	110,70	54,87
	10	133,80	1,130 x 10 <sup>3</sup>
	14	170,80	1,121 x 10 <sup>5</sup>
8	14 (reproducibilidad)	170,70	1,121 x 10 <sup>5</sup>
	0	102,70	14,00
21	0	90,69	11,79

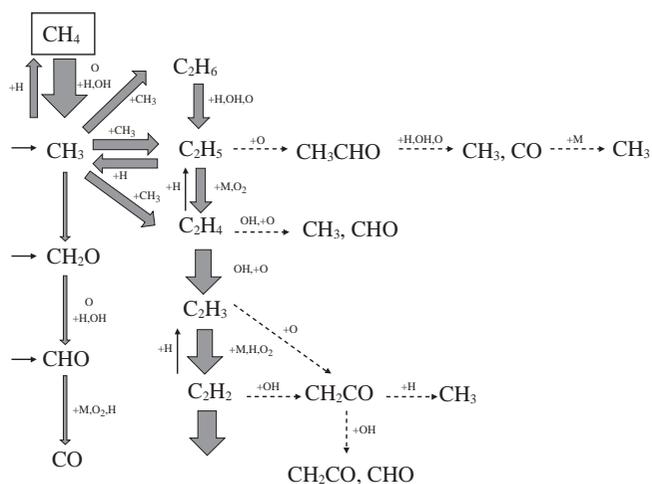
especies radicalarias pueden generar especies que transfieren hidrógeno, promoviendo el craqueo de los compuestos aromáticos presentes en el carbonizado; esto se asocia a que hay supresión de reacciones secundarias tales como, condensación y re-polimerización (Krerkkaiwan, Fushimi, Tsutsumi, & Kuchonthara, 2013) (Quan, Xu, An, Liu, 2014) (Park, Kim, Lee, & Lee, 2010) (Yuan, et al., 2012). Por otro lado, también se puede dar la formación de otros radicales como \*CH y \*CH<sub>3</sub>, permitiendo entonces una promoción del consumo del carbonizado disminuyendo la energía de activación, algunas reacciones que dan cuenta de esto se muestran a continuación (Alviso, Rolon, Scoufflaire, & Darabiha, 2015):



Los mecanismos más probables de oxidación del metano y otros hidrocarburos implican formación de radicales H\*, O\*, \*OH y HOO\*. También se ha reportado que las velocidades de reacción entre especies radicalarias como \*O, H\* y \*OH con las moléculas de combustible como CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, además de otras, son generalmente mayores que para las reacciones entre estas mismas especies con CO y H<sub>2</sub>; por lo tanto, cuando aún permanecen o existen especies de hidrocarburos, la velocidad de reacción de las especies radicalarias (O\*, H\* y \*OH) en la oxidación del CO y el H<sub>2</sub> disminuye. Como resultado, no existirá forma alguna para disminuir la concentración de radicales en regiones en las que aún hay cantidades de combustible (Westbrook & Dryer, 1981) (Tjatjopoulos & Vasalos, 1992); esto implicaría que al tener metano en la combustión de carbón con bajo contenidos de oxígeno tendría un efecto en cuanto a la formación de radicales (O\*, H\* y \*OH), los cuales estarían reaccionando con el material carbonoso por reacciones de abstracción de H y escisión de enlaces C-C; este conjunto de reacciones modificaría la superficie del material alterando sus propiedades estructurales, la reactividad y la cinética de las reacciones químicas. En cuanto a esto último según este estudio se muestra la disminución de la energía de activación (Westbrook & Dryer, 1981).

Sin embargo, cuando se adicionan cantidades más altas de metano, 10% y 14%, se observa un incremento considerable de la energía de activación, esto puede ser debido a la inclusión de una cantidad considerable de un combustible gaseoso, metano, donde las reacciones en fase homogénea (metano con oxígeno) son más rápidas comparadas con las de la fase heterogénea (oxígeno-carbonizado) tal y como se muestra en Esquema de reacción 1 (Warnatz, Maas, & Dibble, 2006).

De acuerdo al Esquema de reacción 1, todo dependerá principalmente de sí el metano se encuentra en relación estequiométrica con el oxígeno para ser oxidado directamente,



**Esquema de reacción 1.** Mecanismo de reacción del metano en una llama de mezcla rica (Warnatz, et al., 2006)

pero en éste caso, la mezcla es rica en metano, y por lo tanto la ruta de oxidación implica en primer lugar recombinar los radicales producidos a partir del metano produciendo etano ( $C_2H_6$ ) el cual es posteriormente oxidado (Warnatz, *et al.*, 2006). Por consiguiente, en concentraciones altas de metano se produce un efecto contraproducente ya que los radicales formados compiten con el carbón por los compuestos oxigenados disponibles.

## Conclusiones

Se observó tendencia a disminuir la energía de activación cuando se aumentaba la concentración de oxígeno, logrando un valor de 90,69 kJ/mol cuando se empleó 21% de oxígeno y el modelo cinético de *velocidad máxima A*, valor que se asemeja a los reportados en la literatura con un buen factor de correlación  $R^2$ . Al obtener los parámetros cinéticos para las mezclas de  $O_2/CH_4$  con 5% de oxígeno y variando el metano a 5,10 y 14% con éste mismo método, se observó que para la mezcla 5% de cada gas el valor de la energía de activación disminuyó en un 10% aproximadamente con un valor de 110,70 kJ/mol comparativamente con el valor obtenido para una atmósfera de reacción compuesta únicamente por oxígeno al 5% cuyo valor fue de 122,90 kJ/mol evidenciando un efecto promotor del metano que produce radicales necesarios para mejorar la reacción de oxidación; al aumentar gradualmente la concentración de metano, se observó un aumento de la energía de activación obteniendo un valor de 170,80 kJ/mol esto debido a las reacciones de oxidación competitivas entre el oxígeno con ambos combustibles presentes que evita que el carbonizado de carbón sea oxidado de manera más eficiente.

De acuerdo a lo anterior, se concluye finalmente que la mezcla  $O_2/CH_4$  con 5% de cada gas presenta un efecto promotor en la oxidación del carbonizado de carbón, lo que podría conllevar a la disminución de la proporción de inquemados sólidos que se han convertido en un problema cuando se hace combustión bajo condiciones de combustión sin llama o MILD combustion.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al “Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación”- COLCIENCIAS- a través del programa “Investigación e innovación en combustión avanzada en el uso industrial” por la financiación a través del proyecto “Desarrollo y evaluación de un quemador de 5 kW que opere en el régimen de combustión sin llama y que emplee como combustible carbón o una mezcla de este con gas natural” y al programa Sostenibilidad de la Universidad de Antioquia por el soporte financiero.

## Conflicto de intereses

No se presenta conflicto de intereses.

## Referencias

Acelas, N., Ruiz, W., López, D. (2010). Determinación de los parámetros cinéticos en la pirólisis del pino Ciprés. *Quim. Nova*, **33** (7): 1500-1505.

- Alvarado, P., Cadavid, F., Mondragón, F., Ruiz, W., & Amell, A. (2009). Estudio cinético químico de la formación de óxidos de nitrógeno en la combustión sin llama del metano. *Energética*, **41**: 13-22.
- Alviso, D., Rolon, J. C., Scouffaire, P., & Darabiha, N. (2015). Experimental and numerical studies of biodiesel combustion mechanisms using a laminar counterflow spray premixed flame. *Fuel*, **153**: 154-165. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.079>
- American Society of Testing and Materials. (1998). ASTM D338: *Standard Classification of Coals by Rank* (Vol. 552).
- Bilgen, S. (2014). Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **38**: 890-902. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.004>
- Cavaliere, A., & De Joannon, M. (2004). *Mild combustion. Mild Combustion* (Vol. 30). Progress in Energy and Combustion Science. <http://doi.org/10.1016/j.peccs.2004.02.003>
- Friedl, A., Padouvas, E., Rotter, H., & Varmuza, K. (2005). Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*, **544** (1-2 SPEC. ISS.): 191-198. <http://doi.org/10.1016/j.aca.2005.01.041>
- Gil, M. V., Casal, D., Pevida, C., Pis, J. J., & Rubiera, F. (2010). Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion. *Bioresource Technology*, **101** (14): 5601-5608. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.008>
- Izquierdo, J. F., & Torres, J. F. I. (2004). *Cinética de las reacciones químicas*. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- Jones, J. C., Chiz, P. S., Koh, R., & Matthew, J. (1996). Kinetic parameters of oxidation of bituminous coals from heat-release rate measurements. *Fuel*, **75** (15): 1755-1757. [http://doi.org/10.1016/S0016-2361\(96\)00159-7](http://doi.org/10.1016/S0016-2361(96)00159-7)
- Krerkkaiwan, S., Fushimi, C., Tsutsumi, A., & Kuchonthara, P. (2013). Synergetic effect during co-pyrolysis/gasification of biomass and sub-bituminous coal. *Fuel Processing Technology*, **115**: 11-18. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.03.044>
- Li, J., Yang, W., Blasiak, W., & Ponzio, A. (2012). Volumetric combustion of biomass for CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> reduction in coal-fired boilers. *Fuel*, **102**: 624-633. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.083>
- Li, S., & Yue, C. (2003). Study of different kinetic models for oil shale pyrolysis, **85**: 51-61. [http://doi.org/10.1016/S0378-3820\(03\)00097-3](http://doi.org/10.1016/S0378-3820(03)00097-3)
- Liotta, R., Brons, G., Isaacs, J. (1983). Oxidative weathering of Illinois No. 6 coal, **62** (6): 781-791. [http://doi.org/doi.org/10.1016/0016-2361\(83\)90028-5](http://doi.org/doi.org/10.1016/0016-2361(83)90028-5)
- Masel, R. I. (1996). Principles of adsorption and reaction on solid surfaces, **804**.
- Medwell, P. R., & Chinnici, A. (2017). Effect of particle size on the MILD combustion characteristics of pulverised brown coal. *Fuel Processing Technology*, **155** (November 2016): 74-87. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.04.003>
- Park, D. K., Kim, S. D., Lee, S. H., & Lee, J. G. (2010). Co-pyrolysis characteristics of sawdust and coal blend in TGA and a fixed bed reactor. *Bioresource Technology*, **101** (15): 6151-6156. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.087>
- Perrin, N., Dubettier, R., Lockwood, F., Tranier, J.-P., Bourhy-Weber, C., & Terrien, P. (2014). Oxycombustion for coal power plants: Advantages, solutions and projects. *Applied Thermal Engineering*, **74**: 75-82. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.074>

- Quan, C., Xu, S., An, Y., & Liu, X.** (2014). Co-pyrolysis of biomass and coal blend by TG and in a free fall reactor. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **117** (2): 817-823. <http://doi.org/10.1007/s10973-014-3774-7>
- Saha, M., Chinnici, A., Dally, B. B., & Medwell, P. R.** (2015). Numerical Study of Pulverized Coal MILD Combustion in a Self- Recuperative Furnace. <http://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01644>
- Shen, J., Liu, J., Ma, J., Zhang, H., & Jiang, X.** (2015). Parametric study of reburning of nitrogen oxide for superfine pulverized coal. *Energy Conversion and Management*, **89** (x): 825-832. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.059>
- Shi, L., Liu, Q., Guo, X., He, W., & Liu, Z.** (2014). Pyrolysis of coal in TGA: Extent of volatile condensation in crucible. *Fuel Processing Technology*, **121**: 91-95. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.01.013>
- Tjatjopoulos, G. J., & Vasalos, I. a.** (1992). Reaction-path analysis of a homogeneous methane oxidative coupling mechanism. *Applied Catalysis A: General*, **88** (2): 213-230. [http://doi.org/10.1016/0926-860X\(92\)80216-Y](http://doi.org/10.1016/0926-860X(92)80216-Y)
- Torres Alvarado, P. N.** (2014). *Combustión de material carbonoso en condiciones de alta temperatura y baja concentración de oxígeno*. Universidad de Antioquia (Tesis doctoral).
- Wang, G., Zhang, J., Shao, J., Sun, H., & Zuo, H.** (2014). Thermo-gravimetric Analysis of Coal Char Combustion Kinetics. *Journal of Iron and Steel Research, International*, **21** (10): 897-904. [http://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60159-X](http://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60159-X)
- Warnatz, J., Maas, U., & Dibble, R. W.** (2006). *J. Warnatz · U. Maas · R.W. Dibble Combustion. New York*.
- Weber, R., Smart, J. P., & Vd Kamp, W.** (2005). On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air. *Proceedings of the Combustion Institute*, **30** II(2): 2623-2629. <http://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.101>
- Westbrook, C. K., & Dryer, F. L.** (1981). Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames. *Combustion Science and Technology*, **27** (1-2): 31-43. <http://doi.org/10.1080/00102208108946970>
- Yuan, S., Dai, Z. H., Zhou, Z. J., Chen, X. L., Yu, G. S., & Wang, F. C.** (2012). Rapid co-pyrolysis of rice straw and a bituminous coal in a high-frequency furnace and gasification of the residual char. *Bioresource Technology*, **109**: 188-197. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.019>

# Petrogénesis de venas de cuarzo y cianita en rocas metapelíticas de la formación Silgará, región central del macizo de Santander en los Andes colombianos

Carlos A. Ríos R.<sup>1,\*</sup>, Luis Carlos Mantilla F.<sup>1</sup>, Oscar M. Castellanos A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA), Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Geofísica y Geología (PANGEA), Programa de Geología, Universidad de Pamplona, Colombia

## Resumen

Las rocas metamórficas de la formación Silgará (*sensu lato*), de edad pre-Devónico, aflorantes en la región central del macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia), presentan venas hidrotermales de cuarzo y cianita ligeramente boudinadas, paralelas a la foliación metamórfica regional. Estas venas se consideran manifestaciones excepcionales, tanto por su restringida distribución en el contexto del Macizo de Santander, como por su composición y génesis. Los cristales de cianita se observan, 1) en la proximidad del contacto con las rocas metapelíticas encajantes (afectadas por metamorfismo en facies anfíbolita, zona de la estaurolita-cianita), con una orientación paralela a la foliación metamórfica, lo cual indica un crecimiento progresivo durante la apertura de la vena, y 2) hacia el centro de la vena, exhibiendo una orientación al azar, lo cual sugiere un crecimiento sin un control de esfuerzos significativo. Con base en las relaciones litológicas y los estudios paragenéticos, es posible sugerir que el origen de estas venas hidrotermales se relaciona con la circulación o el escape de fluidos propios de eventos magmático-hidrotermales de edad Ordovícico?. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Colombia; Macizo de Santander; Formación Silgará; Venas hidrotermales; Cianita.

## Petrogenesis of quartz-kyanite veins in metapelitic rocks of the Silgará Formation, central Santander Massif (Colombian Andes)

### Abstract

The metamorphic rock of the Silgará formation (*sensu lato*), of pre-Devonian age, cropping out at the central region of the Santander massif (Colombian Eastern Cordillera), presents slightly boudinated hydrothermal quartz and kyanite veins parallel to the regional metamorphic foliation. These veins are considered as exceptional manifestations due to their restricted distribution in the context of the Santander Massif and their composition and genesis. Kyanite crystals are observed, 1) in the proximity to the contact with the wall metapelitic rocks (affected by amphibolite facies metamorphism, staurolite-kyanite zone), showing a direction parallel to the metamorphic foliation, which indicates a progressive growth during the opening of the vein, and 2) toward the center of the vein, exhibiting random orientation, which suggests a growth control without significant efforts. Based on lithological relationships and paragenetic studies, it is possible to suggest that the formation of these hydrothermal veins is related to the circulation or scape of hydrothermal fluids typical of magmatic-hydrothermal events of Ordovician? age. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Colombia; Santander massif; Silgará formation; Hydrothermal veins; Kyanite.

## Introducción

Las venas de cuarzo con presencia de polimorfos de  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  ha sido reportada en terrenos metamórficos regionales (e.g., Yardley, *et al.*, 1980; Stout, *et al.*, 1986; Lang and Dunn, 1990; Nabelek, 1997; Whitney and Dilek, 2000; Widmer and Thompson, 2001; McLelland, *et al.*, 2002; Putlitz, *et al.*, 2002; Larson and Sharp, 2003; Sepahi, *et al.*, 2004; Beitter, *et al.*, 2008; Bucholz and Ague, 2010) y aureolas de contacto (e.g., Spear, 1982; Cesare, 1994; Okuyama-

Kusunose, 1994; Larson and Sharp, 2003; Sepahi, *et al.*, 2004). La presencia de polimorfos de  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  brinda valiosa información con relación a las condiciones de movilización de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  por fluidos en condiciones de deformación dúctil y pueden suministrar evidencias acerca de las

### \*Correspondencia:

Carlos A. Ríos R., [carios@uis.edu.co](mailto:carios@uis.edu.co)

Recibido: 21 de junio de 2016

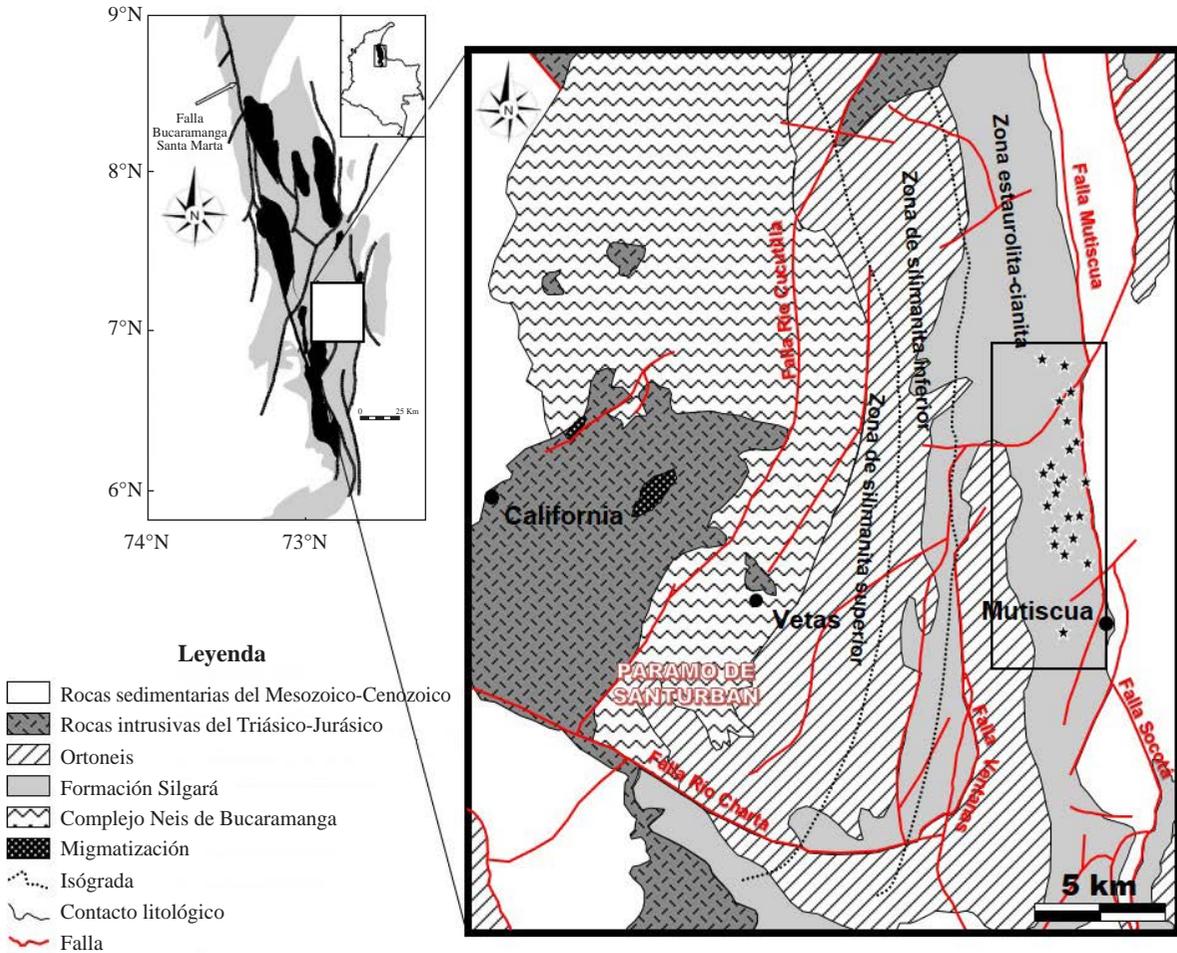
Aceptado: 18 de abril de 2017

condiciones de PT de metamorfismo, la(s) fuente(s) más probable(s) de fluidos, y los mecanismos de formación de venas (e.g., **Widmer and Thompson, 2001; Sepahi, et al., 2004**). La determinación de la movilidad del Al durante el metamorfismo regional y la interacción fluido-roca han sido objeto de estudio en la literatura (e.g., **Carmichael, 1969; Thompson, 1975; Grant, 1986; Verdes, et al., 1992; Lentz and Gregoire, 1995; Beitter, et al., 2008**). Entre los primeros estudios, se destaca el trabajo de **Carmichael (1969)**, el cual considera que el Al es generalmente relativamente inmóvil con relación a otros elementos, tales como Na, K, Ca, Mg y Fe, durante la interacción fluido-roca (e.g., **Verdes, et al., 1992**). Sin embargo, la ocurrencia de polimorfos de  $Al_2SiO_5$  en venas de cuarzo y rocas alteradas adyacentes a estas venas revela algún grado de movilidad del Al durante el metamorfismo (e.g., **Ague, 1995; Whitney and Dilek, 2000; Widmer and Thompson, 2001; Putlitz, et al., 2002; Larson and Sharp, 2003; Sepahi, et al., 2004; Allaz, et al., 2005; Beitter, et al., 2008**). Por lo tanto, la movilidad del Al ha sido extensamente usada como una constante de referencia en estudios de transferencia de masa durante el metamorfismo regional (e.g., **Thompson, 1975; Grant, 1986**) y alteración hidrotermal (**Lentz and Gregoire, 1995**). No obstante, el relativo enriquecimiento en polimorfos de  $Al_2SiO_5$  observados en las venas de cuarzo, con relación a la abundancia de cuarzo y otros silicatos u óxidos es un asunto aún incierto (**Beitter, et al., 2008**). Aquí enfocamos nuestra atención sobre la extraña ocurrencia de venas de cuarzo con cianita (KyQVs) en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará que afloran en la región central del Macizo de Santander (RCMS) y su significado petrogenético. **García, et al. (2005)** reportan la ocurrencia de polimorfos de  $Al_2SiO_5$  en diferentes localidades de esta región, aunque sin establecer su relación con la presencia de KyQVs. **Caviedes y Gómez (2006)** llevan a cabo un estudio petrológico de las KyQVs, estableciendo parámetros con relación a la formación de cianita en estas venas en una banda de cizallamiento. El objetivo del presente estudio es describir la ocurrencia de KyQVs en rocas metapelíticas de la zona de la estaurolitocianita de la Formación Silgará que afloran en la RCMS, discutir su formación y sus implicaciones petrogenéticas.

