



ISSN 0370-3908

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 39 · Número 150 · Págs. 1-130 · Enero - Marzo de 2015 · Bogotá - Colombia



Lobelia

Centropogon
Centropogon ignoti-pictoris Dioc



ISSN 0370-3908

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 39 · Número 150 · Págs. 1-130 · Enero - Marzo de 2015 · Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora en jefe

Elizabeth Castañeda
Instituto Nacional de Salud,
Bogotá, Colombia

Editores asociados

Ciencias físicas

Bernardo Gómez
Departamento de Física,
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Rubén Antonio Vargas Zapata
Universidad del Valle,
Cali, Colombia

Pedro Fernández de Córdoba
Universidad Politécnica de Valencia, España

Diógenes Campos Romero
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Román Eduardo Castañeda Sepúlveda
Universidad Nacional, Medellín, Colombia

Carlos Alberto Duque Echeverri
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

María Elena Gómez
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Gabriel Téllez
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Luis Álvaro Morales Aramburo
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Germán A. Pérez Alcázar
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Enrique Vera López
Universidad Politécnica, Tunja, Colombia

Jairo Roa-Rojas
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Rafael Baquero
Cinvestav, México

Ángela Stella Camacho Beltrán
Departamento de Física,
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Matemáticas

Victor Albis
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Jorge Ivan Cossio Betancur
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia

Luis Español González
Universidad de la Rioja, España

Jaime Ignacio Lesmes Camacho
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Luis Carlos Arboleda
Universidad del Valle, Cali, Colombia

José R. Quintero
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Ciencias químicas

Sonia Moreno Guaqueta
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Fanor Mondragón
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Moisés Wasserman Lerner
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Myriam Sánchez de Gómez
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Héctor Fabio Zuluaga Corrales
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Fernando Martínez
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

Betty Lucy López Osorio
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias naturales

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

Jaime Cantera
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Gabriel Roldán
Universidad Católica de Oriente,
Rionegro, Antioquia, Colombia

Juan Armando Sánchez Muñoz
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Patricia Chacón de Ulloa
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Sandra Baena Garzón
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia

Néstor Hernando Campos Campos
Universidad Nacional de Colombia,
Sede Caribe, Colombia

Gerhard Fischer
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Jorge Enrique Llorente
Universidad Nacional Autónoma
de México, México

Santiago Melo Gaviria
Universidad de Viena, Austria

Martha Patricia Ramírez Pinilla
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

Carlos Daniel Cadena Ordoñez
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Santiago Madriñán
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ciencias de la tierra

José Ignacio Martínez
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Germán Poveda Jaramillo
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia

Armando Espinosa
Universidad del Quindío,
Armenia, Colombia

Carlos Alberto Vargas
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Fabio Cediel Melo
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Jaime Ignacio Vélez Upegui
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Carlos Alberto Jaramillo Muñoz
Smithsonian Tropical Research Institute,
Panamá

Michel Hermelin Arbaux
Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Ciencias biomédicas

Luis Fernando García
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Felipe Guhl
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Leonardo Puerta Llerena
Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia

Gustavo Adolfo Vallejo
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Luis Caraballo
Universidad de Cartagena, Colombia

Eduardo Alberto Egea Bermejo
Universidad del Norte,
Barranquilla, Colombia

Ciencias humanas

Rubén Ardila
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Guillermo Páramo
Universidad Central, Bogotá, Colombia

Comité científico internacional

Ángela María Guzmán
University of Central Florida,
Orlando, Estados Unidos

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

Antoine M. Cleef
University of Amsterdam, Holanda

Carlos Jiménez
Universidad de La Coruña, España

José Rubens Pirani
Universidade de São Paulo, Brasil

Wolfgang Gieren
Universidad de Concepción, Chile

Asistencia y coordinación editorial Carolina Acosta

Corrección de estilo y ortografía
Marta Renza

Diagramación
Johanna Morales

Impresión y acabados
Gente Nueva

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana

Agris

CIRS

Current Mathematical Publications

Dialnet

EBSCO

Historia Mathematica

Index Kewensis

Latindex

Mathematical Reviews

MathSciNet (on line data base)

OCLC (Online Computer Library Center)

PERIODICA

Publindex, Colciencias

RLG

SciELO

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

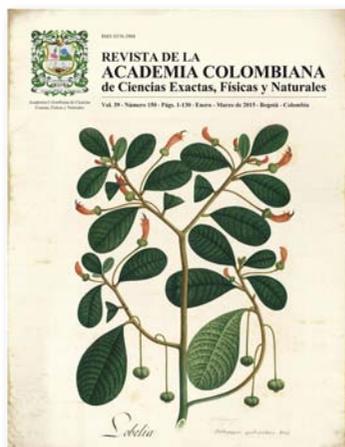
Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

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:

Título: *Lobelia* (ms. original ¿de José María Carbonell?). Inscripción ms., a lápiz, de [Santiago Díaz Piedrahita]: "*Centropogon ignoti-pictoris* Diaz". Nombre científico: *Centropogon ignoti-pictoris* S. Díaz (Campanulaceae). Signatura: AJB, Div III, A 1194, Archivo del Real Jardín Botánico, CSIC, Madrid

Flora de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada: (1783-1816) / promovida y dirigida por José Celestino Mutis; publicada bajo los auspicios de los Gobiernos de España y de Colombia [merced a la colaboración de los Institutos de Cultura Hispánica de Madrid y Bogotá y el Real Jardín Botánico de Madrid -- Madrid: Ediciones Cultura Hispánica.

Lámina 44, Tomo 45(1): Cucurbitales y Campanulales / determinó las láminas y redactó los textos Santiago Díaz Piedrahita - 1985 - 42 p., 50 h. de lám. col. y b. n.-

Página web de la revista: www.raccefyn.co • **Correo electrónico:** revista@accefyn.org.co

Sede de la Academia: Cra. 28a No.39a - 63 Bogotá, Colombia • **Teléfonos:** (571) 244 3186 - 268 3290 - 268 2846



ISSN 0370-3908

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 39 · Número 150 · Págs. 1-130 · Enero - Marzo de 2015 · Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Matemáticas	A water wave mixed type problem: existence of periodic travelling waves for a 2D Boussinesq system Un problema de ondas de agua de tipo mixto: la existencia de ondas viajeras periódicas para un sistema Boussinesq 2D <i>José R. Quintero</i> 6
Ciencias físicas	Microestructura y propiedades ópticas de películas de bismuto y óxido de bismuto depositadas con magnetron desbalanceado Microstructure and optical properties of bismuth and oxide bismuth films using unbalanced magnetron <i>Diana María Otálora, Giovany Orozco, Jhon Jairo Olaya-Flórez</i> 18
Ciencias químicas	Catalizadores de manganeso sintetizados por autocombustión y coprecipitación y su empleo en la oxidación del 2-propanol Self-combustion and Co-precipitation manganese catalysts and their use in the oxidation of 2-propanol <i>María Haidy Castaño, Rafael Molina, Sonia Moreno</i> 26
Ciencias naturales	Habitat perturbation and survival strategies of the Andean catfish <i>Astroblepus mariae</i> (Fowler, 1919) Perturbación de hábitat y estrategias de supervivencia del bagre <i>Astroblepus mariae</i> (Fowler, 1919) <i>Uriel A. Buitrago-Suarez, Jose I. Mojica, Lisa K. Bonneau</i> 36
	Listado taxonómico y distribución de los tricópteros inmaduros del departamento del Tolima Taxonomic list and distribution of immature caddisflies in the Department of Tolima <i>Edwin O. López-Delgado, Jesús M. Vásquez-Ramos, Gladys Reinoso-Flórez</i> 42

Ciencias naturales	Nueve especies nuevas del género <i>Sticta</i> (Ascomycota liquenizados: Lobariaceae) del morfotipo <i>fuliginosa</i> sensu lato de Colombia	
	Nine new species of the genus <i>Sticta</i> (Ascomycota liquenizados: Lobariaceae) of the <i>fuliginosa</i> sensu lato morphodeme from Colombia	
	<i>Bibiana Moncada, Alejandra Suárez, Robert Lücking</i>	50
	Caracterización de la entomofauna acuática en cuatro quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó, Colombia	
	Characterization of aquatic entomologic fauna in four streams of San Juan river (Chocó - Colombia)	
	<i>Zuleyma Mosquera-Murillo, Karen E. Córdoba-Aragón</i>	67
	Comportamiento diario y estacional de las estructuras óptica y térmica en un embalse tropical colombiano	
	Daily and seasonal behavior of optical and thermal structures in a Colombian tropical reservoir (La Fe reservoir)	
	<i>John J. Ramírez R.</i>	77
	Malformación en cangrejos de la superfamilia Xanthoidea (Crustacea: Brachyura) en la bahía de Cispatá (Córdoba, Colombia)	
	Malformation in crabs of the superfamily Xanthoidea (Crustacea: Brachyura) in the Cispatá Bay (Córdoba, Colombia)	
	<i>Néstor Hernando Campos-Campos, Pedro Ricardo Dueñas-Ramírez, Nohemí Genes</i>	91
Ciencias de la tierra	Morfotectónica de la falla Abriaquí y sismicidad histórica asociada con el sismo de 1903 en Frontino, Antioquia	
	Morphotectonics of the Abriaquí fault, historical seismicity and their relation with the 1903 earthquake in Frontino, Antioquia	
	<i>Santiago Noriega-Londoño, José Humberto Caballero-Acosta</i>	100
Ciencias biomédicas	<i>Trypanosoma rangeli</i>: un protozoo infectivo y no patógeno para el humano que contribuye al entendimiento de la transmisión vectorial y la infección por <i>Trypanosoma cruzi</i>, agente causal de la enfermedad de Chagas	
	<i>Trypanosoma rangeli</i> : an infective but non-pathogenic protozoon for humans which contributes to the understanding of the vector-borne transmission and the pathogenesis of <i>Trypanosoma cruzi</i> , causative agent of Chagas' disease	
	<i>Gustavo Adolfo Vallejo, Yazmín Suárez, Jenny Lorena Olaya, Sneider Alexander Gutiérrez, Julio César Carranza</i>	111
	Enfoque y alcance	
	Focus and Scope	123