### Antecedentes y contexto geológico regional

Las rocas metamórficas del basamento del MS (Figura 1) han sido agrupadas principalmente en las siguientes unidades litológicas: Complejo Neis de Bucaramanga, Esquistos del Silgará (*sensu lato, s.l.*) y Ortogneis (**Ward, et al., 1973; Clavijo, 1994**). Recientemente, **Mantilla, et al. (2016)**, subdividen la unidad Esquistos del Silgará (*s.l.*) en: Esquistos del Silgará (*sensu stricto; s.s.*), Esquistos del Chicamocha y Filitas de San Pedro. Todas estas litologías se consideran de edad pre-Devónico, debido a que el registro sedimentario más antiguo del MS contiene fósiles de esta edad y es observado cubriendo localmente las unidades metamórficas referidas (**Boinet, et al., 1985**). Estudios geocronológicos

recientes realizados en el MS, han permitido establecer que la unidad Neis del Bucaramanga tiene una máxima edad estratigráfica del Meso-Proterozoico (edad de depositación entre 1200-1300 Ma; según edades U-Pb en zircons detríticos), y ha sido afectada por eventos metamórficos que guardan relación temporal con los reportados para el cinturón orogénico Grenvilliano que afectó al margen Este de Laurentia, a finales del Meso-Proterozoico y comienzos del Neo-Proterozoico (entre ~1100 y ~980 Ma; **Cordani, et al., 2005**). La unidad Esquistos del Silgará (*s.s.*) se considera tiene una máxima edad estratigráfica del Neo-Proterozoico (máxima edad de depositación de ~900 Ma), según edades U-Pb de los zircons detríticos más jóvenes presentes en sus litologías siliciclásticas. Por otro lado, la unidad Esquistos del Chicamocha se considera tiene una máxima edad de depositación del Cámbrico Medio (~500 Ma). El máximo pico de metamórfico que afectó a estas dos unidades metamórficas (Esquistos del Silgará *s.s.* y del Chicamocha), se considera tuvo lugar durante el evento principal de la Orogenia Fammatiniana (localmente denominada Quetame-Caparonensis; Ordovícico Temprano; 480-470 Ma). Con el desarrollo de la orogenia Fammatiniana (evento orogénico principal), se relaciona el emplazamiento de granitoides sin-tectónicos (de edades entre 480-472 Ma), los cuales hacen parte de la denominada unidad metamórfica Ortoneis (**Restrepo-Pace and Cediell, 2010; Mantilla, et al., 2012; Van der Lilej, et al., 2016**). La unidad Filitas de San Pedro representa la unidad metamórfica más joven reconocida en el MS. Su máxima edad estratigráfica se considera Ordovícico Tardío (según edades U-Pb de los zircons detríticos más jóvenes presentes en sus litologías siliciclásticas, >450 Ma). El metamorfismo que afectó a esta unidad no ha sido determinado por métodos geocronológicos. No obstante, considerando (1) la presencia de unidades graníticas con moscovita ígnea y granate ocasional en el MS (rocas ligeramente peraluminicas de la serie calco-alcalina alta en potasio, agrupadas dentro de la unidad ígnea Granito de Durania), de edad Silúrico Temprano (~442 Ma; según dataciones U-Pb en circones reportados por **Botello, et al., 2014**), (2) el contexto de emplazamiento sugerido por **Botello, et al. (2014)** para ésta unidad ígnea (mediante pulsos magmáticos generados durante un evento progresivamente cada vez más compresivo), y (3) la existencia de rocas sedimentarias del Devónico cubriendo estas litologías, es posible sugerir que el último evento de metamorfismo regional que afectó al MS, debió tener lugar principalmente durante el periodo comprendido principalmente entre finales del Ordovícico y Silúrico (**Van der Lilej, et al., 2016; Mantilla, et al., 2016**). Este evento tectono-termal, el cual dio lugar a litologías de más bajo grado de metamorfismo (e.g., fillitas y meta-sedimentitas), se relaciona con otro evento de metamorfismo regional, el cual ha sido denominado como evento orogénico Fammatiniano Menor (**Mantilla et al., 2016**). Un evento tectono-termal más reciente que el Fammatiniano ya referido para el MS, al parecer tuvo



**Figura 1.** Izquierda, mapa geológico generalizado del Macizo de Santander (adaptado y modificado de Goldsmith, *et al.*, 1971), mostrando la RCMS. Centro, esquema geológico-estructural generalizado de la RCMS (adaptado y modificado de Ward, *et al.*, 1973, y García, *et al.*, 2005), mostrando la localización del área de estudio y sitios de muestreo de KyQVs (indicados por estrellas negras).

lugar durante el Paleozóico Tardío (Silva, *et al.*, 2004). Sin embargo, este evento no se acompañó de fenómenos propios de un metamorfismo regional, sino que generó localmente procesos de metamorfismo dinamo-térmico. Las litologías metamórficas que contienen las venas de cuarzo-cianita (KyQVs) objeto del presente estudio, han sido agrupadas como parte de la Formación Silgará (*s.l.*; siguiendo el sentido original de Ward, *et al.*, 1973). No obstante, considerando la reciente propuesta de escisión para esta unidad (Mantilla, *et al.*, 2016), es posible sugerir que las KyQVs se hospeden en la unidad Esquistos del Chicamocha. Sin embargo, debido a la falta de una mayor densidad de datos geocronológicos (y teniendo en cuenta que el máximo pico de metamorfismo para estas dos unidades referidas es el evento orogénico principal Fammatiniiano, en adelante se hará referencia a las litologías hospedadoras de las KyQVs como Formación Silgará (*s.l.* Con base en las localidades donde afloran las rocas metamórficas del basamento del MS, en este se reconocen varias franjas de rocas metamórficas, tales como las franjas Piedecuesta-Aratoca, Pamplona-

Chitagá y Berlín-Silos-Mutiscua, entre otras (Ward, *et al.*, 1973; Royero y Clavijo, 1994). La secuencia de rocas metamórficas de la Formación Silgará (*s.l.*), aflorante en la franja Berlín-Silos-Mutiscua, está limitada al oeste con la unidad Ortoneis, en contacto ondulado e irregular; al este con la Falla de Mutiscua, la cual pone en contacto a la Formación Silgará con la Formación Floresta (unidad sedimentaria más antigua del MS, de edad Devónico), y al sureste con la Falla de Socotá, la cual pone en contacto a la Formación Silgará con rocas sedimentarias de ambiente marino de edad Cretácica. Hasta la fecha, la única franja de rocas metamórficas del MS en la cual se han observado las KyQVs, corresponde a la franja Berlín-Silos-Mutiscua, la cual se localiza en la región central del MS (RCMS). Allí afloran rocas metapelíticas (esquistos micáceos con granate, estaurolita y cianita, con subordinado feldespato potásico y plagioclasa). Estas rocas son la litología huésped de las KyQVs. Estudios previos sobre las condiciones del evento metamórfico principal que ha afectado a estas rocas en la RCMS (e.g., Castellanos, 2001; Castellanos, *et al.*, 2004,

2008; **García, et al.**, 2005), revelan que éste tuvo lugar en condiciones de presión intermedia y alta temperatura (metamorfismo tipo Barroviense). Apoyados en el esquema zonal (según presencia de minerales metamórficos índices) propuesto por otros autores (e.g., **Ward, et al.**, 1970; **García, et al.**, 2005), el área donde afloran las KyQVs, se proyecta en la zona metamórfica de la estauroлита-cianita, en donde las condiciones máximas de presión y temperatura alcanzadas, están en el rango de 6.1-8.5 kbar y 616-784 °C (**García, et al.**, 2005). La trayectoria de PT en sentido horario para estas rocas, sugieren el desarrollo de un evento colisional, con engrosamiento cortical durante las primeras etapas de la colisión, seguido de una exhumación, resultando en una descompresión acompañada por calentamiento (**García, et al.**, 2005). Asociado a este último evento (descompresión y calentamiento por adelgazamiento cortical), se relaciona la formación de porfidoblastos de andalucita y cordierita en algunos sectores de la RCMS. No obstante, no se descarta que algunos de estos minerales se relacionen con procesos propios de un metamorfismo de contacto, temporalmente coincidentes con el emplazamiento de cuerpos ígneos propios de los eventos magmáticos del Paleozóico o Mesozóico (?).

### Muestreo de campo y técnicas analíticas

Las muestras de KyQVs se recolectaron durante el desarrollo de varios trabajos de campo realizados en los alrededores del municipio de Mutiscua (Norte de Santander) con estudiantes de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. La estrategia de muestreo consistió en tomar las KyQVs en diferentes afloramientos. Las muestras fueron caracterizadas inicialmente por estereomicroscopía, utilizando un equipo ZEISS modelo Stemi DV4, con el fin de determinar los rasgos a escala macroscópica de las KyQVs. El análisis petrográfico se llevó a cabo utilizando un microscopio de polarización trinocular Olympus BX-51, con sistema de fotomicrografía Nikon de alta resolución de 5.5 MegaPíxeles y con software Nikon NIS-Elements de la Universidad de Pamplona, con el fin de observar los rasgos texturales y microestructurales. Las abreviaturas de los minerales utilizadas, son las propuestas por Kretz (1983). La cianita y las fases minerales asociadas en las venas hidrotermales se analizaron también por microscopía electrónica de barrido (SEM), utilizando un equipo QUANTA FEG 650 marca FEI, bajo las siguientes condiciones analíticas: aumento = 120-10000x, HFW = 4.97-5.97.0 µm and 1.99-2.49 mm, HV = 20 kV, WD = 10.0-11.3, señal = BSE y Z Cont, detector = BSED, detector EDS EDAX APOLO X con resolución de 126.1 eV (en. Mn K $\alpha$ ).

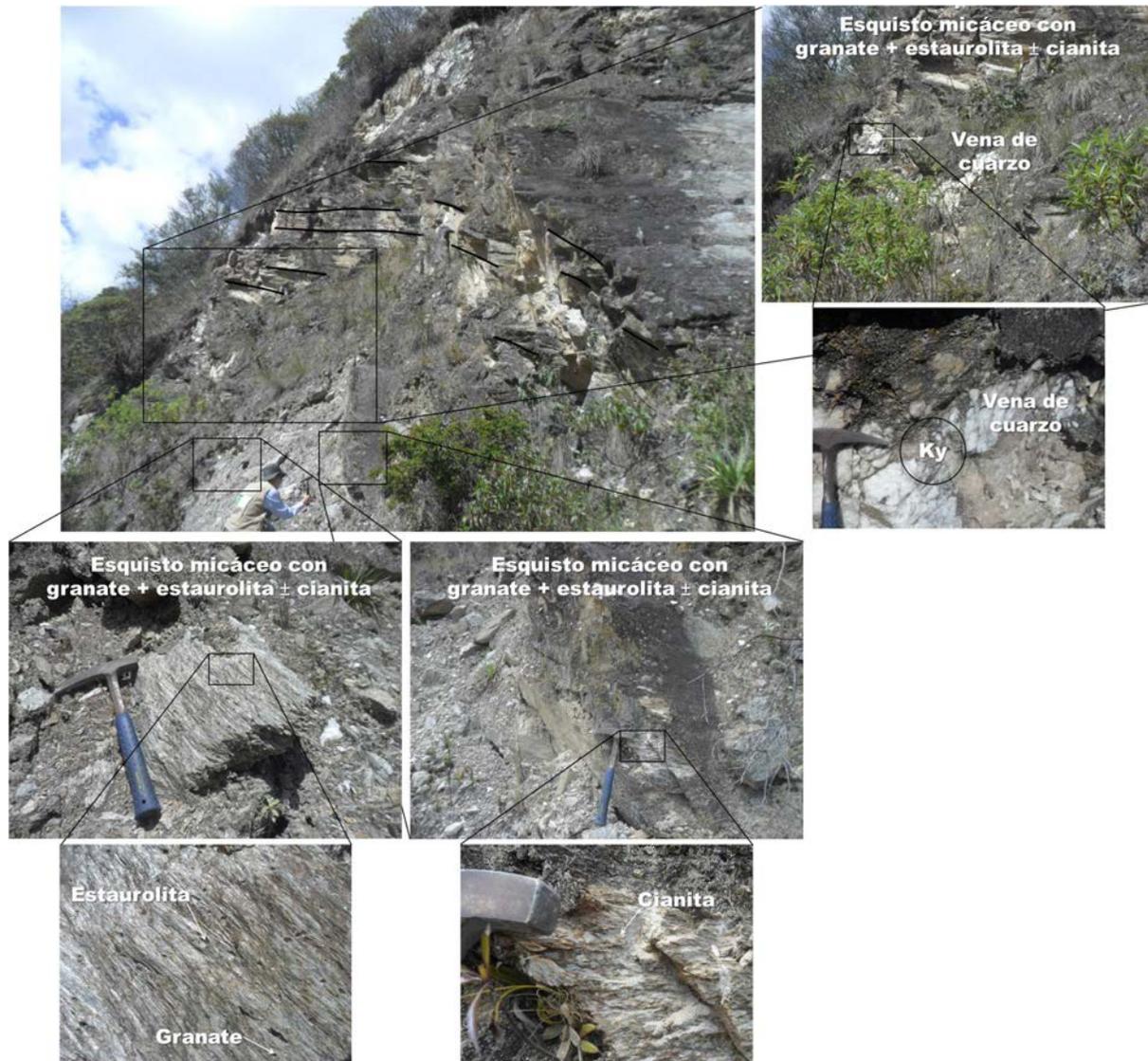
### Resultados

**Relaciones litológicas.** Las rocas metamórficas de la Formación Silgará (referida también en la literatura como unidad Esquistos del Silgará ó Unidad Esquistos del Silgará *s.l.*) en la RCMS presentan actitudes espaciales variables (al sur, los rumbos son NE, con buzamientos NW; al norte, los rumbos

son NW, con buzamientos NE), y muestran evidencias que reflejan que han sido afectadas por múltiples deformaciones. Estas rocas metamórficas están representadas principalmente por rocas metapelíticas, las cuales presentan delgadas intercalaciones de metabasitas y rocas matacarbonatadas y calcosilicatadas. Las rocas metapelíticas en la zona de la estauroлита-cianita incluyen esquistos micáceos, esquistos granatíferos, esquistos con granate + estauroлита ( $\pm$  cianita  $\pm$  andalucita  $\pm$  silimanita), y cuarcitas micáceas. Las KyQVs se encuentran hospedadas en esquistos micáceos con granate + estauroлита  $\pm$  cianita. Las venas de cuarzo son esencialmente monominerales, aunque en algunos casos presentan cianita + cuarzo. Los contactos con las rocas encajantes son netos, aunque en algunos sectores se observa una delgada zona de transición (hasta de 1 cm de espesor) entre las KyQVs y las rocas encajantes, dentro de la cual es común observar enriquecimiento en muscovita o biotita, dependiendo del tipo de mica predominante en las rocas encajantes. Las KyQVs presentan espesores aproximadamente desde 1 cm hasta 1 m, y se caracterizan por estar boudinadas (discontinuas) y formar lentes asimétricos concordantes con la foliación metamórfica de las rocas encajantes. No obstante, otras pueden seguirse a escala de afloramiento hasta por varios metros. A escala de afloramiento, las venas están aisladas y no forman redes o enjambres de venas interconectadas. La cianita es encontrada, particularmente en y alrededor de venas de cuarzo. Este mineral excepcionalmente desarrolla agregados de cristales de hasta de 3.5 cm de longitud, de color azul claro ligeramente verdoso. En algunos casos, la cianita parece haber nucleado hacia el contacto con la roca encajante, en donde la cianita ha crecido paralelo a las paredes de las venas, aunque es más común observar la cianita en cristales orientados al azar completamente contenidos en las venas de cuarzo. Aunque las venas de cuarzo están distribuidas a través de toda el área de estudio, las KyQVs al parecer se encuentran solo dentro de esquistos micáceos aluminicos. Las figuras 2 y 3 ilustran ejemplos de la ocurrencia de este tipo de venas en esquistos micáceos de la Formación Silgará.

En general, los cristales azules de cianita de dimensiones centimétricas exhiben su eje c más desarrollado paralelo al borde de las venas de cuarzo, aunque dentro de ésta presentan una orientación al azar (Figura 4), similar a lo reportado por **Allaz, et al.** (2005), quienes consideran que los cristales de cianita orientados de forma paralela a la lineación mineral de las rocas encajantes, indican un crecimiento progresivo durante la apertura de la vena, mientras que los cristales de cianita que exhiben una orientación al azar, sugieren un crecimiento sin un control de esfuerzos significativo.