A water wave mixed type problem: existence of periodic travelling waves for a 2D Boussinesq system

José R. Quintero*

Departamento de Matemáticas, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Abstract

In this paper we establish the existence of periodic travelling waves for a 2D Boussinesq type system in three-dimensional water-wave dynamics in the weakly nonlinear long-wave regime. For wave speed $|c| > 1$ and large surface tension, we are able to characterize these solutions through spatial dynamics by reducing a linearly ill-posed mixed type initial value problem to a center manifold of finite dimension and infinite codimension. We will see that this center manifold contains all globally defined small-amplitude solutions of the travelling wave equation for the Boussinesq system that are periodic in the direction of propagation.

Key words: periodic travelling waves, center manifold approach, stability

Un problema de ondas de agua de tipo mixto: la existencia de ondas viajeras periódicas para un sistema Boussinesq 2D

Resumen

En este artículo establecemos un resultado de existencia de ondas periódicas para un sistema 2D del tipo Boussinesq que describe la evolución de ondas de agua de gran elongación y pequeña amplitud que son débilmente lineales. Para velocidad de onda $|c| > 1$ y tensión superficial suficientemente grande, estas soluciones son caracterizadas a través de dinámica espacial al reducir el problema de valor inicial (mal puesto a nivel lineal) a una variedad central de dimensión finita y codimensión infinita. Se mostrará que dicha variedad central contiene todas las soluciones de onda viajera de pequeña amplitud para el sistema tipo Boussinesq que son periódicas en la dirección de propagación de la onda.

Palabras clave: ondas viajeras periódicas, método de variedad central, estabilidad.

1. Introduction

This paper presents an existence result of nonlinear travelling water waves which are periodic in their direction of propagation and have a pulse structure in the unbounded transverse spatial direction. As done for a wide range of applications, we use spatial dynamics and center manifold reduction to obtain such a result in a model related with the water-wave problem. Here the expression "spatial dynamics" means to perform a method in which a system of partial differential equations governing a physical problem is formulated as a evolutionary equation (in general ill-posed)

$$u_{\zeta} = A(u) + G(u). \quad (1.1)$$

in which an unbounded spatial coordinate plays the role of the timelike variable ζ (see Kirchgässner (1982)). In this paper the method is applied to studying the existence of non trivial periodic travelling wave for the Boussinesq type system related with the water wave problem

$$\begin{cases} \eta_t + \epsilon \nabla \cdot \left(\eta \left(\Phi_x^p, \Phi_y^p \right) \right) + \Delta \Phi - \frac{\mu}{6} \Delta^2 \Phi = 0, \\ \Phi_t + \eta - \mu \left(\sigma - \frac{1}{2} \right) \Delta \eta + \frac{\epsilon}{p+1} \left(\Phi_x^{p+1} + \Phi_y^{p+1} \right) = 0, \end{cases} \quad (1.2)$$

where $\sqrt{\mu} = h_0/L$ is the ratio of undisturbed fluid depth to typical wave length (long-wave parameter or disper-

*Correspondencia: J. R. Quintero: jose.quintero@correounivalle.edu.co. Recibido marzo 2014; aceptado diciembre 2014.

sion coefficient), and ϵ is the ratio of typical wave amplitude to fluid depth (amplitude parameter or nonlinearity coefficient), σ^{-1} is the Bond number (associated with the surface tension), Φ is the rescale nondimensional velocity potential on the bottom $z = 0$, and η is the rescaled free surface elevation. We consider waves which are periodic in a moving frame of reference, so that they are periodic in the variable $x - ct$, where t denotes the temporal variable. For this physical problem, we have a bounded spacelike coordinates (the vertical direction), which is bounded because the fluid has finite depth, and the coordinate $x - ct$ which is considered bounded because we are looking for periodic wave in this variable. So, since there is not any restriction upon the behavior of the waves in the spatial direction y transverse to their direction of propagation, we are allowed to use it as timelike variable. We apply spatial dynamics to the problem by formulating this as an evolutionary system of the form (1.1) with $\zeta = y$ in an infinite-dimensional phase space consisting of periodic functions of $x - ct$ (see **Grover & Schneider** (2001), **Sandstede & Scheel** (1999), **Sandstede & Scheel** (2004), and **Haragus-Courcelle & Schneider** (1999) for applications to respectively nonlinear wave equations, reaction-diffusion equations, and Taylor-Couette problems, and **Quintero & Pego** (2002) for periodic nonlinear travelling for the Benney-Luke model).

In the case of wave speed $|c| > 1$ and bond number $\sigma > \frac{1}{2}$, the Boussinesq system (1.2) under consideration in this paper has a very close relationship with the Benney-Luke model derived in **Quintero & Pego** (1999) when $a > b$ and also with the KP-II model ($\sigma > \frac{1}{3}$), in the sense that travelling waves for the Boussinesq system (1.2) can generate travelling waves for the Benney-Luke model and the KP-II model, up to some order. Event tough this fact, in the regime of wave speed $|c| > 1$ and bond number $\sigma > \frac{1}{2}$, the Boussinesq system (1.2) seems to be closer to the linearized system of the exact water wave problem with surface tension (see **Grover** (2001), **Grover & Mielke** (2001)) since both models share ill-posed spatial evolution equations with finite-dimensional center manifolds, while for the Benney-Luke model in the same regime and also for the KP-II model there are ill-posed spatial evolution equations with infinite-dimensional center manifolds.

It is well known that a finite-dimensional dynamical system whose linear part has purely imaginary eigenvalues admits an invariant manifold called the center manifold which contains all its small, bounded solutions. The dimension of the center manifold is determined by the number of purely imaginary eigenvalues (e.g., see **Vanderbauwhede** (1989)). This type of results under special hypotheses has been extended for infinite-dimensional

evolutionary systems whose linear part has either finite or even infinite number of purely imaginary eigenvalues, showing in particular that the original problem is locally equivalent to a system of ordinary differential equations whose solutions can be expressed in terms of the solution on the center space (tangent to the center manifold). A generalization regarding invariant manifolds of infinite dimension and codimension in nonautonomous systems was obtained by **Scarpellini** (1990), but his hypotheses require that the operator A_1 (A restricted to the hyperbolic space) be bounded from H to H . We also have some works by **Mielke** (1991) and **Vanderbauwhede & Iooss** (1982), **Quintero & Pego** (2002), among others. The general strategy of our proof will follow closely the lines of **Vanderbauwhede** (1989) (also see **Quintero & Pego** (2002), **Kirchgässner** (1982), **Mielke** (1988), **Mielke** (1992) for the case of a finite-dimensional center manifold in an ill-posed system for which the spectrum of A_1 is unbounded on both sides of the imaginary axis. In order to accomplish this, we need to transform the travelling wave system into an integral equation that must contain all small bounded solutions. By modifying the nonlinearity f outside a neighborhood of 0 using a cutoff function, we are able to obtain an invariant local manifold as a consequence of the contraction mapping argument.

The main differences between our results and those in **Vanderbauwhede & Iooss** (1982) are that our cutoff occurs in a space with less regularity than the space regularity and also that the nonlinear part has a smoothing property. This facts are clever to control the norm of solutions in the right space using an indefinite energy which turns out to be "definite" on the center manifold. The stronger assumption on the nonlinear term f imposed in the present work is completely natural for the present application to the Boussinesq system.

In this paper we describe all small travelling waves that translate steadily for $\sigma > \frac{1}{2}$ with supercritical speed $|c| > 1$, which are periodic in the direction of translation (or orthogonal to it). In this regime, after rescaling ϵ and μ , the traveling-wave system for (1.2) takes the form

$$\begin{pmatrix} \Delta v - \frac{1}{6}\Delta^2 v + \nabla \cdot \left(u \begin{pmatrix} v_x^p, v_y^p \end{pmatrix} \right) - cv_x \\ u - \left(\sigma - \frac{1}{2} \right) \Delta u + \frac{1}{p+1} \left(v_x^{p+1} + v_y^{p+1} \right) - cv_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{1.3}$$

Existence of periodic travelling waves follows by considering the system (1.3) as an evolution equation where y acts as the "time" variable. In this case when we seek for x -periodic travelling wave solutions, the initial-value problem for the system (1.3) considered as an evolution equation in the variable y has mixed type due to the fact that the Cauchy problem turns out to be linearly *ill-posed* for wave speed $|c|$ large enough and large bond number

($\sigma > \frac{1}{2}$). To be more precise, at the linear level there are finite many central modes (pure imaginary eigenvalues) and infinitely many hyperbolic modes. As a consequence of this fact, the existence result of x -periodic travelling wave solutions involves using an invariant center manifold of finite dimension and infinite codimension. This center manifold contains all globally defined small-amplitude solutions of the travelling wave equation for the Boussinesq system that are x -periodic in the direction of propagation.