No existe evidencia de la existencia de andalucita o silimanita en estas venas o rellenando fracturas en cianita. No obstante, en una muestra recolectada "*ex situ*" se observa un intercrecimiento entre los tres polimorfos de Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, con un predominio de la cianita, la cual ha sido parcialmente reemplazada por muscovita. La Figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/>



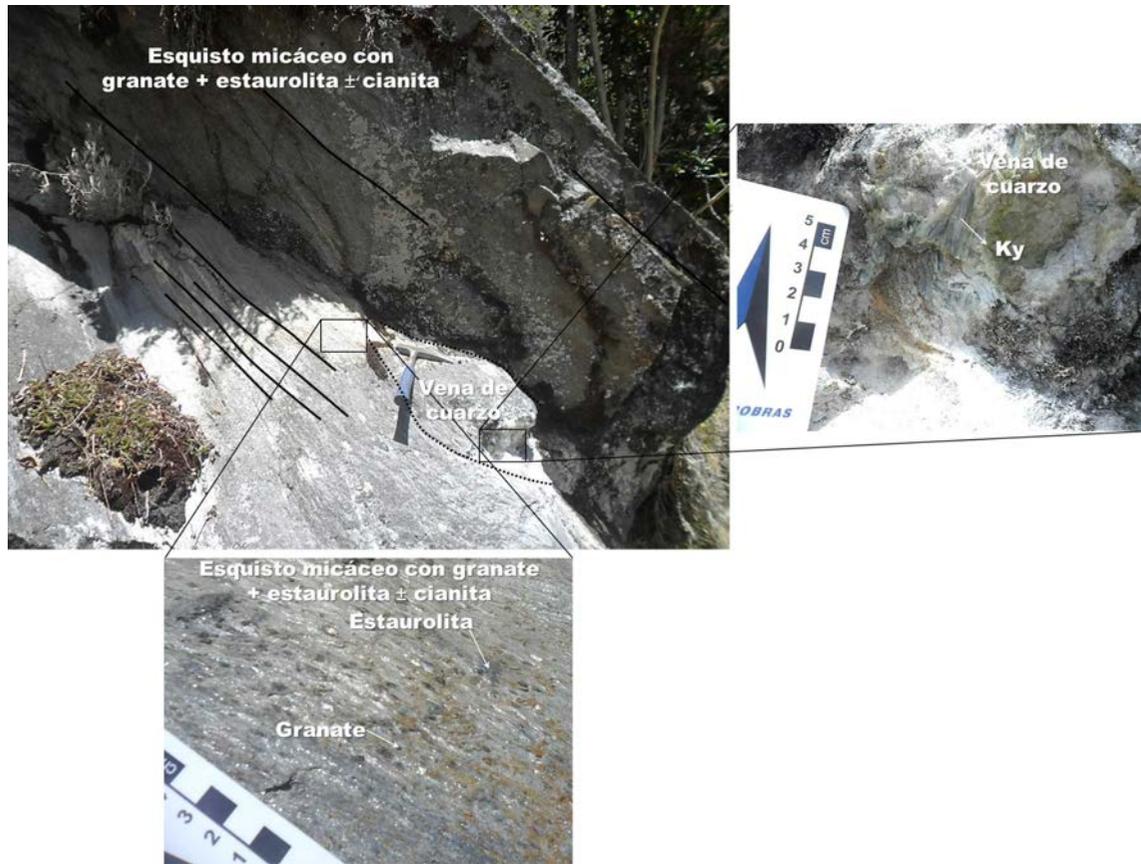
**Figura 2.** Fotografía de afloramiento de esquistos micáceos con granate + estauroлита ± cianita, mostrando la ocurrencia de agregados de cianita en el cuello de una vena de cuarzo boudinada.

385/1918, ilustra la ocurrencia de intercrecimientos de cianita con muscovita, así como las relaciones texturales entre los polimorfos de  $Al_2SiO_5$ .

#### **Petrografía**

**Petrografía de la roca encajante.** La roca encajante de las KyQVs está representada por esquistos pelíticos de la Formación Silgará, los cuales presentan una estructura esquistosa bien definida con orientación preferencial de los constituyentes micáceos (biotita y muscovita), y se caracterizan por presentar una textura básicamente porfidoblástica con matriz granolepidoblástica. Estas rocas revelan un metamorfismo retrógrado, el cual promueve procesos de hidratación (y consecuentemente también alteraciones hidrotermales), tales como reemplazamiento parcial de granate, biotita y estauroлита por clorita, y plagioclasa y estauroлита por sericita (Castellanos, *et al.*, 2008). La petrografía y química mineral

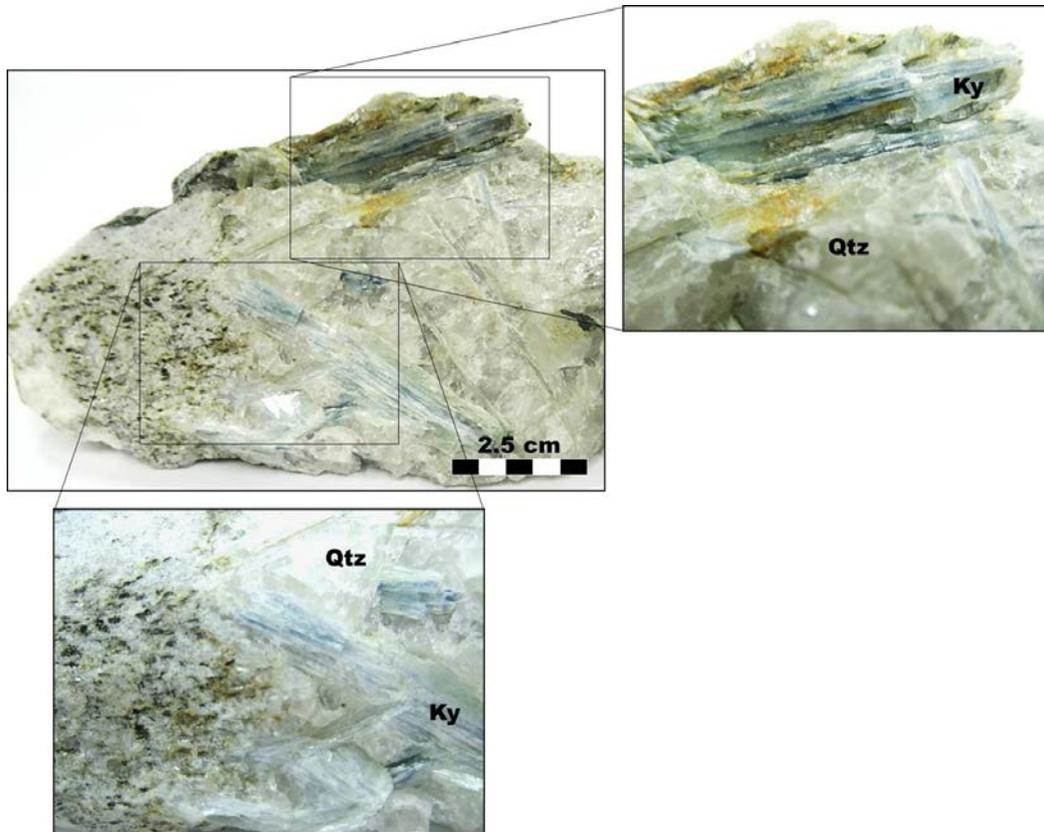
de las rocas metapelíticas de la Formación Silgará ha sido reportada en los trabajos previos (e.g., Campos, 1999; Castellanos, 2001; Castellanos, *et al.*, 2004, 2008; García, *et al.*, 2005). Con base en la información de estos estudios previos y los resultados de este trabajo, discutimos los rasgos composicionales y texturales de estas rocas, los cuales son de gran importancia para el entendimiento de las condiciones y mecanismos de formación de venas hidrotermales y su relación con las rocas encajantes. Las venas de cuarzo son comunes en la Formación Silgará y algunas contienen cristales de cianita. Los esquistos están compuestos por cuarzo, estauroлита, granate, biotita, muscovita, plagioclasa, grafito y turmalina. El granate generalmente ocurre como porfidoblastos típicamente de grano fino, especialmente en dominios ricos en cuarzo (esquistos silíceos de Castellanos, 2001), los cuales exhiben zonación sectorial textural y química



**Figura 3.** Fotografía de afloramiento de KyQVs de geometría lenticular y paralela a la foliación KyQVs metamórfica de esquistos micáceos con granate + estaurolita ± cianita.

(Castellanos, *et al.*, 2008). No obstante, este mineral ocurre también como cristales euhedrales parcialmente incluidos en estaurolita o como relictos corroídos dentro de este mineral. Numerosos porfidoblastos de estaurolita euhedral de hasta 8 mm de longitud orientados al azar comúnmente exhiben núcleos con abundantes inclusiones orientadas de cuarzo e ilmenita, principalmente, y grafito, con bordes libres de inclusiones. Los patrones de inclusiones pueden ser rectos o sigmoidales y representan la fábrica más antigua identificada, la cual generalmente es discordante con la fábrica externa de la roca, sugiriendo que la estaurolita creció inter-cinemáticamente entre la segunda fase de deformación y la última. En algunos casos también es posible observar porfidoblastos de estaurolita con inclusiones orientadas al azar, desarrollando maclas cruciformes. Relictos corroídos de estaurolita son preservados en muscovita, de manera que el crecimiento de esta última claramente sería posterior al crecimiento de la estaurolita, aunque la muscovita es reemplazada por silimanita fibrolítica antes de la eliminación final de la estaurolita, la cual en algunos casos es parcialmente reemplazada por clorita y muscovita. Al parecer la estaurolita creció un tiempo después que el granate en estas rocas cuando estas habían alcanzado una temperatura más alta. La figura 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/>

article/downloadSuppFile/385/1919, ilustra algunos rasgos texturales observados no solo entre las rocas encajantes con venas de cuarzo (Figuras 2Sa-2Sd) sino también en el contacto entre las rocas encajantes y las KyQVs (Figuras 2Se-2SI). Las figuras 2Sa y 2Sb muestran un esquistos micáceo grafitoso con granate. El granate presenta numerosas inclusiones de cuarzo con un patrón sigmoidal y está envuelto por la matriz micácea desarrollando sombras de presión. Las figuras 2Sc y 2Sd ilustran un esquistos micáceo grafitoso con granate y estaurolita con esquistosidad de crenulación. El granate representa una variedad de tipo textural sector zonado y la estaurolita presenta un carácter poiquiloblástico con numerosas inclusiones de cuarzo, grafito e ilmenita. Cristales de biotita parcialmente alterados forman dominios lepidoblásticos que separan los agregados granoblásticos de cuarzo en la roca encajante (Figuras 2Se y 2Sf). Las figuras 2Sg y 2Sh ilustran la ocurrencia de un esquistos cuarzofeldespático, en el que se destaca la intensa alteración hidrotermal de la plagioclasa a sericita. En las figuras 2Si y 2Sj se observa la ocurrencia de cristales de cianita dispuestos de manera paralela a la foliación de un esquistos micáceo con granate. Un intercrecimiento de cianita + cuarzo + plagioclasa se observa en las Figuras 2Sk y 2Sl. Obsérvese la intensa alteración de la plagioclasa a sericita.



**Figura 4.** Espécimen de mano de KyQV de la zona de la estauroлита-cianita de la Formación Silgará, la cual engloba fragmentos de la roca encajante (parte inferior izquierda).

**Petrografía de las KyQVs.** La mineralogía de las KyQVs muestra algunas variaciones, aunque generalmente es el cuarzo el mineral dominante. La gran parte de las venas están compuestas de 70-90% de cuarzo, 0-25% de plagioclasa ( $X_{An} \sim 0.34$ ), 1-10% de cianita y 0-2% de muscovita. La cianita en estas venas puede variar en abundancia (1-10%). Aunque como se mencionó previamente la muestra recolectada “*ex situ*” representa una vena compuesta casi en su totalidad por cianita, con andalusita y silimanita fibrolítica, y cuarzo en poca cantidad. Estas venas presentan además pocos óxidos (ilmenita) que generalmente ocurren dentro de las fracturas de las KyQVs. El cuarzo generalmente no muestra extinción ondulosa (evidencia de la ausencia de deformaciones dúctiles intracrystalinas posteriores a su nucleación). La cianita puede observarse completamente inalterada, aunque comúnmente exhibe bordes de alteración a sericita o reemplazamiento en sus bordes y traza de exfoliación por muscovita. La figura 3S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/385/1920>, ilustra algunos rasgos texturales observados en las KyQVs. Las figuras 3Sa y 3Sb ilustran el desarrollo poiquiloblástico de cianita alrededor de cuarzo. El contacto entre un esquistotítico cuarzoso con una vena de cuarzo se ilustra en las figuras 3Sc y 3Sd. Obsérvese la biotita paralela a la esquistosidad principal de la roca. La cianita en las venas de

cuarzo muestra dos rasgos distintivos; zonación de colores de absorción (Figuras 3Se y 3Sf) y deformación (pliegues tipo “*kink*”) de la traza de exfoliación (Figuras 3Sg y 3Sh) en cristales individuales, caso similar a lo reportado por **Ryan (2010)**. **Beane and Field (2007)** mapearon cristales individuales de cianita deformados mediante difracción de electrones retrodispersados para determinar el efecto de la deformación en la estructura cristalina. En el contacto entre las KyQVs y las rocas encajantes no se observan cambios mineralógicos y/o composicionales drásticos que reflejen una intensa interacción fluido-roca, excepto una delgada zona de transición en la que ocurre un enriquecimiento de muscovita y biotita.

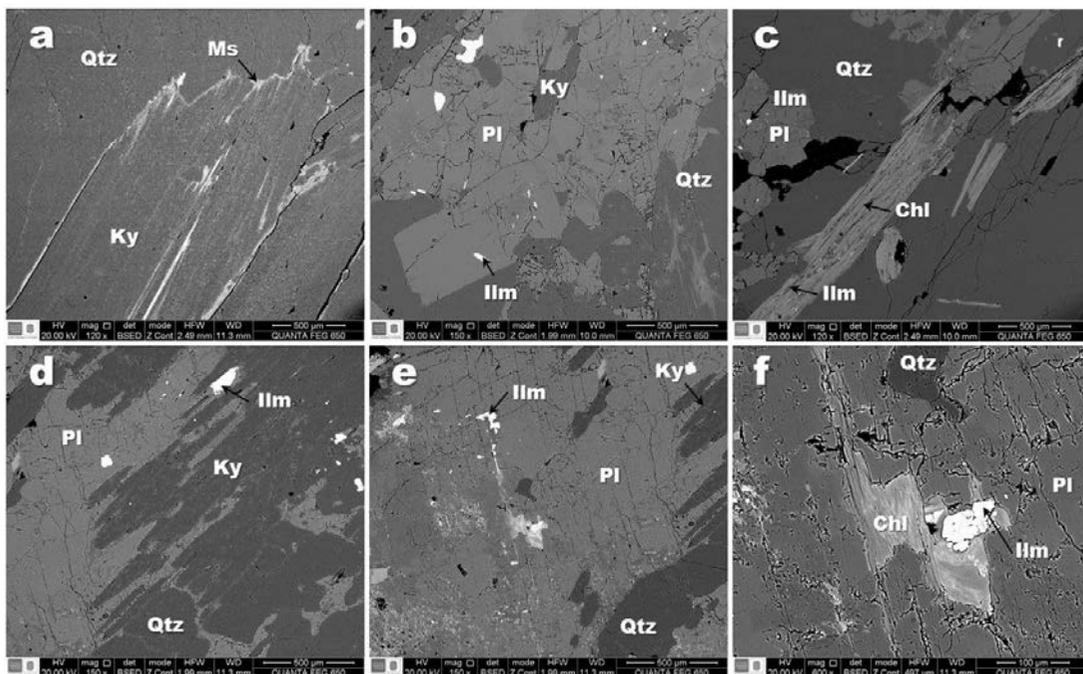
La figura 4S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/385/1921>, ilustra algunas relaciones texturales observadas entre los polimorfos de  $Al_2SiO_5$ . La cianita ocurre como cristales subidioblásticos de alto relieve, exfoliación bien desarrollada y marcada, y partición basal perpendicular al clivaje que genera un aspecto fragmentado. La cianita se presenta en cristales orientados al azar, rodeando estauroлита en dominios ricos en cuarzo, indicando un crecimiento post-cinemático. Sin embargo, en dominios micáceos ocurre junto con muscovita y biotita, presentándose en cristales débilmente alineados que crecieron durante la formación de la fábrica dominante

de la roca. La cianita generalmente exhibe bordes de reacción de sericita, los cuales han nucleado entre cianita y cuarzo, desarrollándose también pseudomorfos de sericita a partir de cianita. También es común encontrar cianita como relictos en muscovita. En otros casos, la cianita ha sido reemplazada por muscovita en sus bordes o siguiendo su traza de exfoliación. En algunos casos la cianita es reemplazada por silimanita fibrolítica. La andalucita ocurre como porfidoblastos euhedrales, de forma rectangular, alargados en el sentido de la foliación principal de la roca, los cuales pueden estar rodeados por cristales de cianita. Otra generación de andalucita corresponde a enormes neoblastos de carácter xenoblástico y poiquiloblástico, los cuales presentan numerosas inclusiones de cuarzo, principalmente, y minerales opacos, y que sugieren sobrecrecimiento post-cinemático de la fábrica dominante de la roca. Los bordes de la andalucita son más irregulares que aquellos de la cianita, muchas veces debido a reemplazamiento por sericita.

La Figura 5S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/385/1997>, ilustra imágenes de electrones retrodispersados (BSE) obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB), en las cuales se destaca a diferentes aumentos la morfología, exfoliación y partición de la cianita (Figuras 5Sa-5Sc), así como el espectro EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) característico de la cianita (Figura 5Sd), el cual permite identificar semicuantitativamente su composición elemental con las proporciones relativas de cada elemento en el mineral analizado. El espectro EDS está de acuerdo con datos de la literatura (<http://www.sfu.ca/~marshall/sem/mineral.htm>).

El análisis EDS revela que la cianita presenta relaciones de masa de C:O:Al:Si de 14.67:43.82:27.97:13.54. La señal correspondiente al carbono (C) se atribuye al recubrimiento de carbono sobre la superficie de la muestra antes del análisis por MEB.

La figura 5 ilustra imágenes de electrones retrodispersados obtenidas por MEB, en las cuales se destacan las principales relaciones texturales de la cianita en la vena de cuarzo o en la zona de transición entre esta y la roca encajante. En las KyQVs, la muscovita generalmente se forma hacia los bordes y siguiendo la traza de exfoliación de la cianita (Figura 5a). Obsérvese como el contacto entre cianita y cuarzo a pesar del poco contraste de colores en la imagen de electrones retrodispersados puede definirse en base a la exfoliación y la fractura que exhiben la cianita y el cuarzo, respectivamente. En la zona de transición entre las KyQVs y la roca encajante, se destacan varios aspectos. La cianita ocurre como inclusiones en plagioclasa a la cual también puede bordear; la plagioclasa presenta además inclusiones de cuarzo e ilmenita (Figura 5b). Obsérvese el intercrecimiento entre cianita y muscovita en la parte inferior izquierda. La figura 5c ilustra la asociación mineral en la roca encajante, la cual se caracteriza por la presencia de cuarzo + plagioclasa + biotita + ilmenita. Un intercrecimiento entre cianita, cuarzo y plagioclasa es comúnmente observado hacia el contacto entre las KyQVs y la roca encajante (Figuras 5d y 5e). La ilmenita es el mineral accesorio. La figura 5f ilustra inclusiones de cuarzo, ilmenita y clorita en plagioclasa; la clorita se ha formado a expensas de la biotita, desarrollando un pseudomorfo.



**Figura 5.** Imágenes de electrones retrodispersados al MEB ilustrando las principales relaciones texturales de la cianita dentro de la roca encajante o vena de cuarzo.

### Discusión sobre la formación de las KyQVs

**Historia reaccional.** La secuencia de reacciones minerales observadas en las rocas metapelíticas, que representan las rocas encajantes de las KyQVs, han sido documentadas por **García, et al.** (2005). A continuación, se discuten brevemente aquellas reacciones que involucran la presencia de los polimorfos de  $Al_2SiO_5$  que ocurren en esquistos de la zona de la estauroлита-cianita. Evidencia textural indica una secuencia paragenética andalucita  $\rightarrow$  cianita  $\rightarrow$  silimanita fibrolítica, aunque es común la coexistencia entre cianita y andalucita, más no con silimanita, la cual representa una fase tardía. De otra parte, la reacción (1) soporta la primera aparición de cianita (isógrada de la cianita).