2. Periodic travelling waves for $|c| > 1$ and $\sigma > \frac{1}{2}$

Recall that x -periodic travelling-wave profile (u, v) should satisfy the system (1.3). In order to look for the existence of x -periodic travelling waves of period 2π , we set the new variables

$$\begin{aligned} u_1 &= \partial_x v, & u_2 &= \partial_y v, \\ u_3 &= \partial_{yy} v, & u_4 &= \partial_{yyy} v, \\ u_5 &= u, & u_6 &= \partial_y u, \end{aligned}$$

then we have for $\gamma \left(\sigma - \frac{1}{2}\right) = 1$ that

$$\partial_y u_1 = \partial_x u_2, \partial_y u_2 = u_3, \partial_y u_3 = u_4 \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned} \partial_y u_4 &= 6\partial_x u_1 \partial_x^3 u_1 + 6u_3 - 2\partial_x^2 u_3 - 6c\partial_x u_5 + \\ &6\partial_x(u_5 u_1^p) + 6u_6 u_2^p + 6p u_5 u_2^{p-1} u_3 \end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\partial_y u_5 = u_6 \tag{2.6}$$

$$\begin{aligned} \partial_y u_6 &= -c\gamma u_1 + \gamma u_5 - \partial_x^2 u_5 + \\ &+ \frac{\gamma}{p+1} (u_1^{p+1} + u_2^{p+1}) \end{aligned} \tag{2.7}$$

In terms of the new variable $U^t = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)$, we see that this system can be rewritten as an evolution in which y is considered as the time variable

$$\partial_y U = AU + G(U), \tag{2.8}$$

where we have that

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \partial_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 6\partial_x - \partial_x^3 & 0 & 6I - \partial_x^2 & 0 & -6c\partial_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ -c\gamma & 0 & 0 & 0 & \gamma - 2\partial_x^2 & 0 \end{pmatrix}$$

and also

$$G(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 6\partial_x(u_5 u_1^p) + 6u_6 u_2^p + 6p u_5 u_2^{p-1} u_3 \\ 0 \\ \frac{\gamma}{p+1} (u_1^{p+1} + u_2^{p+1}) \end{pmatrix}$$

Now, for a given integer $r \geq 0$, let \tilde{H}^r denote the Sobolev space of 2π -periodic functions on \mathbb{R} whose weak derivatives up to order k are square-integrable. Then \tilde{H}^r is a Hilbert space with norm given by

$$\|u\|_{\tilde{H}^k}^2 = \sum_{j=0}^k \int_0^{2\pi} |\partial_x^j u|^2 dx$$

We will study the existence of x -periodic solutions for (2.8) in the Hilbert spaces H and X defined by

$$H = \tilde{H}^1 \times \tilde{H}^1 \times \tilde{H}^0 \times \tilde{H}^{-1}, \tag{2.9}$$

$$X = \tilde{H}^2 \times \tilde{H}^2 \times \tilde{H}^1 \times \tilde{H}^0. \tag{2.10}$$

Note that X is densely embedded in H . If we assume that $U(x; y) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \hat{U}(n, y) e^{inx}$, then we see that

$$\partial_y \hat{U}(n) = \hat{\mathcal{A}}(n) \hat{U}(n, y) + \hat{G}_n(U),$$

where the matrix $\hat{\mathcal{A}}(n)$ has the form

$$\hat{\mathcal{A}}(n) = \begin{pmatrix} 0 & in & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 6in + in^3 & 0 & 6 + 2n^2 & 0 & -6icn & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -c\gamma & 0 & 0 & 0 & \gamma + 2n^2 & 0 \end{pmatrix}$$

It is straightforward to see that the characteristic polynomial $\mathcal{P}(n, \beta)$ of $\hat{\mathcal{A}}(n)$ is given by

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(n, \beta) &= \beta^6 - (6 + 3n^2 + \gamma)\beta^4 + [(6 + 2n^2)(n^2 + \gamma) \\ &+ n^2(6 + n^2)]\beta^2 + n^2[6\gamma c^2 - (6 + n^2)(n^2 + \gamma)], \end{aligned} \tag{2.11}$$

where $\gamma > 0$, $|c| > 0$ and $n \in \mathbb{Z}$. We note that the eigenvalues for $\hat{\mathcal{A}}(n)$ are roots of the cubic polynomial p_n in the variable $\lambda = \beta^2$ given by

$$p_n(\lambda) = \lambda^3 + a_2(n)\lambda^2 + a_1(n)\lambda + a_0(n), \tag{2.12}$$

where $a_0(n)$, $a_1(n)$ and $a_2(n)$ are defined as

$$a_2(n) = -(3n^2 + 6 + \gamma) \tag{2.13}$$

$$\begin{aligned} a_1(n) &= (6 + 2n^2)(n^2 + \gamma) + n^2(6 + n^2) \\ &= 3n^4 + 2(6 + \gamma)n^2 + 6\gamma \end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned} a_0(n) &= n^2[6\gamma c^2 - (6 + n^2)(n^2 + \gamma)] \\ &= -n^2[n^4 + (6 + \gamma)n^2 + 6\gamma(1 - c^2)] \end{aligned} \tag{2.15}$$

Eigenvalues of $\widehat{\mathcal{A}}(n)$

We want to compute the eigenvalues of $\widehat{\mathcal{A}}(n)$. For $n = 0$, we have that $a_0(0) = 0$, $a_1(0) = 6\gamma > 0$, $a_2(0) = -(6 + \gamma) < 0$ and the cubic equation (2.12) can be easily solve since

$$\begin{aligned} \lambda^3 - (6 + \gamma)\lambda^2 + 6\gamma\lambda &= \lambda(\lambda^2 - (6 + \gamma)\lambda + 6\gamma) \\ &= \lambda(\lambda - \gamma)(\lambda - 6) = 0. \end{aligned}$$

In other words, we have the existence of six eigenvalues for $\widehat{\mathcal{A}}(0)$ given by,

$$\begin{aligned} \beta_1(0) &= \beta_2(0) = 0, \\ \beta_3(0) &= \sqrt{\gamma} = -\beta_4(0), \\ \beta_5(0) &= \sqrt{6} = -\beta_6(0). \end{aligned}$$

Assume now that $n \neq 0$. We will see that for $\gamma > 0$ and $c^2 > 1$ large enough, the polynomial p_n has a real root $\lambda_1(n)$ which is negative for a finite number of n 's and positive for infinitely many n 's. To do this we need somehow to localize the roots of the polynomial p'_n for $n \neq 0$. Note that

$$p'_n(\lambda) = 3\lambda^2 + 2a_2(n)\lambda + a_1(n)$$

has real roots given by

$$\begin{aligned} \rho_+(n) &= -\frac{a_2(n)}{3} + \frac{\sqrt{a_2^2(n) - 3a_1(n)}}{3}, \\ \rho_-(n) &= -\frac{a_2(n)}{3} - \frac{\sqrt{a_2^2(n) - 3a_1(n)}}{3} \end{aligned}$$

since

$$a_2^2(n) - 3a_1(n) = \gamma^2 - 6\gamma + 36 = (\gamma - 3)^2 + 27 > 0.$$

Moreover, a direct computation shows that

$$\begin{aligned} p_n(\rho_{\pm}) &= \frac{2a_2^3(n)}{27} - \frac{a_1(n)a_2(n)}{3} + a_0(n) \pm \frac{2}{27}(3a_1(n) \\ &\quad - a_2^2(n))\sqrt{a_2^2(n) - 3a_1(n)} \\ &= \frac{2a_2^3(n)}{27} - \frac{a_1(n)a_2(n)}{3} + a_0(n) \\ &\quad \mp \frac{2}{27}(\gamma^2 - 6\gamma + 36)^{\frac{3}{2}} \end{aligned}$$

From this, we conclude for any $n \neq 0$ that

$$p_n(\rho_-) - p_n(\rho_+) = \frac{4}{27}(\gamma^2 - 6\gamma + 36)^{\frac{3}{2}} > 0.$$

On the other hand, we have that

$$\begin{aligned} \frac{2a_2^3(n)}{27} - \frac{a_1(n)a_2(n)}{3} + a_0(n) &= \frac{1}{27} \left(162\gamma c^2 n^2 + 54\gamma(6 + \gamma) - 2(6 + \gamma)^3 \right) \\ &= \frac{1}{27} \left(162\gamma c^2 n^2 - 2(6 + \gamma)(\gamma - 3)(\gamma - 12) \right). \end{aligned} \tag{2.16}$$

Using this we have that

$$p_n(\rho_{\pm}) = \frac{1}{27} \left(162\gamma c^2 n^2 - 2(6 + \gamma)(\gamma - 3)(\gamma - 12) \mp 2(\gamma^2 - 6\gamma + 36)^{\frac{3}{2}} \right)$$

We set $f(\gamma) = (\gamma^2 - 6\gamma + 36)^3 - ((6 + \gamma)(\gamma - 3)(\gamma - 12))^2$. We see that $f(0) = f(6) = 0$ and that $f'(0) = f'(6) = 0$, so we have that

$$f(\gamma) = 3^5 \gamma^2 (\gamma^2 - 6)^2 > 0,$$

which implies that

$$(\gamma^2 - 6\gamma + 36)^{\frac{3}{2}} > (6 + \gamma)(\gamma - 3)(\gamma - 12)$$

and so, we have for $\gamma > 0$ that

$$\begin{aligned} p_n(\rho_-) &= \frac{1}{27} \left(162\gamma c^2 n^2 + 2(\gamma^2 - 6\gamma + 36)^{\frac{3}{2}} \right. \\ &\quad \left. - 2(6 + \gamma)(\gamma - 3)(\gamma - 12) \right) > \frac{162}{27} \gamma c^2 n^2 > 0. \end{aligned}$$