(1) andalucita = cianita.

La reacción (2) no debió haber ocurrido al mismo tiempo durante el metamorfismo, debido a que realmente se desconoce si la andalucita reaccionó directamente para producir silimanita o si fue primero disuelta en una fase fluida, la cual transportaba componentes disueltos a un nuevo sitio donde el fluido finalmente precipitó silimanita fibrolítica. Relictos corroídos de cianita pueden haber sido formados como resultado de un proceso de disolución, el cual pudo afectar también a algunos cristales de cuarzo. En algunos casos la silimanita se formó dentro de cristales de muscovita.

(2) andalucita = silimanita

La disolución de cianita en las rocas metapelíticas puede ser explicada a partir de la reacción retrógrada (3).

(3) cianita + cuarzo + fluido (K) = muscovita

La disolución de muscovita en la roca encajante con la resultante formación de cianita en las venas de cuarzo podría explicarse a través de la reacción (4).

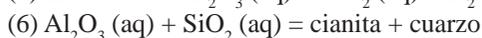
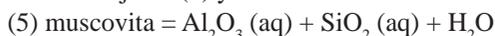
(4) muscovita +  $H^+$  = cianita + cuarzo + fluido (K)

De esta manera, los tres polimorfos de  $Al_2SiO_5$  pueden ocurrir. La silimanita fibrolítica podría representar la fase mineral más joven, la cual claramente está sobrepuesta a andalucita y cianita. Las rocas adyacentes a las venas hidrotermales pueden contener andalucita y cianita deformadas, extensamente reemplazadas por muscovita. Recristalización de muscovita a expensas de estauroлита o cianita ocurre comúnmente, y típicas texturas de esta etapa de recristalización están representadas por relictos corroídos de estos aluminosilicatos y de silimanita dentro de muscovita. Este crecimiento de muscovita parece estar relacionado a la alta actividad de agua y potasio en la fase fluida en la zona de estauroлита-cianita (**Chinner**, 1961). Estas texturas revelan la siguiente historia de crecimiento de los aluminosilicatos en la RCMS: (1) crecimiento de andalucita, (2) sobrecrecimiento de andalucita por cianita, (3) nueva formación de andalucita siguiendo la foliación metamórfica regional, (4) nueva formación de cianita siguiendo la foliación metamórfica regional, aunque, estos dos últimos eventos podrían asociarse al crecimiento de granate y estauroлита, (5) formación de cianita en venas de cuarzo, (6) crecimiento de silimanita fibrolítica. No obstante, estos dos últimos eventos podrían llegar a ser contemporáneos y asociados al emplazamiento

de granitoides, como evidencia del magmatismo tardío ocurrido durante el evento orogénico menor Fammatiniano del Silúrico propuesto por **Mantilla, et al.** (2016). Las paragénesis con estauroлита-cianita se desarrollaron durante el pico de metamorfismo regional. Durante el levantamiento isotérmico, la circulación de fluidos localizados resultó en el desarrollo tardío de silimanita fibrolítica. Sin embargo, según **García, et al.** (2005), evidencia textural indica que, en contra de lo que se propone en el presente estudio, la andalucita es el polimorfo de  $Al_2SiO_5$  más joven, mientras que la cianita y la silimanita representarían, respectivamente, los picos bórico y térmico de metamorfismo. La otra posibilidad que se podría contemplar sería el efecto producido por los intrusivos graníticos de dimensiones batolíticas que podrían encontrarse en niveles estructurales poco profundos dentro de la secuencia metamórfica, los cuales obviamente representan un evento posterior al pico de metamorfismo. En este sentido, es necesario considerar que la roca hospedadora de las KyQVs refleja la transformación polimórfica de andalucita  $\rightarrow$  cianita (pico bórico)  $\rightarrow$  silimanita (pico térmico), con el desarrollo de porfidoblastos de andalucita y silimanita fibrolítica en una etapa tardía asociada al magmatismo tardío arriba señalado. No existe aún evidencia de la ocurrencia de andalucita o silimanita o ambas con cianita en venas de cuarzo, aunque si diferentes relaciones entre estos polimorfos de  $Al_2SiO_5$  en rocas metapelíticas, siendo quizás la cianita y la silimanita dos fases minerales que se formarían por transformaciones polimórficas a partir de la nucleación en y alrededor de cristales de andalucita texturalmente más tempranos. No obstante, en la muestra “*ex situ*” es posible deducir la transformación polimórfica, en la cual se destaca la nucleación inicial de la cianita, cuando el ambiente frágil espaciado y acuoso facilitó el desarrollo de cristales de gran tamaño (hasta de 10 cm de longitud). Posterior a este evento, se sugiere una fase de descompresión en el sistema, debido a un proceso de levantamiento, que favoreció la nucleación de andalucita, seguida de una fase caracterizada por el aumento en las condiciones de presión y temperatura, por transporte tectónico a niveles más profundos de la corteza, durante el cual se llevó a cabo la nucleación de silimanita fibrolítica a partir de sus dos predecesores, consumiendo el exceso de Al que se encontraba aún en el sistema. Cristales prismáticos de cianita ocurren en venas de cuarzo, generalmente siguiendo la foliación principal de la roca, aunque en una roca adyacente a una vena de cuarzo se ha comprobado la existencia de cianita, andalucita, estauroлита y granate, con la formación de silimanita fibrolítica tardía. Algunas venas de cuarzo pudieron desarrollarse en un contexto dúctil y que corresponden a la formación prógrada inicial de cianita por medio de la reacción polimórfica andalucita  $\rightarrow$  cianita que se relacionan con niveles estructurales más profundos, mientras que otras pueden atribuirse a un contexto frágil en niveles estructurales poco profundos durante la exhumación.

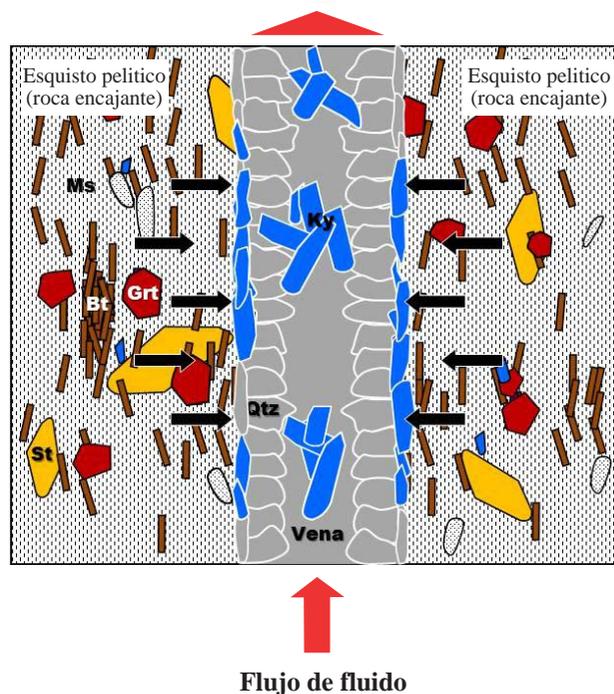
El origen de las KyQVs ha sido propuesto por **Kerrick** (1990) como consecuencia de la circulación de paleofluidos que contienen Al y Si disueltos. Un mecanismo similar

propuesto por otros autores (e.g., **Carmichael**, 1969; **Foster**, 1986; **Cesare**, 1994) explica el origen de segregaciones de aluminosilicatos dentro de rocas silicatadas. **Cesare** (1994) propone igualmente un mecanismo de hidrofracturamiento para explicar la ocurrencia de venas de cuarzo-biotita-andalucita en hornfelsas pelíticas en aureolas de contacto, considerando que el material fuente para la generación de dichas venas se derivó localmente de las rocas metapelíticas encajantes. Las venas de cuarzo en terrenos metamórficos regionales han sido interpretadas o como trayectorias fosilizadas de circulación de fluidos y transferencia de masa adyectiva a gran escala (e.g., **Yardley**, 1986; **Ferry**, 1992; **Masters and Ague**, 2005) o como segregaciones producidas por transporte local de Si (e.g., **Yardley**, 1975; **Yardley and Bottrell**, 1992) o una combinación de los dos. En principio podrían considerarse varias posibilidades para explicar el origen de las KyQVs en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará, de acuerdo a modelos propuestos en otros estudios (e.g., **Etheridge, et al.**, 1984; **Kerrick**, 1990; **Ague**, 1994a; 1994b), los cuales pueden involucrar fuentes externas de fluidos (sistema abierto) a través de procesos de infiltración o fuentes locales de fluidos (sistema cerrado) a través de procesos de difusión. Reacciones prógradas de deshidratación dentro de esquistos pelíticos en la zona de la estauroлита-cianita han sido quizás el mecanismo que produce las venas de cuarzo, las cuales usualmente presentan cianita. **Beitter, et al.** (2008) demostraron que grandes cantidades de Al transportadas en fluidos metamórficos regionales debido a su gran movilidad pueden promover la formación de KyQVs, probablemente independiente del contexto tectónico (ambiente frágil-dúctil) considerado. No obstante, hay que considerar además que estas podrían haberse formado por diferenciación metamórfica, promoviendo la remobilización de Si de la roca encajante. **Widmer and Thompson** (2001), a partir de datos de balance de masa indican que no es necesario involucrar la circulación de fluidos de infiltración de fuentes distantes. En este sentido, las reacciones de deshidratación de silicatos, particularmente de la muscovita, han sido documentadas en el presente estudio. Puede suponerse que gradientes de potencial químico, principalmente de  $Al_2O_3$ , habrían favorecido la nucleación y el crecimiento de cianita en las venas de cuarzo a expensas de la descomposición de la muscovita en las paredes de la roca encajante, en este caso las rocas metapelíticas de la Formación Silgará. Según **Widmer and Thompson** (2001), el gradiente en el potencial químico del  $Al_2O_3$  entre las fases reactantes en las rocas encajantes y las nuevas fases producidas (cianita + cuarzo) promueve el transporte de  $Al_2O_3$  hacia la vena, proceso que se ilustra en la Figura 6. Los gradientes químicos resultan de la presencia de cuarzo + cianita en las venas y los reactantes (principalmente muscovita) en las rocas adyacentes. Este proceso puede explicarse en términos de dos reacciones, una en la roca encajante (5) y la otra en la vena de cuarzo (6).



**Temporalidad de formación de las KyQVs.** Las KyQVs al parecer no se correlacionan con la mineralogía o el grado de metamorfismo de la roca encajante. La presencia de cianita en las venas de cuarzo a diferencia de la ocurrencia de dos o incluso tres polimorfos de  $Al_2SiO_5$  en las rocas metapelíticas encajantes no necesariamente refleja la falta de una interacción vena - roca encajante durante la cristalización de la vena hidrotermal ni una fuente externa de materiales potencialmente formadores de venas. Estas observaciones indican que diferentes mecanismos de formación de venas pudieron haber actuado en diferentes momentos de la evolución tectono-termal de estos materiales. Actualmente, no existe evidencia de la ocurrencia de andalucita y/o silimanita en venas de cuarzo encajadas en rocas con similar paragénesis mineral.

La presencia de cianita hacia la zona central de las venas de cuarzo se debe básicamente a la xxx durante eventos de rehidratación en un contexto frágil resultado de la exhumación del orógeno que dió origen a venas hidrotermales tardías paralelas a la foliación regional de las rocas metapelíticas (**Caviedes y Gómez**, 2006). La cianita ocurre también en contacto neto entre los esquistos micáceos (roca encajante) y las venas de cuarzo. **Widmer and Thompson**



**Figura 6.** Diagrama explicativo de los procesos químicos involucrados en la formación de las KyQVs (adaptado y modificado de **Widmer and Thompson**, 2001). La reacción discontinua que produce cianita es considerada por estos autores como la combinación de dos subreacciones: en los esquistos pelíticos, liberando  $Al_2O_3$  y  $SiO_2$  al fluido hidrotermal, y en la vena, la cual hace que estas especies químicas sean disueltas para precipitar cianita. Las flechas mostradas en el esquema indican la dirección de difusión intergranular.

(2001 reportan concentraciones de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$ , las cuales muestran una disminución sistemática en la roca encajante hacia estas venas, indicando significantes cambios en la concentración de varios elementos en las paredes de las rocas adyacentes a las KyQVs. La formación de KyQVs podría no haber involucrado la misma interacción con las rocas encajantes como ocurriría con los otros polimorfos, en caso de que estos evidentemente ocurran. Según estos autores, la circulación de paleofluidos resultantes de la deshidratación de fases hidratadas (e.g., muscovita), acompañada de la disolución y el transporte de Al y Si a lo largo de gradientes de presión fluctuantes a través de las rocas en proceso de deshidratación, no explica sin embargo el porqué solo la cianita, y con frecuencia el cuarzo, y no el espectro completo de fases minerales de las rocas encajantes está presente en la región ahora ocupada por las KyQVs.

Aunque la edad geológica de la formación de las KyQVs estudiadas es incierta, las paragénesis minerales dentro de estas venas suponen su formación en condiciones de la facies de la anfibolita, debido a que grandes cantidades de Al pueden ser transportadas por fluidos metamórficos bajo estas condiciones (Beitter, *et al.*, 2008). En nuestro caso, la posibilidad de descifrar la cronología relativa de los pulsos hidrotermales soportaría algunas hipótesis. Por lo tanto, aquí será fundamental hacer una reconstrucción de la historia hidrotermal de los paleofluidos que han circulado a través de una zona de cizallamiento (Caviedes y Gómez, 2006) como se describe abajo, los cuales son importantes, entre otros, como agentes de transporte de calor, removilización, transporte y depositación de elementos químicos. Las KyQVs encajadas en rocas metapelíticas de la Formación Silgará podrían reflejar la ocurrencia de una amplia zona de cizallamiento dúctil, la cual estaría soportada por la presencia de bandas de cizallamiento distribuidas, milonitas, estructuras s-c (aún no han sido estudiadas en detalle) asociadas con la recristalización mineral, lo cual indica que la deformación dúctil incluyendo cizallamiento tuvo lugar probablemente cerca a la zona de transición frágil-dúctil, a una profundidad aproximada de 10 km. El tiempo exacto del metamorfismo de presión intermedia, acompañado de engrosamiento cortical debido a un evento colisional, como lo reportan García, *et al.* (2005), no ha sido establecido aun, pero los datos disponibles hasta ahora parecen indicar una fase orogénica mayor que ocurrió durante la orogénesis Fammatiniana principal del Ordovícico Temprano (Mantilla, *et al.*, 2016). La formación de las KyQVs quizás no involucró el mismo tipo de interacción con las rocas encajantes que las venas con ausencia de este mineral, lo cual indica que diferentes mecanismos formadores de venas pudieron haber ocurrido a diferentes tiempos durante el metamorfismo dinamo-térmico de esta unidad metamórfica (Caviedes y Gómez, 2006). Por lo tanto, el crecimiento tardío de cristales de cianita puede haber ocurrido en respuesta a un aumento de la presión y/o disminución de la temperatura, aunque las condiciones de presión y temperatura aun serían

inciertas. En las rocas encajantes (esquistos micáceos principalmente) existe evidencia de transformaciones polimórficas, aunque las fases minerales de  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  pudieron haberse igualmente formado a partir de otros minerales aluminicos. Según Sepahi, *et al.* (2004), la ocurrencia de diferentes secuencias de cristalización dentro de una región relativamente pequeña puede indicar que las trayectorias de PT pasaron cerca del punto triple de  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , produciendo diferentes trayectorias evolutivas en rocas que experimentaron similares condiciones de metamorfismo. Por lo tanto, es muy probable que la trayectoria de PT propuesta por García, *et al.* (2005) para las rocas metapelíticas de la Formación Silgará no sea solo una, sino que las diferentes relaciones entre los polimorfos de  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  permitirían sugerir el desarrollo de diferentes trayectorias alternativas, dependiendo de las transformaciones polimórficas que ocurran en una roca. Igualmente, debería considerarse la ocurrencia de un evento termal (¿metamorfismo de contacto?) sobre el evento de metamorfismo regional, combinado con la interacción fluido-roca asociada con la circulación de paleofluidos que pudieron haber favorecido una variedad de ambientes fisicoquímicos, con control estructural, en los cuales la nucleación de polimorfos de  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  varió en gran proporción en las rocas encajantes. No es claro, sin embargo, si la ausencia de andalucita o silimanita o ambas en las KyQVs sea debida al carácter metastable que estas pueden llegar a tener en condiciones de PT favorables para la formación de cianita, la cual es el único polimorfo de  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  observado en venas de cuarzo, a diferencia de lo que ocurre en otros contextos geológicos, en donde se reportan venas de cuarzo con presencia de uno, dos o tres de estos polimorfos. Es muy probable que fluidos acuosos a presiones intermedias hayan circulado a través de las rocas metapelíticas como consecuencia de la ocurrencia de reacciones químicas de deshidratación que promueven la disolución de fases minerales tales como la muscovita. Estos fluidos transportaron nutrientes ( $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) disueltos que representan las fuentes para la formación de las KyQVs.

## Conclusiones

El basamento metamórfico del Macizo de Santander presenta varios sectores con profusión de venas hidrotermales paralelas a la foliación metamórfica regional, las cuales componen, en mayor o menor medida, de cuarzo, clorita, albita, y otros minerales que pueden ser relacionados en su formación con la circulación o el escape de fluidos metamórficos (considerados generalmente como neutros y reducidos, y derivados de reacciones metamórficas de deshidratación).

La presencia de venas hidrotermales (algo boudinadas) con cuarzo-cianita, paralelas a la foliación metamórfica regional de la Formación Silgará aflorante en el sector central del Macizo de Santander, al parecer es un caso excepcional, tanto por su restringida distribución en el contexto del MS (al menos por ahora), como por la naturaleza de los potenciales fluidos asociados a su formación (en términos generales ácidos y posiblemente también algo oxidantes).

Con base en la información geológica disponible, se infiere que la formación de las venas de cuarzo-cianita en el área de estudio, este relacionada con fluidos derivados de procesos magmático-hidrotermales (MH), cuya edad y cuerpo(s) ígneo(s) causativo(s) aún no han sido determinados, ni establecidos. Sin embargo, se sospecha que esos procesos MH podrían temporalmente estar asociados al emplazamiento de intrusiones ígneas de edad Ordovícico (generadores del protolito ígneo de la unidad Ortogneis)?.

Estudios posteriores más detallados sobre la fisicoquímica de los paleofluidos asociados a la formación de las venas de cuarzo-cianita objeto de estudio (entre otros tipos potenciales de venas temporalmente relacionadas, pero aún no reconocidas o documentadas) y sus posibles paleo-alteraciones hidrotermales asociadas, podrían ayudar a develar el potencial metalogénico de esos eventos paleo-hidrotermales en ese sector del MS.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Industrial de Santander por brindar el apoyo logístico para la realización del trabajo de campo con la participación de estudiantes de Geología de la asignatura Campo II, y el uso de diferentes técnicas analíticas. Agradecimientos al laboratorio de petrografía del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada de la Universidad Industrial de Santander y su personal, por el servicio de laboratorio y analítico suministrado para la adquisición de datos.