Now we note that

$$\begin{aligned} p_n(\rho_+) &= \frac{1}{27} \left(162\gamma c^2 n^2 - 2((6 + \gamma)(\gamma - 3)(\gamma - 12) \right. \\ &\quad \left. + (\gamma^2 - 6\gamma + 36)^{\frac{3}{2}}) \right), \end{aligned}$$

so, we have that $p_n(\rho_+)$ is positive for $|n|$ large and could be negative for a finite number of n 's. As a consequence of this, for $n \neq 0$ the polynomial p_n has a real root $\lambda_1(n)$, whose sign depends on the sign of $a_0(n)$. In the case $p_n(\rho_+) > 0$, there are two conjugate complex roots $\lambda_2(n)$ and $\lambda_3(n) = \overline{\lambda_2(n)}$, and in the case $p_n(\rho_+) < 0$ there are two positive real root $\lambda_2(n) \geq \lambda_3(n) > 0$. Finally, we want to determine the sign of $\lambda_1(n)$ for $\gamma > 0$. We first observe for $c^2 > 1$ large enough and $\gamma > 0$ that there is $n_0 \neq 0$ such that

$$a_0(n) > 0 \text{ for } 0 < n \leq n_0, \text{ and } a_0(n) < 0 \text{ for } n > n_0.$$

From this fact, we conclude for $c^2 > 1$ large enough and $\gamma > 0$ that

$$\lambda_1(n) < 0 \text{ for } 0 < n \leq n_0, \text{ and } \lambda_1(n) > 0 \text{ for } n > n_0.$$

Right and left eigenvectors of $\widehat{A}(n)$

As we established above, $\beta_1(0) = \beta_2(0) = 0$ is an eigenvalue. We see directly that the eigenvectors are

$$v_1(0) = (1, 0, 0, 0, c, 0)^t, \quad v_2(0) = (0, 1, 0, 0, 0, 0)^t.$$

and left eigenvectors

$$z_1(0) = (1, 0, 0, 0, c, 0)^t, \quad z_2(0) = ((0, 1, 0, -1/6, 0, 0)^t.$$

The eigenvalue $\beta_3(0) = \sqrt{\gamma} = -\beta_4(0)$ are single eigenvalues with right eigenvectors

$$v_3(0) = (0, 0, 0, 0, 1, \sqrt{\gamma})^t, \quad v_4(0) = (0, 0, 0, 0, 1, -\sqrt{\gamma})^t.$$

and left eigenvectors

$$z_3(0) = \frac{1}{2\sqrt{\gamma}}(c\sqrt{\gamma}, 0, 0, 0, \sqrt{\gamma}, 1)^t,$$

$$z_4(0) = \frac{-1}{2\sqrt{\gamma}}(c\sqrt{\gamma}, 0, 0, 0, -\sqrt{\gamma}, 1)^t.$$

On the other hand, the eigenvalue $\beta_5(0) = \sqrt{6} = -\beta_6(0)$ are single eigenvalues with right eigenvectors

$$v_5(0) = (0, 1, \sqrt{6}, 0, 1, 0)^t, \quad v_6(0) = ((0, 1, -\sqrt{6}, 0, 1, 0)^t.$$

and left eigenvectors

$$z_5(0) = \frac{1}{12}(0, 0, \sqrt{6}, 1, 0, 0)^t,$$

$$z_6(0) = \frac{1}{12}(0, 0, -\sqrt{6}, 1, 0, 0)^t.$$

Now, we will describe the form of the eigenvalues for $\widehat{A}(n)$ for $n \neq 0$. In this case, we have that

$$\beta_3(n) = -\beta_4(n) = \sqrt{\lambda_2(n)} \in \mathbb{C},$$

$$\beta_5(n) = -\beta_6(n) = \sqrt{\lambda_3(n)} \in \mathbb{C}$$

and for $\gamma > 0$ we have that

$$\beta_1(n) = -\beta_2(n) = \sqrt{\lambda_1(n)} \in i\mathbb{R}, \quad 0 \leq |n| \leq n_0,$$

$$\beta_1(n) = -\beta_2(n) = \sqrt{\lambda_1(n)} \in \mathbb{R}, \quad |n| > n_0.$$

A direct computation shows for $1 \leq m \leq 6$ that $\beta_m(n)$ is a single eigenvalue with right eigenvector

$$v_m(n) = \left(in, \beta_m(n), \beta_m^2(n), \beta_m^3(n), \right. \\ \left. -\frac{cn\gamma i}{\Theta_m(n)}, -\frac{cn\gamma\beta_m(n)i}{\Theta_m(n)} \right)^t,$$

where $\Theta_m(n) = \beta_m^2(n) - (\gamma + n^2)$. It is also straightforward to show that left eigenvector $z_m(n)$ is given by

$$z_m(n) = Q(m, n) \left(\frac{q_m(n)}{in\beta_m(n)}, \frac{q_m(n)}{\beta_m^2(n)}, \beta_m(n), 1, \right. \\ \left. -\frac{cn\beta_m(n)i}{\Theta_m(n)}, -\frac{6cni}{\Theta_m(n)} \right),$$