---

### Información suplementaria

---

**Figura 1S.** Espécimen de mano de muestra “*ex situ*” ilustrando las relaciones texturales entre los polimorfos de  $Al_2SiO_5$ , así como intercrecimientos de cianita + muscovita sobre superficie pulida. Vea la figura 1S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/385/1918>

**Figura 2S.** Fotomicrografías ilustrando los rasgos texturales (a-d) entre las rocas encajantes con venas de cuarzo y (e-l) en el contacto entre las rocas encajantes y las KyQVs observados en PPL y XPL, respectivamente; Aumento 4x. Vea la figura 2S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/385/1919>

**Figura 3S.** Fotomicrografías ilustrando la ocurrencia de cianita en la roca encajante y venas de cuarzo observados en PPL y XPL, respectivamente; Aumento 4x (a-d); 10x (e-h). Vea la figura 3S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/385/1920>

**Figura 4S.** Fotomicrografías ilustrando las relaciones texturales observadas entre los polimorfos de  $Al_2SiO_5$  en la muestra “*ex situ*” de la Figura 1S, así como intercrecimientos de cianita + muscovita observados en XPL; Aumento 4x. Vea la figura 4S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/385/1921>

**Figura 5S.** (a)-(c) Imágenes de electrones retrodispersados al MEB ilustrando a diferentes aumentos la morfología, exfoliación y partición de la cianita. (d) Espectro EDS característico de la cianita. Vea la figura 5S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/385/1997>

---

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### Referencias

- Ague, J.J.** (1994a). Mass transfer during Barrovian metamorphism of pelites, south-central Connecticut. I: evidence for changes in composition and volume. *American Journal of Science*, **294** (8): 989-1057.
- Ague, J.J.** (1994b). Mass transfer during Barrovian metamorphism of pelites, south-central Connecticut. II: channelized fluid flow and the growth of staurolite and kyanite. *American Journal of Science*, **294** (8): 1061-1134.
- Ague, J.J.** (1995). Deep-crustal growth of quartz, kyanite and garnet into large-aperture, fluid-filled fractures, north-eastern Connecticut, USA. *Journal of Metamorphic Geology*, **13** (2): 299-314.
- Allaz, J., Maeder, X., Vannay, J. & Steck, A.** (2005). Formation of aluminosilicate-bearing quartz veins in the Simano nappe (Central Alps): structural, thermobarometric, and oxygen isotope constraints. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **85** (2-3): 191-214.
- Beane, R.J. & Field, C.K.** (2007). Kyanite deformation in white-schist of the ultrahigh-pressure metamorphic Kokchetav Massif, Kazakhstan. *Journal of Metamorphic*, **25** (2): 117-128.
- Beitter, T., Wagner, T. & Markl, G.** (2008). Formation of kyanite-quartz veins of the Alpe Sponda, Central Alps, Switzerland: implications for Al transport during regional metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **156** (6): 689-707.
- Boinet, T., Bourgois, J., Bellon, H. & Toussaint, J.** (1985). Age et repartition du magmatisme Premesozoïque des Andes de Colombie. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences. Serie D: Sciences Naturelles*, **300** (II): 445-450.
- Botello, F., Mantilla, L.C. & Colegial, J.D.** (2014). Edad U-Pb en zircones y contexto tectónico de formación del Granito de Durania (Macizo de Santander, Colombia). *Memorias XI Semana Técnica de Geología y I Geosciences anual meeting*. UIS. Bucaramanga, 11 al 15 de Agosto de 2014.
- Bucholz, C.E. & Ague, J.J.** (2010). Fluid flow and Al transport during quartz-kyanite vein formation, Unst, Shetland Islands, Scotland. *Journal of Metamorphic Geology*, **28** (1): 19-39.
- Carmichael, D.** (1969). On the mechanism of prograde metamorphic reactions in quartz-bearing pelitic rocks. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **20** (3): 244-267.
- Campos, N.** (1999). Estudio Mineralógico y Petrográfico de las Metamorfitas al Occidente del Municipio de Mutiscua (Norte de Santander). Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (Colombia).
- Castellanos, O.M.** (2001). Chemical composition of the rock-forming minerals in the Silgará formation and P-T conditions in the Mutiscua area, Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. Unpublished Master Thesis, Shimane University, Matsue (Japan).
- Castellanos, O.M., Ríos, C.A. & Takasu A.** (2004). Chemically sector-zoned garnets in the metapelitic rocks of the Silgará Formation in the central Santander Massif, Colombian Andes: occurrence and growth history. *Boletín de Geología*, **26** (1): 91-98.

- Castellanos, O.M., Ríos, C.A. & Takasu A.** (2008). A new approach on the tectonometamorphic mechanisms associated with P-T paths of the Barrovian-type Silgará Formation at the Central Santander Massif, Colombian Andes. *Earth Sciences Research Journal*, **12** (2): 125-155.
- Caviedes, M.A. & Gómez, R.E.** (2006). Petrogénesis de venas hidrotermales con cianita en rocas metapelíticas de la Formación Silgará, región central del Macizo de Santander. Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (Colombia).
- Cesare, B.** (1994). Synmetamorphic veining: origin of andalusite-bearing veins in the Vedrette di Ries contact aureole, eastern Alps, Italy. *Journal of Metamorphic Geology*, **12** (5): 643-653.
- Chinner, G.A.** (1961). The origin of sillimanite in Glen Clova, Angus. *Journal of Petrology*, **2** (3): 312-323.
- Clavijo, J.** (1994). Mapa geológico generalizado del Departamento de Norte de Santander, Memoria explicativa. Informe interno INGEOMINAS, 67p.
- Cordani, U., Cardona, A., Jimenez, D., Liu, D. & Nutman, A.** (2005). Geochronology of Proterozoic basement inliers in Colombian Andes: tectonic history of remnants of a fragmented Grenville belt. In: terrane processes at margins of Gondwana. Geological Society, London, Special Publications. Edited by Vaughan, A., Leat, P., and Pankhurst, R., **246**: 329-346.
- Etheridge, M.A., Wall, V.J. & Cox, S.F.** (1984). High fluid pressures during regional metamorphism and deformation: implications for mass transport and deformation mechanisms. *Journal of Geophysical Research*, **89** (6): 4344-4358.
- Ferry, J.M.** (1992). Regional metamorphism of the Waits River Formation, eastern Vermont: Delineation of a new type of giant metamorphic hydrothermal system. *Journal of Petrology*, **33** (1): (4594).
- Foster, C.** (1986). Thermodynamic models of reactions involving garnet in sillimanite/staurolite schist. *Mineralogical Magazine*, **50**: 427-439.
- García, C.A., Ríos, C.A. & Castellanos, O.M.** (2005). Medium-pressure metamorphism in the central Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes: constraints for a collision model. *Boletín de Geología*, **27** (2): 43-68.
- Grant, J.A.** (1986). The isocon diagram; a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, **81** (8): 1976-1982.
- Julivert, M.** (1970). Cover and basement tectonics in the Cordillera Oriental of Colombia, South America, and a comparison with some other folded chains. *Geological Society American Bulletin*, **81**: 3623-3643.
- Kerrick, D.** (1990). The Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> polymorphs. *Reviews in Mineralogy* 22. Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 406p.
- Kretz, R.** (1983). Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **68**: 277-279.
- Lentz, D.R. & Gregoire, C.** (1995). Petrology and mass-balance constraints on major-, trace- and rare-earth-element mobility in porphyry-greisen alteration associated with epizonal True Hill granite, south-western New Brunswick, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, **52** (3): 303-331.
- Lang, H.D. & Dunn, G.R.** (1990). Sequential porphyroblast growth during deformation in a low pressure metamorphic terrane, Orrs Island, Haspswell Neck, Maine. *Journal of Metamorphic Geology*, **8** (2): 199-216.
- Larson, T.E. & Sharp, Z.D.** (2003). Stable isotopic constraints on the Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> "triple point" rocks from the Proterozoic Priest pluton contact aureole, New Mexico, USA. *Journal of Metamorphic Geology*, **21** (8): 785-798.
- Mantilla, L.C., Ríos, C.A., Gélvez, J.R., Márquez, R.E., Ordoñez, J.C. & Cepeda, S.** (2003). Nuevas evidencias acerca de la presencia de una banda de cizallamiento en la Formación Silgará del sector Aratoca-Pescadero (Macizo de Santander). *Boletín de Geología*, **25** (40): 81-90.
- Mantilla, L.C., Bissig, T., Cottle, J.M. & Hart, C.** (2012). Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera). *Journal of South American Earth Sciences*, **38**: 1-12.
- Mantilla, L.C., García, C.A. & Valencia, V.** (2016). Propuesta de escisión de la denominada 'Formación Silgará' (Macizo de Santander, Colombia) a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, **38** (1): 33-50.
- Masters, R.L. & Ague, J.J.** (2005). Regional-scale fluid flow and element mobility in Barrow's metamorphic zones, Stonehaven, Scotland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **150**: 1-18.
- McLelland, J., Morrison, J., Selleck, B., Cunningham, B., Olson, C. & Schmidt, K.** (2002). Hydrothermal alteration of late- to post- tectonic Lyon Mountain granitic gneiss, Adirondack Mountains, New York: origin of quartz-sillimanite segregations, quartz-albite lithologies, and associated Kiruna-type low-Ti-Fe-oxide deposits. *Journal of Metamorphic Geology*, **20** (1): 175-190.
- Nabelek, P.** (1997). Quartz-sillimanite leucosomes in high-grade schists, Black Hills, South Dakota: a perspective on the mobility of Al in high-grade metamorphic rocks. *Geology*, **25** (11): (995-998).
- Okayuma-Kusunose, Y.** (1994). Phase relations in andalusite-sillimanite type Fe-rich metapelites; Tono contact metamorphic aureole, Northeast Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, **12** (2): 153-168.
- Putlitz, B., Valley, J.W., Matthews, A. & Katzir, Y.** (2002). Oxygen isotope thermometry of quartz-Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> veins in high-grade metamorphic rocks on Naxos island (Greece). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **143** (3): 350-359.
- Restrepo-Pace, P.A. & Cediél, F.** (2010). Northern South America basement tectonics and implications for paleocontinental reconstructions of the Americas. *Journal of South American Earth Sciences*, **29**: 764-771.
- Royero, J. & Clavijo, J.** (1994). Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1: 400.000. Informe INGEOMINAS, 92p.
- Ryan, N.A.** (2010). Microstructures of a deformed kyanite-quartz vein of the Raft River Mountains in northwest Utah, USA. Undergraduate Thesis of Bachelor of Arts, Carleton College, Northfield, Minnesota.
- Sepahi, A.A., Whitney, D.L. & Baharifar, A.A.** (2004). Petrogenesis of andalusite-kyanite-sillimanite veins and host rocks, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Hamadan, Iran. *Journal of Metamorphic Geology*, **22** (2): 119-134.
- Silva, J.C., Sial, A.N., Ferreira, V.P. & Estrada, J.J.** (2004). C-isotope stratigraphy of a Vendian carbonate succession in northwestern Andes: Implications for the NW Andes. In: IV Reunión Ciencias de la Tierra, Querétaro (México), Abstracts, vol. 198.

- Spear, J.A.** (1982). Metamorphism of pelitic rocks of the Snyder Group in the contact aureole of the Kiglapait layered intrusion, Labrador: effect of buffering partial pressures of water. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **19** (10): 1888-1909.
- Stout, M.Z., Crawford, M.L. & Ghent, E.D.** (1986). Pressure-temperature evolution of fluid compositions of  $Al_2SiO_5$ -bearing rocks, Mica Creek, B.C. in light of fluid inclusion data and mineral equilibrium. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **92** (2): 236-247.
- Thompson, A.B.** (1975). Calc-silicate diffusion zones between marble and pelitic schist. *Journal of Petrology*, **16** (1): 314-346.
- Van der Lilej, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M. & Mora, A.** (2016). Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rheic and Pacific Oceans. *Gondwana Research*, **31**: 271-294.
- Verdes, G., Gout, R. & Castet, S.** (1992). Thermodynamic properties of the aluminate ion and of bayerite, boemite, diaspore, and gibbsite. *European Journal of Mineralogy*, **4** (4): 767-792.
- Ward, D.E., Goldsmith, R., Cruz, B.J., Jaramillo, C.L. & Vargas, L.R.** (1970). Mapa Geológico del Cuadrángulo H-13, Pamplona, Colombia. Ingeominas.
- Ward, D.E., Goldsmith, R., Cruz, B.J., Jaramillo, C.L. & Restrepo, H.** (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. U.S. Geological Survey e Ingeominas. *Boletín Geológico*, **XXI** (1-3): 1-132.
- Widmer, T. & Thompson, A.** (2001). Local origin of high pressure vein material in eclogite facies of the Zermatt-Saas Zone, Switzerland. *American Journal of Science*, **301** (7): 627-656.
- Whitney, D.L. & Dilek, Y.** (2000). Andalusite-sillimanite-quartz veins as indicators of low-pressure-high-temperature deformation during late-stage unroofing of a metamorphic core complex, Turkey. *Journal of Metamorphic Geology*, **18** (1): 59-66.
- Yardley, B.W.D.** (1975). On some quartz-plagioclase veins in the Connemara schists, Ireland. *Geological Magazine*, **112**: 183-190.
- Yardley, B.W.D., Leake, B.E. & Farrow, C.M.** (1980). The metamorphism of Fe-rich pelites from Connemara, Ireland. *Journal of Petrology*, **21** (2): (365-399).
- Yardley, B.W.D.** (1986). Fluid migration and veining in the Connemara Schists, Ireland. In J.V. Walther and B.J. Wood, Eds., *Fluid-rock Interactions During Metamorphism*: Springer-Verlag, New York p. 109-131.
- Yardley, B.W.D. & Bottrell, S.H.** (1992). Silica mobility and fluid movement during metamorphism of the Connemara schists, Ireland. *Journal of Metamorphic Geology*, **10** (3): 453-464. <http://www.sfu.ca/~marshall/sem/mineral.htm>. Mineral Energy Dispersive Spectra (EDS) Consulted on 15 September, 2014.

# Caldas y el gran cometa de 1807

J. Gregorio Portilla

Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias, Sede Bogotá, Universidad Nacional de Colombia

## Resumen

Se analizan las observaciones que realizó Francisco José de Caldas del gran cometa de 1807. A partir de distintas observaciones realizadas por astrónomos europeos, así como del conocimiento de los elementos orbitales del cometa, se calculó su trayectoria y se comparó con lo que observó Caldas, en particular, sobre su observación del 26 de septiembre de 1807, la que incluye coordenadas. Se discuten algunos aspectos tales como la forma como calculó las coordenadas del cometa así como la descripción morfológica del mismo. Se infiere la existencia de algún fenómeno atmosférico que dificultó, para Caldas, la observación adecuada de la cola del cometa. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Palabras clave:** Caldas, F. J.; Cometa; Gran cometa de 1807.

## Caldas and the great comet of 1807

### Abstract

Observations of the great comet of 1807 carried out by Francisco José de Caldas are analyzed. Starting from astronomical observations obtained by European astronomers as well as the knowledge of the orbital elements, the trajectory of the comet is calculated and then is compared with those reported by Caldas, in particular that of the 26 of september of 1807 which includes coordinates. Items such as how Caldas calculated the coordinates along with morphological description of the object is discussed. We infer the existence of some type of atmospheric phenomena which hindered, for Caldas, the ideal observation of the tail. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

**Key words:** Caldas, F. J.; Comet; Great comet of 1807.

## Introducción

Francisco José de Caldas (1768-1816), natural de Popayán, realizó estudios superiores en leyes entre 1788 y 1791 en el Colegio del Rosario de Santafé de Bogotá al cabo de los cuales obtuvo el título de Bachiller de Derecho y Filosofía. Probablemente por problemas de salud o insatisfacción, no continuó sus estudios, que le hubieran permitido conseguir el título de Licenciado y de Doctor en derecho y realizar una distinguida carrera como jurisconsulto. En su lugar optó por una vida de estudio en diversos aspectos de las ciencias naturales tales como astronomía, botánica, geografía, meteorología, etc. Dado el enorme resago que tenía el continente americano en materia científica con relación a Europa y, por ende, la ausencia total de programas académicos en tales tópicos (la mayoría de los cuales, en el país sólo vendrían a crearse casi siglo y medio después) la apropiación del conocimiento que hace Caldas de tales temas los hace de forma completamente autodidacta, asimilándolos de los libros que podía encargar y adquirir.

Algunas pistas sugieren que para 1792, esto es, inmediatamente después de sus estudios de derecho, y ya de regreso

en Popayán, estaba asimilando conocimientos astronómicos. Entre 1793 y 1794 ejerció en Popayán varias labores relacionadas con su profesión pero se ve obligado a suspenderlas debido a su delicado estado de salud. Se sabe que para mediados de 1795 trabaja como buhonero (vendedor de ropa itinerante) y que al año siguiente hace un viaje a Santafé cuyo propósito, a parte del comercial, es adquirir libros e instrumentos científicos.

Sus avances en asimilar conocimientos astronómicos son notables entre 1796 y 1798. Construye gnomones y cuartos de círculo para determinar latitudes así como observa eclipses de Luna y Sol como también emersiones y ocultaciones de los satélites de Júpiter para determinar longitudes. Su experticia es tal que, en 1801, Alexander Von Humboldt, en su paso por Popayán, alaba sus determinaciones de longitud. Enterado José Celestino Mutis de la existencia de Caldas, lo vincula a la Expedición Botánica y decide construir un observatorio astronómico en los terrenos anexos a la Casa de la Expedición.

### Correspondencia:

J. Gregorio Portilla, [jgportillab@unal.edu.co](mailto:jgportillab@unal.edu.co)

**Recibido:** 16 de enero de 2017

**Aceptado:** 16 de marzo de 2017

Para ese entonces Caldas está más inclinado a la botánica, la que cultiva con gran pasión. Para finales de 1805, a su regreso a Santafé y proveniente de la provincia de Quito, se le encarga la parte astronómica de la expedición —que él acepta un tanto a regañadientes (ver **Caldas**, 2016, carta 127, pág. 286)— para lo cual hará del observatorio su lugar exclusivo de trabajo.

Allí realiza observaciones astronómicas tendientes a determinar la posición geográfica de la edificación así como numerosas medidas meteorológicas. Su inclinación al periodismo científico y, luego, al periodismo político como también su acercamiento al grupo de criollos con propósitos emancipadores lo hace descuidar casi que por entero sus labores científicas. Las diferencias entre criollos por la manera de conducir al país y la intención de reconquista por parte del imperio español obligó a Caldas a practicar la ingeniería militar. Habiendo sido exitoso, en sus inicios, el proceso de reconquista, Caldas es capturado y fusilado a finales de 1816.

La historiografía ordinaria se refiere a Caldas como astrónomo, botánico, meteorólogo, geógrafo, periodista e ingeniero militar. Es lugar común que tales actividades las realizó con tal ahínco y profundidad que era inevitable agregarle a la postre el mote de “sabio”. Sin embargo, si se examinan con cuidado sus trabajos científicos publicados se encuentra que, en lo que se refiere a la astronomía, no hay ningún artículo o escrito que se dedique por entero a tal área del conocimiento. Varias memorias que, se sabe por sus cartas, redactó o estaba en proceso de culminar sobre aspectos netamente astronómicos, no lograron sobrevivir a los tumultuosos sucesos de las guerras de independencia o, cuanto menos, se encuentran perdidas. Además se infiere, por el poco material que sobrevivió, que sus conocimientos astronómicos eran básicos y que, a causa de su escaso dominio de las matemáticas, sus conocimientos de la mecánica celeste (para la época, el área de la astronomía que se encontraba en un notable desarrollo) eran, a lo sumo, rudimentarios.

El asunto de fondo es que Caldas no veía con buenos ojos la práctica de la astronomía *per se*, esto es, el estudio de los cuerpos que integran el universo con propósitos de conocer su origen, evolución, constitución, movimiento, etc. En su lugar, Caldas contempla la astronomía como una herramienta subsidiaria de la geografía (modernamente diríamos tanto de la geodesia como de la topografía). Una muestra clara de esa visión es esta: “*Observar el cielo por observarlo, sería una ocupación honesta; pero no pasaría de una curiosidad estéril que llenase los momentos del hombre ocioso y acomodado. Este observador sería inútil, y la Patria lo miraría como un consumidor de quien no esperaba nada. Nosotros no queremos representar este papel en la sociedad: queremos que nuestros trabajos astronómicos mejoren nuestra geografía, nuestros caminos y nuestro Comercio*” (**Caldas**, 1966, p. 183).

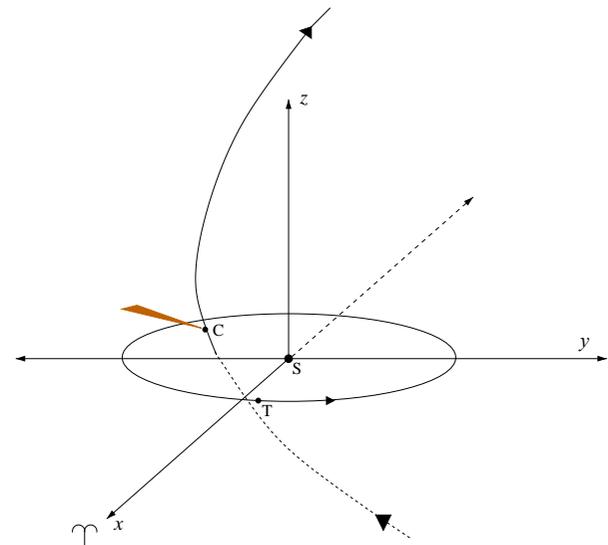
Y esa visión utilitarista de la astronomía se ve reflejada en casi todos los trabajos en los que Caldas aborda la observación de un cuerpo celeste. Los eclipses de Luna y de

Sol, las inmersiones y emergencias de los satélites del planeta Júpiter, los pasos del Sol y de estrellas por el meridiano del observador y el paso de Mercurio por en frente del disco solar tienen todos un común denominador: sirven para ubicar la posición geográfica del observador. Sólo se conoce una excepción: la observación, más o menos detallada, de un cuerpo celeste, la cual incluye la determinación de sus coordenadas celestes junto con la descripción morfológica del mismo. Tal objeto es el gran cometa de 1807.

El propósito de esta comunicación es, entonces, estudiar la observación que realizó Caldas del gran cometa de 1807 para que, de ese modo, se puedan inferir algunos aspectos de la experticia de Caldas en astronomía. En la primera sección describimos el descubrimiento y lo que conocemos de tal cometa; en la segunda se exponen las observaciones de Caldas; en la tercera sección se discuten las mismas y, finalmente, la última sección contiene las conclusiones.

### El cometa C/1807 R1

Este cometa comenzó a ser observado en Europa en la segunda semana de septiembre de 1807. Se atribuye la primera detección del objeto, el 9 de septiembre, a un monje de nombre Parisi (**Russell**, 1852) ubicado en la población siciliana de Castrogiovanni (actual Enna). Por su trayectoria, debió ser observado con anterioridad por numerosas personas situadas en el hemisferio sur (ver figura 1) pero no se han hallado registros al respecto. Parisi se le adelantó por casi dos semanas al gran astrónomo francés Jean-Louis Pons, quien lo observó el día 21. Pons, como se sabe, llegó a convertirse en el mayor descubridor de cometas de todos los tiempos (**Hockey**, 2007).



**Figura 1.** Posiciones del cometa (C) y de la Tierra (T) con respecto al Sol (S) en un sistema de coordenadas rectangular eclíptico heliocéntrico donde el eje  $x$  apunta hacia el punto vernal ( $\gamma$ ) y el plano  $xy$  es la eclíptica. Específicamente se muestran las posiciones relativas del cometa C/1807 R1 y la Tierra para el día 26 de septiembre de 1807. La curva muestra la trayectoria del cometa, segmentada (antes de pasar por la eclíptica) y continua (cuando la atravesó).

Ese mismo día se reportaron observaciones hechas por Seth Pease desde los Estados Unidos así como de J. C. Thulis en Francia. El siguiente reporte se realizó cinco días después por parte de un profesor de matemáticas en la población de Vesoul, en Francia quien lo observó el 26.8 de septiembre; el día siguiente lo observaron también en Francia J. Vidal y H. Flaugergues. H. Pigott lo observó en Inglaterra el 28; H.S. Huth en Alemania el día siguiente y tanto Eule como González lo observaron desde Alemania y España, respectivamente, el día 30 (Kronk, 2003).

La órbita del cometa fue determinada por Bessel con base en cerca de 70 observaciones comprendidas entre el 22 de noviembre de 1807 y el 27 de marzo de 1808. En un principio asumió trayectoria parabólica, como era lo rutinario para las órbitas cometarias, pero la trayectoria resultante no satisfizo algunos puntos observacionales; al asumir órbita elíptica, tener en cuenta las perturbaciones de los planetas y aplicar el método de los mínimos cuadrados, recientemente inventado por Gauss, Bessel logró satisfacer todos los puntos observacionales. Esto es significativo, pues de ese modo el C/1807 R1 se convirtió en el segundo cometa, después del célebre cometa de Halley, que se demostró que era periódico. Los elementos orbitales del objeto, reportados por Bessel, se encuentran en la Tabla 1 (Kronk, 2003).

**Tabla 1.** Elementos orbitales del cometa C/1807 R1 determinados por Friedrich Bessel asumiendo órbita elíptica. Las coordenadas angulares están referidas al equinoccio medio y eclíptica del 2000.0.

Elemento	Valor
Distancia pericéntrica ( $q$ )	0.646124 (u.a.)
Excentricidad ( $e$ )	0.995488
Inclinación ( $i$ )	63.1762°
Longitud del nodo ascendente ( $\Omega$ )	269.4837°
Argumento de lat. del pericentro ( $\omega$ )	4.0970°
Tiempo del paso por el pericentro ( $t_0$ )	19.2389 sep. 1807

El semieje mayor  $a$  del cometa en unidades astronómicas (u.a.) es, entonces:

$$a = \frac{q}{1 - e} = 143.2012 \text{ u.a.},$$

y el periodo sideral  $T$  dado por:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{GM_\odot}} a^{3/2} \approx 1713 \text{ años},$$

siendo  $\sqrt{GM_\odot} = 0.01721 \text{ u.a.}^{3/2} \text{ d}^{-1}$ , donde  $G$  es la constante de Cavendish ( $G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ) y  $M_\odot$  es la masa del Sol ( $1.998 \times 10^{30} \text{ kg}$ ).

Por lo tanto, el cometa es de largo periodo y sólo retornará al sistema solar interior hasta alrededores del año 3520.

En cuanto a la morfología que presentaba el cometa, vale la pena mencionar la que aportó el astrónomo alemán Johann

Sigismund Huth quien, como ya se dijo, detectó el cometa el 29 de septiembre. Él registró que la cola del cometa “*estaba situada casi en la dirección del ecuador... En el reflector el cuerpo del cometa aparecía como una bola perfecta del tamaño de Júpiter con solo una ligera coma*”. También comentó que la cola estaba agudamente definida cerca de la coma, pero rápidamente difuminada y era sólo de unos 5° de largo con un ancho de unos 0.5° en su extremo (Kronk, 2003).

El cometa pudo seguir observándose a simple vista durante los meses de octubre y noviembre y algunos observadores alcanzaron a verlo sin ayuda de instrumentos ópticos hasta mediados del mes de diciembre. Huth reportó que a comienzos del mes de octubre la cola se dividió en dos componentes: una, de forma recta, con un largo de unos 6° y la otra curvada no tan larga como la primera. Otro astrónomo alemán, Heinrich Olbers, notó, para la tercera semana de octubre, que la componente recta llegó a alcanzar 10° mientras que la componente curvada era más corta, ancha y brillante con una longitud de unos 4.5°.

### Caldas observa el cometa

Sólo se conocen tres fuentes en las que se menciona que Caldas observó el cometa C/1807 R1. La primera es el “número cero” del *Semanario del Nuevo Reyno de Granada* en la que el editor da a conocer la “interesante y curiosa” noticia de la aparición del cometa en los cielos vespertinos de la ciudad. En tal emisión, y previo a esta noticia, el editor solicita el permiso formal para la impresión del *Semanario* y describe los temas y contenidos que tendrá tal revista. La elaboración aparece con fecha del 4 de octubre de 1807. Pero, tan solo hasta el 3 de enero del siguiente año aparecería publicado el primer número del *Semanario* con un trabajo de Caldas titulado “Estado de la Geografía del Virreinato de Santafé de Bogotá con relación a la economía y al comercio” (ver anexo 1 de Nieto (2007)).

El “número cero” es relativamente poco conocido siendo incluido en trabajos que, supuestamente, tienen por objeto dar a conocer el contenido total de los artículos del *Semanario* (Caldas, 1942) o sus obras completas (Caldas, 1966). Transcribimos a continuación la noticia del cometa tal y como apareció (con las modificaciones ortográficas pertinentes):

*Pareciéndole al Editor interesante y curiosa la siguiente noticia, ha querido publicarla antes de dar principio a su Semanario.*

*Desde el 23 de setiembre se advirtió al fin de la constelación de la Virgen un cometa, y se comenzó a observar el 25 en el Observatorio astronómico de esta Capital. El encargado de este establecimiento D. Francisco Joseph de Caldas ha comenzado una serie de observaciones, y el 26 fijó el lugar del nuevo astro para 6 hor. 37 min. 17 seg. tiempo verdadero del meridiano del Observatorio: el resultado fue*

*Declinación austral..... 1 grad. 53 min. 12 seg.  
Ascensión recta..... 217 grad. 57 min. 00 seg.  
Longitud geocént..... 7 sig. 6 grad 19 min. 59 seg.  
Latitud boreal..... 12 grad. 25 min. 25 seg.*

*El cuerpo del cometa pareció bastante terminado, y del diámetro de Marte poco más o menos. Su luz era rojiza, débil, y como dentro de nieblas. El núcleo estaba rodeado de una atmósfera luminosa prolongada en abanico hacia la parte opuesta al Sol, y cuya fuerza disminuía por grados insensibles hasta desaparecer. Esta ráfaga de luz, que puede llamarse barba por preceder al cometa en su curso era oblicua, y seguía la dirección de la Eclíptica; en fin su longitud pareció de 38 a 40 minutos.*

*Las observaciones que se han hecho, y que siguen haciéndose en el Observatorio, nos enseñarán el curso, distancia, órbita, etc. de este bello cometa. D. Francisco Joseph de Caldas se propone seguirle hasta su desaparición, e informar al público del resultado de sus trabajos. Mucho ha sentido este observador no haberlo advertido antes pero procurará llenar este vacío con las numerosas observaciones que actualmente ejecuta<sup>1</sup>.*

La segunda fuente la constituye una de sus cartas dirigidas a Santiago Arroyo. Éste vivía para la época en Popayán y se constituyó, para Caldas, en su confidente científico y personal más cercano. En carta del 6 de noviembre de 1807, Caldas le escribe, entre otras cosas:

*... Es verdad que este astro ha llenado mis momentos ha más de un mes, y creo no le dejaré hasta su total desaparición. El tiempo falta para calcular todos lo elementos de mis observaciones; pero las verá con el tiempo. Desde su aparición ha disminuido constantemente de diámetro y de luz. La cola que estaba en la inclinación de la eclíptica el 23 de septiembre, está hoy al contrario y vuelta al Norte. El abanico que formaba se ha dilatado más; esta es la forma que hoy tiene. Su curso es bien caprichoso; se vio en Virgo, cortó el ecuador entre el 28 y 29 de septiembre, pasó al Monte Menelao, tocó en la cabeza del Serpentario, y está ahora sobre el dorso de Hércules. Quién sabe dónde desaparecerá!... (carta 115, pág. 264, de Caldas (1978)<sup>2</sup>).*

Una corta mención del cometa está contenida en la carta del 6 de febrero de 1808, también dirigida a Santiago Arroyo, en la que menciona que:

*... Mi cabeza padeció con el cometa y ya estoy restableciéndome... (carta 120, pág. 279 de Caldas, 2016).*

La tercera fuente la constituye el número 32 del *Redactor Americano del Nuevo Reyno de Granada*<sup>3</sup> con fecha del 19 de marzo de 1808. Para ese entonces, y como ya vimos, el cometa ya había desaparecido por completo y había dejado de ser noticia. Sin embargo, el editor consideró incluirlo como novedad en razón a que ya disponía de información proveniente del extranjero con relación al cometa. La nota comprende dos partes. La primera consiste en reproducir, al pie de la letra, la nota ya publicada en el “número cero” del *Semanario* con excepción tanto de la nota introductoria como

del último párrafo; sin embargo, no se alude a que tal texto ya había aparecido en otro periódico ni contiene información adicional de las observaciones que realizó Caldas. La segunda parte contiene noticias de observación del cometa en observatorios europeos, pero se da a entender que tal comunicación es una publicación proveniente de Filadelfia con fecha del 29 de diciembre de 1807. Como pie de página hay un dato interesante por parte del redactor: *me consta que sin instrumento alguno, y sólo con la simple vista lo percibió desde el diez de septiembre un sujeto de esta ciudad de Santafé, y también otro en la de Cartagena, según carta remitida de allí.*

## Discusión

Si bien es cierto que Caldas no es el primero en reportar la observación de un cometa desde el virreinato de la Nueva Granada (véase Moreno (2005) para una descripción de observaciones anteriores), sí es el primero en reportar las coordenadas de un cometa para un instante de tiempo dado lo suficientemente precisas como para ser tenidas en cuenta en un proceso de determinación orbital tal y como se hacía a inicios del siglo XIX.

Lamentablemente, y en contradicción con lo que prometió tanto a sus lectores en el “número cero” del *Semanario* como con Arroyo, Caldas nunca publicó, comunicó o hizo mención del cúmulo de observaciones subsecuentes que realizó del cometa C/1807 R1 a lo largo de septiembre hasta, probablemente, noviembre de 1807. Algo parecido a un diario o libreta de apuntes donde anotó tales observaciones no se ha encontrado y lo más probable es que haya desaparecido para siempre. De modo tal que, para una discusión rigurosa de sus observaciones, sólo contamos con las coordenadas arriba registradas.

Comparando la información contenida en ambas fuentes se evidencia que Caldas, en efecto, comienza a observar el cometa a partir del 23 de septiembre (desde quien sabe qué lugar); sin embargo, se deduce que sólo desde el 25 de septiembre Caldas lo comienza a observar propiamente desde el Observatorio y que sólo hasta el día siguiente (26), contando con la instrumentación adecuada, puede determinar su ubicación mediante coordenadas ecuatoriales. Coincidentalmente, ese día (o más exactamente el 26.81 TU) es cuando el cometa estuvo más cerca de la Tierra a una distancia de 1.1533 u.a. Por la fecha de observación se infiere que Caldas merece ser incluido entre los primeros observadores de dicho cometa, al igual que se constituye en el más meridional de todos los observadores que registró sus coordenadas.

El cometa era visible desde Santafé unos 20 a 30 minutos después de la puesta de Sol desde los primeros días de septiembre (contando con las propicias condiciones climatológicas). De haber existido alguien a la alerta, una especie

<sup>1</sup><http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/historia/semanario/indice.htm> (accesado el 5 de diciembre de 2016).

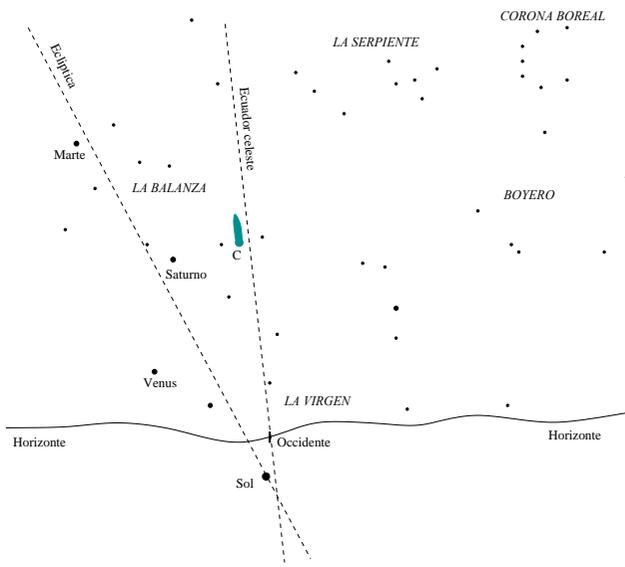
<sup>2</sup>Para esta carta no se ha referenciado el libro más actualizado (Caldas, 2016) en razón de que tal versión presenta, en dicha carta, algunos errores de digitación que cambian ligeramente el sentido de la misma.

<sup>3</sup><http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/hemeroteca-digital-historica/el-redactor-americano-periodico-del-nuevo-reyno-de-granada> (accesado el 5 de diciembre de 2016).

de “centinela del cielo” (que Caldas no lo era), era bien posible distinguirlo desde Santafé en tales fechas muy cerca del horizonte occidental. Recuérdese que alguien alcanzó a observarlo desde Santafé desde el 10 de septiembre, apenas un día después de la primera observación reportada por alguien en el mundo. Agravando el asunto, todo parece indicar que la sociedad santafereña de ese tiempo no es que fuera muy proclive a la observación del cielo. El conocido diario que llevaba **Caballero** (1946) de comienzos del siglo XIX, en el que registraba diversidad de aspectos de la sociedad de su tiempo (incluyendo la anotación de algunos fenómenos naturales) no se refiere para nada en absoluto al cometa.

Caldas establece el tiempo de la observación del 26 de septiembre en tiempo solar verdadero, que corresponde al ángulo horario del Sol en ese instante, esto es,  $H_{\odot} = 6^h 37^m 17^s$ . Con ayuda de un programa de computador hemos reproducido el cielo en esa noche<sup>4</sup>. Se reprodujo la bóveda celeste tal y como estaba para un observador ubicado en unas coordenadas de latitud y longitud, respectivamente, de  $\phi = 4^{\circ} 35' 46''$  y  $\lambda = 74^{\circ} 04' 39''$  (coordenadas del el Observatorio respecto al elipsoide WGS84) de modo tal que el Sol tuviese un valor de ángulo horario de  $6^h 37^m 17^s$ . La ascensión recta del Sol (referida al equinoccio y eclíptica media de la fecha) era de  $\alpha_{\odot} = 12^h 10^m 43^s$  de lo que se infiere inmediatamente que el tiempo sidereal local era igual a  $H_{\gamma} = 18^h 48^m 0^s$ . Para tal fecha la ecuación del tiempo es de  $8^m 36^s$ , así que el tiempo solar medio, para el meridiano del Observatorio Astronómico, fue de  $18^h 28^m 41^s$ . Una descripción de una porción de la esfera celeste como se veía para un observador en Bogotá puede verse en la figura 2.

Es curioso que Caldas, al ubicar las coordenadas del cometa, haya hecho la observación aun cuando el cielo no estaba ennegrecido por completo, pues en ese instante apenas el Sol tenía una altura de  $-9^{\circ} 23'$ . Para el instante en cuestión las coordenadas horizontales (azimut y altura) del cometa eran:  $A \approx 265^{\circ} 39'$ ,  $h \approx 25^{\circ} 33'$ , lo que quiere decir que el cometa aun estaba lo suficientemente alto sobre el horizonte como para ser observado adecuadamente al menos por otros 45 minutos. Probablemente Caldas consideró que más tarde se podría malograr la observación. Ignoramos el tipo de instrumentación con la que hizo la observación pero, probablemente, fue un refractor pequeño de la casa Dollond que, se sabe, habían al menos dos en el Observatorio por aquellos años. Caldas debió contrastar la observación con respecto a un atlas celeste para que, de ese modo, estimara las coordenadas ecuatoriales. Ignoramos cual atlas pudo haber sido. En los varios inventarios de la biblioteca de Caldas que se encuentran en **Hernández de Alba** (1986) (y un tanto más simplificado en **Díaz** (1997)) no aparecen registrados atlas celestes, lo que dice muy poco en realidad, ya que Caldas pudo llevarlos consigo cuando salió de Santafé o fueron sujetos a la destrucción o al robo cuando ingresaron violentamente las tropas de Bolívar al Observatorio en la toma de la ciudad en diciembre de 1814.



**Figura 2.** Posición del cometa (C) en el horizonte occidental para un observador ubicado en Santafé de Bogotá a las  $18^h 28^m 41^s$  (tiempo solar medio referido al meridiano del Observatorio Astronómico) del día 26 de septiembre de 1807. El horizonte, que se ha descrito como una curva continua ondulada, no representa el horizonte real.

Pero tales cartas celestes bien pudieron haber sido o el atlas celeste de Flamsteed (**Fortin**, 1776) o el Uranographia de **Bode** (1801) o incluso ambos. Humboldt, en su estadía en Quito, le recomendó a Caldas la adquisición del primero (ver pág. 259 de **Díaz** (1997)) y es muy posible que así lo hiciera. Y, de haber sido el Uranographia, Caldas contaba entonces con uno de los mejores atlas con que los astrónomos podían disponer en aquel tiempo.

En la tabla 2 están registradas, en notación moderna, las coordenadas ecuatoriales y eclípticas que dedujo Caldas cuando ubicó la posición del cometa en sus cartas. Simplemente como aclaración, la longitud eclíptica, como la reportó Caldas en el “número cero” del *Semanario*, aparece, como ya vimos, como: 7 sig. 6 grad 19 min. 59 seg. Quiere decir que el cometa se encontraba a una longitud de  $7 \times 30^{\circ} + 6^{\circ} 19' 59'' = 216^{\circ} 19' 59''$  ya que cada signo zodiacal (contado a partir del punto vernal y sobre la eclíptica) se asumía con una extensión de  $30^{\circ}$ .

Algo que puede desprenderse de los valores que calculó Caldas es que, al ser extraídas de las cuadrículas de un atlas (como cualquiera de los dos citados arriba) no pueden aparecer al segundo de arco (como lo escribe Caldas) pues no es posible derivar las coordenadas a ese nivel de detalle a partir de las mismas; si acaso, a fracción de minuto de arco. Adicionalmente, todo parece indicar que tanto el par ecuatorial (ascensión recta ( $\alpha$ ), declinación ( $\delta$ )) como el par eclíptico (longitud eclíptica ( $\lambda$ ), latitud eclíptica ( $\beta$ )) los dedujo cada uno por aparte. Tal procedimiento se puede hacer sin mayor

<sup>4</sup>Se ha utilizado, para tal efecto, el programa Voyager 4 de la empresa Carina Software.

inconveniente, dado que los atlas en aquellos años disponían de cuadrículas apropiadas tanto sobre el ecuador celeste como sobre la eclíptica.

**Tabla 2.** Coordenadas ecuatoriales y eclípticas reportadas por F. J. Caldas en el instante 6 hor. 37 min. 17 seg. tiempo verdadero del meridiano del Observatorio del 26 de septiembre de 1807.

Coordenadas	Valor
$\delta$	$-01^{\circ}53'12''$
$\alpha$	$14^h31^m48^s$
$\lambda$	$216^{\circ}19'59''$
$\beta$	$12^{\circ}25'25''$

Ello explica porque, desde el punto de vista de alguien familiarizado con la astronomía de posición, los valores de la tabla 2 difieren, digamos, de las coordenadas eclípticas que se podrían calcular a partir de las coordenadas ecuatoriales<sup>5</sup> o al revés. Como es bien sabido, bastaría con extraer un solo par coordenado a partir del atlas y calcular, con las ecuaciones de la trigonometría esférica, el otro par. Pero Caldas opta por no hacerlo así lo que a la postre genera valores que no son equivalentes. A manera de ejemplo, si se desea calcular la longitud eclíptica a partir de los valores de ascensión recta y la declinación dados por Caldas y utilizar la expresión (Portilla, 2009):

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \delta \sin \varepsilon + \cos \delta \cos \varepsilon \sin \alpha}{\cos \alpha \cos \delta} \right),$$

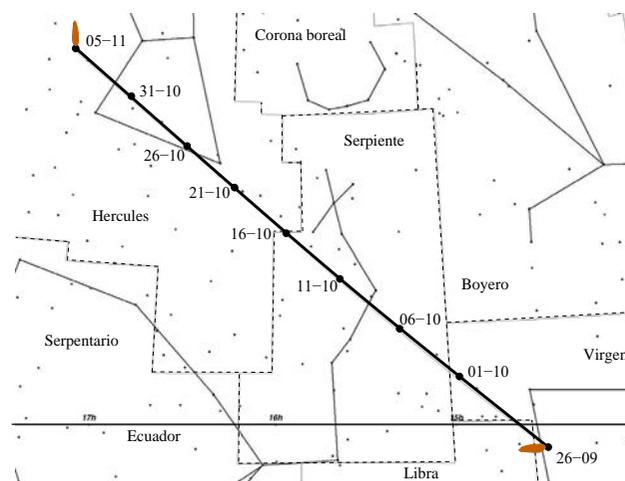
es preciso, para tener el valor de  $\lambda$  que reporta Caldas, utilizar un valor de  $\varepsilon = 22^{\circ}43'45''$ , el cual es demasiado bajo. En cambio, si se utiliza el valor de  $\varepsilon = 23^{\circ}27'53''$  se obtiene un valor de  $\lambda = 216^{\circ}12'18''$ , el cual es unos  $7.5'$  más bajo que el que obtiene Caldas.

Al dejar al margen aspectos tales como la incertidumbre en el uso apropiado de las escalas de tiempo así como el desconocimiento de la fecha del equinoccio de referencia del atlas que usó Caldas, al introducir los elementos orbitales del cometa contenidos en la tabla 1 en el programa Voyager 4 y reproducir las coordenadas ecuatoriales del objeto correspondientes al instante 6 hor. 37 min. 17 seg. del 26 de septiembre de 1807 de tiempo verdadero del meridiano del Observatorio, tal programa arroja lo siguiente:  $\alpha = 14^h31'21''$ ,  $\delta = -01^{\circ}55'38''$  (equinoccio instantáneo de la fecha), lo que indica un error cercano a los 6 minutos de arco en ascensión recta y menos de dos minutos en declinación.

Con relación a la información contenida en la carta del 6 de noviembre dirigida a Arroyo, lo que narra Caldas sobre la ubicación del cometa a finales de septiembre y hasta el 6 de noviembre se corresponde con los hechos. En efecto, es posible constatar a través del programa Voyager 4 que la cola del cometa, para la noche del 23 de septiembre, tiene un ángulo

pequeño con relación a la dirección de la eclíptica (asumiendo que la cola está en una dirección opuesta al Sol). El paso por el ecuador celeste se verificó el 28 de septiembre, aproximadamente a las  $18^h23^m$  tiempo local medio con relación al meridiano del Observatorio. Para inicios del mes de octubre, el cometa comienza a aumentar en declinación. El comentario de que pasó por el “Monte Menelao” se explica en razón a que algunos autores entendían como una pequeña constelación con tal nombre a un sector en lo que modernamente constituyen regiones de la constelación del Boyero y la Serpiente; con el tiempo dicha constelación pasó a desuso. El hecho de que el Uranographia registre tal constelación<sup>6</sup> apoya la tesis de que Caldas contara con uno de tales ejemplares. En la figura 3 se puede observar la trayectoria del cometa calculada por el programa Voyager 4 entre las fechas que comentó Caldas en su carta del 6 de noviembre a Arroyo.

Si hemos de creer en el testimonio de Caldas, y nada nos hace pensar de lo contrario, él terminó reuniendo un número importante de observaciones astronómicas del cometa entre finales de septiembre y al menos hasta inicios de noviembre; ello le demandó un gran esfuerzo que incluso llegó a pagar con detrimento de su salud. Sin embargo, tenemos serias dudas de que Caldas hubiese tenido los conocimientos necesarios para determinar la órbita del cometa. Nada en los escritos que le sobreviven indican un dominio de la mecánica celeste que le hubieran permitido obtener los parámetros orbitales y, de ese modo, conocer la forma de la órbita. Lo cierto es que cuando tuvo a su entera disposición el *Semanario* (a inicios de 1809) y bien podía escribir allí lo que quisiera, nunca publicó el resultado de tales observaciones.



**Figura 3.** Trayectoria del cometa C/1807 R1 (curva en negrilla) desde el 26 de septiembre hasta el 5 de noviembre de 1807. Solo se muestra la dirección de la cola (opuesta al Sol) en tales fechas extremas. Los límites de las constelaciones son los actualmente utilizados. La longitud asignada para la cola es sólo por propósitos ilustrativos y no reflejan la verdadera magnitud reportada por algunos observadores europeos.

<sup>5</sup>Tomando un valor específico de la oblicuidad de la eclíptica, que para 1807 era de  $\varepsilon = 23^{\circ}27'53''$  (Farrar, 1827.).

<sup>6</sup>El atlas de Flamsteed no la registra.

El hecho de que en el “número cero” del *Semanario* haya prometido a sus lectores nuevas observaciones así como el conocimiento de la órbita sugiere que tales palabras son más bien una reacción precipitada y emotiva frente a su descuido en no haber sido el primero en advertir el cometa. Solo de ese modo se explica que Caldas, a manera de ofrecimiento de disculpas, mencione que “*mucho ha sentido no haberlo advertido antes pero procurará llenar este vacío con las numerosas observaciones que actualmente ejecuta*”. Para una persona quien era conocida en la ciudad como “*el astrónomo*” (ver, por ejemplo, la carta 151, pág. 322 de **Caldas**, 2016) y dado que era bien consciente de que habían santafereños que lo veían con recelo y envidia (ver carta 107, pág. 263 de **Caldas**, 2016), pensó que la promesa de un enorme cúmulo de observaciones en el futuro era la mejor manera de resarcirse, al menos hasta que, como es lo usual, las cosas pasaran al olvido.

En cuanto a la forma del cometa, Caldas comenta que su diámetro es del de “Marte poco más o menos”. Probablemente le pareció que en brillo fueran semejantes ya que la magnitud del planeta rojo era en ese momento de 1.2 y observadores en Europa estimaron la magnitud del cometa para finales de septiembre entre 1 y 2. Caldas observa que el cuerpo del cometa pareció bastante terminado, lo que está de acuerdo con la observación de varios astrónomos europeos. Por lo demás, Caldas menciona, en el “número cero” del *Semanario*, el reporte usual típico de un cometa, describiendo su coma y la cola (aunque no utilizó tales términos) la que describe en dirección hacia la eclíptica y contraria a la del Sol. A la cola del cometa la describe como una “ráfaga de luz, que puede llamarse barba por preceder al cometa en su curso”. Quiere decir con ello que la cola del cometa está en una dirección tal que va precediendo (aunque no exactamente) el camino que va describiendo sobre la bóveda celeste.

A manera de paréntesis, sería además interesante examinar el original de la carta dirigida a Arroyo del 6 de noviembre. Las palabras: “El abanico que formaba se ha dilatado más; esta es la forma que hoy tiene.” hacen pensar que en la margen de las mismas se encuentre un dibujo que describa la forma de la cola y que en las obras que han reproducido las cartas conocidas de Caldas no lo han incluido. También es posible que lo que quiso decir es que la forma de la cola era en “abanico”.

Ahora bien, lo que no se entiende bien es el valor que Caldas asigna a la longitud de la cola: de 38 a 40 minutos ( $\sim 0.7^\circ$ ). Bien es cierto que en ese “número cero” no utiliza el término cola como tal, pues en su lugar utiliza “atmósfera luminosa prolongada en abanico” así como también “ráfaga de luz” y “barba”. Tampoco utiliza el término “coma”. Pero, si se refiere a ésta, sería un valor desproporcionadamente alto para su tamaño. Así que lo más probable es que se refiera, en efecto, a la cola. Pero, entonces, cabe la pregunta: ¿por qué asignó un tamaño tan corto a la extensión de la cola? Se sabe que para finales del mes de septiembre varios observadores europeos estimaron una longitud de la cola que es unas diez

veces más grande que lo que reporta Caldas. Como sólo se dispone de ese dato observacional del 26 de septiembre y, como comentamos atrás, tal observación se hizo todavía con luz crepuscular, se infiere que es posible que tuviera dificultades en observar adecuadamente la verdadera longitud del cometa por falta de contraste. Si esto es cierto, se deduce que no pudo observar el cometa pocos minutos después, pues eso le hubiera permitido observar la verdadera longitud de la cola. Por demás, la falta de contraste no pudo deberse a la luz proveniente de la Luna, ya que para el momento en cuestión ésta se encontraba por debajo del horizonte con una altura cercana a los  $-60^\circ$ .

El reporte que hace Caldas de una cola tan corta para el cometa es inusual. Eso, aunado a que el objeto sólo se percibiera en Santafé hasta el 23 de septiembre (exceptuando la observación que se reportó el 10 de septiembre) cuando, al menos teóricamente, era posible observarlo desde varios días antes, sugiere algún tipo de dificultad en la observación, al menos hacia el horizonte occidental. Los observadores en Europa en esa última semana de septiembre atestiguan una observación de la cola del cometa que, por su extensión y tamaño, muy difícilmente podía pasar desapercibida.

Igualmente dicente es que Caldas, en su carta a Arroyo, en la que sí habla de “cola” propiamente, no menciona la división de la misma en dos. Eso, como vimos, comenzó a observarse en Europa desde inicios del mes de octubre; pero Caldas, que desde finales del mes de septiembre lo observó —presumiblemente— de forma continua hasta al menos el 6 de noviembre, no comenta nada en absoluto con relación a tal hecho. De haber Caldas observado tal fenómeno, por su espectacularidad y relativa rareza, muy difícilmente lo hubiera dejado pasar por alto en comunicación con su amigo.

Todos estos detalles implican dificultad en la observación de la cola en todo su esplendor, lo que puede sugerir la ocurrencia de algún fenómeno que estaba sucediendo en el cielo en los atardeceres santafereños que estorbaba e impedía la adecuada observación del objeto. Algo semejante a una nube de polvo (aerosol estratosférico), bruma recurrente o el humo proveniente de incendios forestales masivos.

La posibilidad de la existencia de una erupción volcánica que dé lugar a un brillo crepuscular (*twilight glow*) que dificulte la observación astronómica no puede descartarse dado que un fenómeno de tal naturaleza se dio en algún momento de diciembre de 1808 (**Guevara-Murua**, 2014). A tal suceso se le denomina la “erupción desconocida”, pues se ignora con exactitud cuando y en donde ocurrió. El mismo Caldas reportó en el *Semanario* (pág. 355 de **Caldas** (1966)) los efectos de esa supuesta erupción. En efecto, allí da a conocer la existencia, para mediados de diciembre de 1808, de una anomalía en la observación del Sol sobre el horizonte, principalmente en el poniente, consistente en una fuerte atenuación de la luz solar<sup>7</sup>; así mismo reportó la imposibilidad de observar estrellas de cuarta y quinta magnitud. Es posible que un fenómeno semejante, pero de menor intensidad, hubiese

<sup>7</sup>**Caballero** (1946) no registra nada de esto en su diario aunque se sabe, por el mismo Caldas, que causó no poca inquietud en unos cuantos santafereños.

tenido lugar unos quince meses antes, lo que podría explicar varios aspectos inusuales de la observación del cometa realizada por Caldas.

Una opción más probable es que aquello que impidió la observación adecuada del cometa sea el conjunto de nubes, al parecer perennes, que se formaban encima del lugar del Salto del Tequendama. Tal cascada está ubicada en el municipio de Soacha, Cundinamarca, y se forma por la caída abrupta de unos 150 metros del cauce del río Bogotá. El salto, ubicado a unos 24 km en línea recta del centro de Bogotá, posee un azimut, visto desde el Observatorio Astronómico, de unos 264°. Una fuente relata cómo era de intensa la formación de las nubes sobre el salto hace dos siglos. **Humboldt** (1982), que estuvo en Santafé en 1801, escribe que visto desde allí “*el punto donde está situado el salto se distingue claramente sobre el horizonte por las espesas nubes que lo cubren constantemente*” (pág. 52,a); y más adelante: “*Yo he visto cascadas más ricas en agua y sin embargo, nunca observé sobre ninguna un nubarrón tan permanente y espeso sobre el Tequendama*” (pág. 68,a).

Entre mediados de septiembre hasta mediados de octubre, las fechas más propicias para observar con mayor esplendor el cometa, el azimut del objeto, visto desde el Observatorio Astronómico, osciló desde un valor de 250° hasta 280°, esto es, una o dos decenas de grados alrededor del punto donde se ubica el Salto del Tequendama. Si existió, durante ese intervalo de tiempo, una acumulación de nubes sobre la región del salto, en particular del tipo cirrus a alturas superiores a los 6 km, para observadores en Santafé el espectáculo del cometa con su cola alargada resultaba particularmente atenuado. Lamentablemente, la no existencia de reportes de observadores en otras zonas del virreinato no permiten arrojar mayor luz sobre el asunto.

## Conclusiones

El reporte que hace Caldas del cometa C/1807 R1 así como una fijación de sus coordenadas celestes realizada el 26 de septiembre de 1807 bien merece ser incluido como uno de los primeros sobre la observación de ese objeto. Es evidente que el relativo desconocimiento del “número cero” del *Semanario* entre los historiadores y astrónomos colombianos de los dos siglos anteriores condujo a que referencias obligadas sobre historiografía cometaria tales como la de **Kronk** (2003) ignoren la observación de Caldas, la que, de paso, se constituye en el reporte más meridional de tal objeto.

La principal observación del cometa C/1807 R1 que realizó Caldas, la del día 26 de septiembre, la hizo todavía con luz crepuscular y coincidió con el momento de máximo acercamiento a la Tierra. Fijó, con relativamente buen tino, las coordenadas ecuatoriales en un atlas celeste. Pero lo hizo también, de forma independiente, con las coordenadas eclípticas. Sin embargo, no se molestó en verificar la equivalencia entre las coordenadas ecuatoriales y eclípticas. Se ignora si era consciente de que tal cálculo se podía hacer y si era de su dominio. Además expresó tales coordenadas al segundo

de arco, lo que no es posible hacerlo contando con los atlas de que disponía. En tal sentido, es muy posible que el atlas que usó haya sido el *Uranographia* de Bode.

El reporte que hace Caldas del desplazamiento del cometa sobre la bóveda celeste desde finales de septiembre hasta comienzos de noviembre es consistente con los elementos orbitales calculados por Bessel. En cuanto al reporte morfológico, se evidencia que Caldas no pudo observar la cola del cometa como lo vieron los astrónomos europeos. Para Caldas la cola tenía una longitud significativamente más corta y conservó su unidad. Esto sugiere la presencia de algún tipo de fenómeno que estorbó la observación. Aquí proponemos dos posibilidades: la primera es la presencia de un brillo crepuscular derivado de una erupción volcánica, lo que implica la existencia de una erupción de corta intensidad acaecida unos 15 meses antes de la denominada “erupción desconocida” de diciembre de 1808. La segunda, y más probable, es la existencia de nubes del tipo cirrus ubicadas a alturas superiores a los 6 km ubicadas sobre la región del Tequendama cuya presencia de nubes era muy notoria en tal zona dos siglos atrás. No puede descartarse, tampoco, la presencia de una bruma espesa presente en el periodo de tiempo de la observación del cometa.

## Agradecimientos

El autor agradece al historiador Iván Felipe Suárez, Director de la Casa Museo Caldas, quien llamó la atención del autor sobre la existencia del “número cero” del *Semanario*. Igualmente, el autor agradece los cometarios de un árbitro anónimo.

## Conflicto de intereses

El autor declara que no tiene ningún conflicto de intereses.

## Referencias

- Bode J. E.** (1801). *Uranographia Sive Astrorum Descriptio*, Berlín.
- Caballero J. M.** (1946). *Particularidades de Santafé*, Biblioteca Popular de Cultura Colombiana, Bogotá.
- Caldas F. J.** (1942). *Semanario del Nuevo Reino de Granada*, vol. 1, Biblioteca Popular de Cultura Colombiana, Bogotá.
- Caldas F. J.** (1966). *Obras Completas de Francisco José de Caldas*, Universidad Nacional de Colombia, Imprenta Nacional, Bogotá.
- Caldas F. J.** (1978). *Cartas de Caldas*, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales & Colciencias, Bogotá.
- Caldas F. J.** (2016). *Cartas de Caldas Ilustradas*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Asociación de Amigos de la Casa Museo Caldas y Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá.
- Díaz S.** (1997). *Nueva Aproximación a Francisco José de Caldas*, Academia Colombiana de Historia, Editora Guadalupe, Bogotá.
- Farrar J.** (1827). *An Elementary Treatise on Astronomy*, Hilliard Metcalf and Co., Cambridge.

- Fortin M. J.** (1776). Atlas Céleste de Flamstéed, Approuve par l'Académie Royale des Sciences, F. G. Deschamps, Paris.
- Guevara-Murua A., et al.** (2014). *Clim. Past.*, **10**, 1707.
- Hernández de Alba G.** (1986). Historia Documental de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada después de la muerte de su director Don José Celestino Mutis 1808-1952, Fundación Segunda Expedición Botánica, Editora Guadalupe, Bogotá.
- Hockey T.** (2007). *The Biographical Encyclopedia of Astronomers*, Springer, Nueva York.
- Humboldt A.** (1982). Alexander Von Humboldt en Colombia. Extractos de sus diarios, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales & Academia de Ciencias de la República Democrática Alemana, Publicismo y Ediciones, Bogotá.
- Kronk G.** (2003). *Cometography: A Catalog of Comets (Vol. 2: 1800-1899)*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Moreno F.** (2005). *El Astrolabio*, **5**, 18.
- Nieto M.** (2007). Orden natural y orden social: ciencia y política en el Semanario del Nuevo Reyno de Granada, Legis S. A., Bogotá.
- Portilla J. G.** (2009). *Elementos de Astronomía de Posición*, Editorial Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Russell J.** (1852). *The Comets: A Descriptive Treatise Upon These Bodies*, John W. Parker and Son, Londres.

## In Memoriam de un gran Maestro Jorge Martínez Collantes 1948-2017

El Maestro Jorge Martínez Collantes fue una figura paradigmática por su labor como docente e investigador, un profesor de quien siempre se recibieran enseñanzas académicas y consejos de vida personales muy valiosos.

El querido Maestro Jorge fue un hijo ejemplar de Pamplona, Norte de Santander y de ese amado pueblo recibió con todo honor y merecimiento la Medalla al Mérito en Grado Extraordinario.

El pasado lunes 5 de junio, el Maestro se nos adelantó en el camino de la vida cuando al perder su lucha contra una dura enfermedad, falleció en Bogotá acompañado permanentemente por Olga, su esposa, cómplice y amiga de toda la vida, como lo reconocen sus amigos más íntimos.

Como investigador, Jorge fue un modelo a seguir en la investigación interdisciplinaria, a la que aportó sus conocimientos en Estadística, los que le permitieron dominar no solo los misterios de la naturaleza en temas como el Cambio Climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos sino también en la identificación de las correlaciones existentes entre diferentes índices como salud y pobreza, en el modelo de medición de grupos de investigación de Colciencias y en la construcción de los índices de calidad vida, salud, riesgo y protección, así como en una propuesta metodológica para el análisis de la habitabilidad y la salud en Colombia.

Hace varios años conocí a aquel hombre bueno y bonachón, a quien algunos colegas del Departamento de Matemáticas de la Universidad Nacional nos habían recomendado para que nos asesorara con sus conocimientos en nuestro programa de investigación, el que tenía como, objetivo identificar el comportamiento de los parámetros del rayo que ya habíamos logrado compendiar.

Fue durante esta asesoría que lo oí hablar por primera vez sobre el modelamiento de series de tiempo con la metodología de Box-Jenkins, la que era aplicable tanto a los modelos auto-regresivos de media móvil (ARMA) como a los modelos auto regresivos integrados de media móvil (ARIMA), y que permitía encontrar el mejor ajuste de las series temporales bajo exploración, las que pretendían encontrar los pronósticos que fueran más acertados, campo de la Estadística que ganó importancia en las últimas décadas. Esta metodología radica en la multiplicidad de métodos desarrollados para analizar observaciones de variables con diversas estructuras de correlación, lo cual ha permitido repensar algunos procedimientos estadísticos que hacían caso omiso de tales estructuras y formular, en cambio, nuevos modelos capaces de recoger estas fuentes de variabilidad. Los conocimientos anteriores fueron luego utilizados en una tesis de Maestría para inferir resultados sobre la caracterización espacial y temporal de los parámetros del rayo y, posteriormente, también en una asesoría ofrecida a la Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia, siempre con la sabia asesoría de Jorge.

Jorge Martínez Collantes recibió su doctorado en Estadística de la Universidad de Temple, Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos, la M.Sc. en Estadística y la M.Sc. en Matemáticas de la misma Universidad. Su Licenciatura en Matemáticas la obtuvo de la Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá en.

Durante su vida como profesor, Jorge recibió varios reconocimientos por su labor académica:

- El Premio A la Excelencia Docente de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá
- La Medalla Juan Herkrath de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá
- La Medalla Al Mérito de la Universidad Nacional de Colombia



- El título de Profesor Emérito de la Universidad Nacional de Colombia
- El título de Miembro de Número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
- El título de Miembro Correspondiente del International Statistical Institute (ISI)
- Vicepresidente del Inter American Statistical Institute (IASI) y
- Miembro Honorario de la Sociedad Colombiana de Estadística (SCE).

La contribución del Maestro Jorge a la investigación en la Ciencia Estadística ha sido reconocida a nivel nacional e internacional, a través de múltiples publicaciones en prestigiosas revistas especializadas y también en capítulos de libros.

El aporte de Jorge a la gestión Universitaria fue relevante. Durante su ejercicio como Profesor de la Universidad Nacional de Colombia fungió como director del Departamento de Matemáticas, Decano de la Facultad de Ciencias y Vicerrector Académico. En este último cargo fue uno de los miembros del equipo que implementó el actual Sistema de Información Académico (SIA). Para destacar a nivel nacional, él fue uno de los tres decanos gestores de la Asociación Colombiana de Facultades de Ciencias, ACOFACIEN.

“La enseñanza es más que mi profesión”, decía con orgullo. Aportaba con sus conocimientos en las Facultades de Ciencias, Ciencias Sociales, Ciencias Económicas y, por supuesto, en Ingeniería. ¡“Yo creo que cuando los estudiantes empiezan a ver la necesidad de esta herramienta, va desapareciendo el miedo”, afirmaba sobre la enseñanza de las matemáticas en Colombia, con conocimiento de causa.

Jorge estaba convencido de que cuando se enseña, también se aprende, por eso ni siquiera cuando ocupó cargos directivos se desvinculó de la docencia y la investigación. Aunque estaban vivas sus deseos de colaborar con la Universidad, resaltaba que se debía reconocer más el aporte de los profesores pensionados y su voluntad de seguir enseñando. Enfatizaba en su gusto por seguir sirviéndole a la Institución, en la formación de nuevos profesionales. “Una de las cosas más satisfactorias es encontrarse con estudiantes que nos han superado, que resultan siendo mejor que el profesor” aseveraba en una de las entrevistas para medios universitarios. Pues pensionarse es solo un evento administrativo dentro de una trayectoria que no pierde su continuidad. Para Jorge fue un honor poder mantenerse en la Universidad Nacional como profesor pensionado, asesorando procesos académicos, dictando cursos de Estadística en varias facultades y aprovechando un espacio de reencuentro con sus colegas y amigos.

Con su apariencia sencilla, amable y simpática transmitía que era un hombre de números; sin embargo, le apasionaban la lectura, especialmente de novelas. Según sus amigos cercanos, su vida nunca fue cuadrículada, ni tan precisa como una fórmula matemática. Trató de maximizar el tiempo para ver buen cine y viajar por unos días fuera de la capital, sin olvidarse de regresar a esa labor que no quería abandonar, su academia.

Jorge se destacó, a nivel nacional e internacional, por su contribución significativa al fomento, difusión y desarrollo de la Ciencia Estadística, siendo gestor, creador y promotor del Simposio de Estadística, evento académico impulsor de la actualización en el conocimiento de la Estadística en Colombia y su consecuente influencia sobre el desarrollo de los programas de pregrado y posgrado, en esta disciplina del conocimiento a nivel nacional.

Sus muchos alumnos, colegas y amigos lo recordaremos siempre con cariño y respeto. Un hombre, un Maestro que nunca presumió de sus conocimientos ni de su indudable valía, sino que, por el contrario, estuvo siempre presto a enseñar y a compartir su sabiduría con colegas y alumnos por igual.

### **Horacio Torres Sánchez**

Miembro de Número, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

## Víctor Albis González

### 1939-2017

Víctor Samuel Albis González nació en Sincelejo el 14 de noviembre de 1939 en una familia de educadores formada por Víctor Hugo Albis Villalba y Julieta González-Tapia Gómez. Su abuelo materno Samuel González-Tapia tenía un colegio para varones, el *González Tapia*, y su madre quien era Normalista Superior de la *Normal de Cartagena* fundó el *Instituto de Cultura Femenina* para señoritas. Su padre además de comerciante era poeta. Víctor Samuel hizo sus primeros estudios en su ciudad natal, en el Colegio del Presbítero Antonio Prieto, “un español mal hablado”, y luego para hacer el bachillerato fue enviado a Bogotá. Estuvo interno en el Colegio de Santo Tomás, en el Liceo de la Salle y terminó sus estudios en el Colegio del Rosario. En 1958 fue admitido a la carrera de Matemáticas de la Universidad Nacional (UN), a la que ingresara sin estudios previos de ingeniería, algo que ningún alumno había logrado anteriormente. Se graduó en 1963 con un estudio titulado *Potencia exterior topológica de un modelo*.



Distinguido como el mejor estudiante de su promoción, Víctor Samuel recibió una beca y viajó a estudiar en la Universidad de Paris IV. Allí permaneció por dos años, asistió a los cursos de álgebra y teoría de números dictados por Pierre Samuel y Claude Chevalley. Como la beca era precaria y había viajado con su familia, doña Regina Feliz y su hija, Rosario, la situación económica se hizo insostenible impidiéndole concentrarse en sus estudios por lo que regresó a Bogotá dos años después para retomar su cargo en el Departamento de Matemáticas de la UN en donde impartió el curso de cálculo avanzado. Posteriormente, en 1969 viajó a la Universidad de Boulder, Colorado, en los Estados Unidos, con una beca Ford y obtuvo su doctorado en matemáticas en 1972.

En 1960 aun como estudiante, Víctor revivió la *Revista de Matemáticas Elementales* (RME), fundada en 1952, publicación conjunta de las Universidades Nacional y de los Andes, la que en 1967 Víctor mismo convertiría en dos, a saber, la *Revista Colombiana de Matemáticas* (RCM) de nivel investigativo y el *Boletín de Matemáticas* dedicado a profesores de enseñanza media y estudiantes universitarios. Con apoyo especial del tesorero de la Sociedad Colombiana de Matemáticas (SCM), Camilo Rubiano, se le presentaron estas revistas al director del Departamento de Matemáticas, profesor Ricardo Losada, quien se sorprendió por la decisión que el “enfant terrible” había tomado sin consultarlo. No obstante, resolvió apoyarlo. Años más tarde, Víctor delegó en Hernando Pérez la dirección del *Boletín* mientras que el mismo retenía la correspondiente a la *Revista*, función que desempeñó hasta 1978.

Quien escribe quiere destacar este aspecto del profesor Albis quien, desde ese entonces, estuvo ligado de una u otra forma, a las revistas en asocio con la SCM, publicaciones que han permitido que el Departamento de Matemáticas de la UN cuente con un medio de difusión para el avance permanente del conocimiento. La calidad de la RCM está marcada por el rigor en la selección de los artículos y por su impecable presentación, la que, además, ha sido en términos matemáticos, una prueba de existencia de la comunidad matemática colombiana y un vínculo en extremo valioso para el contacto con el mundo exterior especialmente si se considera que nuestra incipiente comunidad solía hacer muy escasa presencia en eventos internacionales. La RCM, desde su antecesora la RME, permitió el canje con revistas de matemáticas de primer nivel en todo el mundo, un vínculo de valor único. Es así como por muchos años, la Biblioteca de Matemáticas y Estadística de la UN, fue la más importante de Colombia. Actualmente se la encuentra repartida entre la Biblioteca de Ciencia y Tecnología, la Hemeroteca y la Biblioteca Central. La revista ha tenido continuidad desde entonces, lo cual es una verdadera proeza en nuestro medio.

El *Boletín*, en cambio, ha tenido varias etapas. Fue un órgano de difusión conjunto entre el DM y la SCM, pero a finales de los años 70 bajo la presidencia de Alonso Takahashi se decide, por razones que no son del caso mencionar, fundar las *Lecturas Matemáticas* como órgano oficial de difusión de la SCM y dejar a cargo del DM el *Boletín*. Víctor Albis perteneció al Comité Editorial de *Lecturas Matemáticas* desde 1997 y fue su editor hasta su fallecimiento.

La vida de Víctor Albis fue, por lo tanto, una vida dedicada a la labor de difusión de nuestros trabajos y el científico capaz de abrir la puerta a matemáticos extranjeros que ahora publican en nuestras revistas. Comencé este escrito presentando a **Víctor Albis**, como **el editor**. Editor de revistas, miembro de comités editoriales, y revisor muy riguroso de múltiples trabajos de matemáticas, riguroso tanto en lo matemático como en la calidad de la redacción y la ortografía. Pero, además de editor, su trayectoria académica tuvo otras facetas, las que se presentan a continuación.

**Víctor Albis, el historiador.** En la biblioteca de su abuelo, Víctor se interesó por los libros viejos de matemáticas y ciencia como los *Elementos de Geometría* de Legendre en la edición venezolana, *El valor de la ciencia* de Poincaré, *Cosmos* de Humboldt y la *Astronomía* de Flanmarión. Comenzó entonces a hacer reseñas y publicarlas en la RME. Ese interés se convirtió en el *Programa de Investigaciones Históricas de la Matemática en Colombia*, proyecto que fue presentado con el apoyo de la SCM a Colciencias y que fuera uno de los primeros proyectos de investigación avalados (1974) por la recién fundada Colciencias. Tengo el honor de haber sido incluida desde entonces en este proyecto histórico. El proyecto tiene como objetivo recuperar, recopilar, analizar y construir un catálogo de la producción matemática de los colombianos. Hoy este proyecto puede mostrar resultados muy valiosos como se aprecia en las páginas de la SCM y de la Academia Colombiana de Ciencias. Una base de datos con cerca de 5000 registros de la producción matemática de los colombianos, que abarca trabajos desde el siglo XIX y que está disponible en el servidor de la SCM ([www.scm.org.co](http://www.scm.org.co)). Contamos, además, con la página web ([www.accefyn.org.co/historia-matematica/mathematica/miscelanea.htm](http://www.accefyn.org.co/historia-matematica/mathematica/miscelanea.htm)) en el servidor de la Academia Colombiana de Ciencias. Ésta contiene una galería de matemáticos colombianos, parte de las publicaciones que se han hecho sobre los documentos encontrados, de verdadero valor patrimonial, y una bibliografía con documentos de los siglos XIX y XX. Ello permite citar el cuaderno del primer curso de cálculo impartido en el país, en 1951 con las lecciones de Aimé Bergeron, el análisis de los trabajos de Julio Garavito e Indalecio Liévano sobre el postulado de Euclides, o la carta de Hermite en la que le resuelve un sencillo problema de geometría a Luis María Lleras. Desafortunadamente el proyecto se estancó hace unos años por falta de recursos.

El trabajo realizado con Luis Ignacio Soriano (1903-1973) sobre los números inconmensurables de Liévano en su *Tratado Elemental de Aritmética* de 1856, le abrió las puertas de la revista *Historia Matemática*, como miembro del Comité Editorial y fue además nombrado miembro de la *International Comision for the History of Mathematics*. Allí se hizo conocido especialmente por sus reseñas, de las cuales se cuentan más de cien entre ésta y otras revistas.

Conocer el origen y desarrollo de una idea permite entender mejor la idea misma y deberían facilitar su enseñanza. Por ello Víctor organizó en 1974 un Seminario de Historia de las Matemáticas el cual duró varios años a su cargo. Junto con Alberto Campos abrieron el camino para que hoy en día el área de la historia y de la filosofía de la matemática empiecen a ser reconocidas en nuestro medio como áreas de estudio válidas para un matemático.

**Víctor y la etno-matemática.** Ese interés por nuestra historia lo llevó a otro tema de investigación: herramientas matemáticas para la antropología. Antropología y Matemáticas fue una interesante investigación que realizó con el destacado antropólogo Guillermo Páramo. Sus trabajos sobre los grupos de simetría que se encuentran en los dibujos que se hallan en los más diversos objetos precolombinos como las vasijas de cerámica, los poporos, narigueras y demás. Las matemáticas pueden facilitar la clasificación de los mismos para distinguirlos como pertenecientes a una cultura o a otra. Igualmente, un estudiante realizó como su trabajo de grado el análisis de los sistemas de numeración de la familia macrochicha, quienes fueron pioneros en nuestro país.

**Víctor Albis el algebrista.** El álgebra y la teoría de números fueron sus áreas de interés en la matemática "pura". Los resultados de sus investigaciones *Anillos euclídeos* con Raj Markanda de la Universidad del Valle, *Teoría aritmética de polinomios y funciones algebraicas*, *Funciones zeta locales de Igusa*. *Racionalidad en característica positiva para ciertos tipos de polinomios* con Wilson Zúñiga, reflejados todos ellos en sus publicaciones y en la formación de aquellos estudiantes a quienes dirigió sus trabajos de grado o sus tesis en los diferentes niveles de formación académica. Su producción puede apreciarse, justamente, en la base de datos que hemos construido y que puede ser consultada en la red.

**Víctor el docente.** Víctor fue un profesor "cuchilla" como decimos en nuestro *argot* regional. Creo que esa dureza es pecado de juventud, pecado estoy segura que, en mayor o menor medida, hemos cometido los que hemos ido aprendiendo el oficio de la docencia. Víctor - como la gran mayoría de veteranos en el oficio - se volvió un profesor *madre*, al que se acercan muchos estudiantes para escuchar sus consejos, para que sea su guía y ello no solo desde el punto de vista académico. Él se consideraba un chozno de Hilbert, y puedo afirmar que la descendencia por su lado continúa. En esta faceta hay que destacar que siempre entregó a sus alumnos sus propias notas. Nos legó dos libros pioneros: *Cálculo I* (1969) escrito con Yu Takeuchi y *Temas de Aritmética y Álgebra* (1976).

**Víctor el administrador.** Como primer Rector de la Universidad de Sucre realizó una gran labor en pro de la educación superior en su Departamento. Ello le valió varias distinciones como la de "Mejor Ejecutivo del Año" otorgada por Cámara Júnior de Colombia, capítulo de Sucre, en 1981; la "Medalla Alfredo González Rubio" de la Cámara Júnior de Colombia en

1982; y la Orden “Mariscal Sucre” del Gobierno de Departamental de Sucre por servicios distinguidos en 1984. En la UN ocupó varios cargos: Jefe de Planeación, Director del Departamento de Bibliotecas, Director del Posgrado de Matemáticas. La Universidad ha reconocido su aporte integral a la Universidad con las distinciones de “Maestro Universitario” en 1986, la Medalla al “Mérito Universitario” en 1995, y en 2004 le fue otorgada la Orden “Gerardo Molina”, la más alta distinción que otorga la UN a sus profesores activos. Fue Presidente de la SCM entre 1990 y 1993 y, como tal, apoyó la organización del “IV Coloquio Internacional de Historia y Filosofía de las Matemáticas y Primero en Educación Matemática” en Colombia realizado en 1993 con una gran acogida y más de 300 participantes. Fue Secretario de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (1990-1992), Director de su biblioteca (1994-2002), y Director de la Gaceta.

**Víctor el esposo y padre.** Regina Feliz, su esposa desde 1963, brindó su decidido apoyo para que Víctor pudiera realizar las numerosas tareas que, por la matemática, y por la educación en este país, se empeñó en su larga y meritoria vida académica. Tres hijos, Rosario, Samuel y María Alejandra y seis nietos, Nicolás, Alejandro, Sarita, Daniel, Lucca y Grace Marie, fueron su alegría, soporte afectivo, su orgullo, y, sin duda, motor para su vida. A todos ellos van nuestro más profundo sentimiento de condolencia. Paz en su tumba...

**Clara Helena Sánchez B.**

Departamento de Matemáticas

Universidad Nacional de Colombia – Bogotá.

Esta nota sobre la vida y obra de Víctor Albis está basada en la presentación que de él hiciera cuando recibió el Premio Nacional de Matemáticas en 2007. Trabajo publicado en *Lecturas Matemáticas*, **28** (2007): 99-108.

## 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 Research and Contributor ID* (Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Research 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.