where $q_m(n) = \beta_m^2(n)(\beta_m^2(n) - (6 + n^2))$ and $Q(m, n)$ is taken such that

$$z_m(n)v_l(n) = \delta_m^l.$$

If we introduce the matrices $Z(n)$ and $V(n)$ given by

$$Z(n) = \begin{pmatrix} z_1(n) \\ z_2(n) \\ z_3(n) \\ z_4(n) \\ z_5(n) \\ z_6(n) \end{pmatrix},$$

$$V(n) = (v_1(n), v_2(n), v_3(n), v_4(n), v_5(n), v_6(n)),$$

we have $Z(n) \cdot V(n) = I_6$ and

$$Z(n)\widehat{A}(k)V(k) = \text{diag}(\beta_1(n), \beta_2(n), \beta_3(n), \\ \beta_4(n), \beta_5(n), \beta_6(n)), \quad n \in \mathbb{Z}.$$

Now, we observe that given any vector $\widehat{U}(n) \in \mathbb{R}^6$, we may write

$$\widehat{U}(n) = V(n) \cdot Z(n)\widehat{U}(n) = V(n)U^\#(n),$$

where

$$U^\#(n) = Z(n)\widehat{U}(n) = \begin{pmatrix} U_1^\#(n)U_2^\#(n) \\ U_3^\#(n) \\ U_4^\#(n) \\ U_5^\#(n) \\ U_6^\#(n) \end{pmatrix}.$$

Using this representation, we have for $U = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \widehat{U}(n)e^{inx}$ that

$$\begin{cases} U &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} \sum_{m=1}^6 v_m(n)U_m^\#(k)e^{inx}, \\ \mathcal{A}U &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} \sum_{m=1}^6 \beta_m(n)v_m(n)U_m^\#(n)e^{ikx}. \end{cases} \quad (2.17)$$

We define the projections π_0 and π_1 for $\gamma > 0$ by

$$\pi_0 U = \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \sum_{m=1}^2 v_m(n)U_m^\#(k)e^{inx} \quad (2.18)$$

$$\pi_1 U = \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \sum_{m=3}^6 v_m(n)U_m^\#(k)e^{inx} \\ + \sum_{|n| > n_0} \sum_{m=1}^6 v_m(n)U_m^\#(k)e^{inx}. \quad (2.19)$$

We see directly from the explicit form of the roots of the polynomial p_n that $|\beta_m(n)|$ grows asymptotically linearly in $|n|$. In fact, we must recall that the roots $\lambda_m(n)$ of $\tilde{A}(n)$ for $1 \leq m \leq 3$ depend on the discriminant $D(n)$ of p_n defined as

$$D(n) = Q^3(n) + R^2(n).$$

where Q and R are defined by

$$Q(n) = \frac{3a_1(n) - a_2^2(n)}{9}$$

$$R(n) = \frac{9a_1(n)a_2(n) - 27a_0(n) - 2a_2^3(n)}{54}$$

More concretely, we have the following known result that characterizes the roots for a cubic polynomial

1. if $D(n)$ is positive, then p_n has one real root ($\lambda_1(n)$) and two are complex conjugates ($\lambda_2(n)$ and $\lambda_3(n) = \overline{\lambda_2(n)}$).
2. if $D(n)$ is negative, then p_n has three different real roots, and
3. if $D(n) = 0$, then p_n has three real roots, with two of them are equal ($\lambda_2(n) = \lambda_3(n)$).

Moreover, the roots of the polynomial p_n defined in (2.12) are explicitly given by

$$\lambda_1 = -\frac{1}{3}a_2(n) + (S(n) + T(n)) \tag{2.20}$$

$$\lambda_2 = -\frac{1}{3}a_2(n) - \frac{1}{2}(S(n) + T(n)) + \frac{i\sqrt{3}}{2}(S(n) + T(n)) \tag{2.21}$$

$$\lambda_3 = -\frac{1}{3}a_2(n) - \frac{1}{2}(S(n) + T(n)) - \frac{i\sqrt{3}}{2}(S(n) + T(n)) \tag{2.22}$$

where $S(n)$ and $R(n)$ are numbers defined as

$$S(n) = \sqrt[3]{R(n) + \sqrt{D(n)}}, \quad T(n) = \sqrt[3]{R(n) - \sqrt{D(n)}},$$

such that $S(n) + T(n) \in \mathbb{R}$ and that $S(n) - T(n) \in \mathbb{R}$ for $D(n) \geq 0$, and $S(n) + T(n) \in \mathbb{R}$ and that $S(n) - T(n) \in i\mathbb{R}$ for $D(n) < 0$. In this particular case, we have for $n \neq 0$ that

$$Q(n) = \frac{\gamma^2 - 6\gamma + 36}{9} = -\frac{(\gamma - 3)^2 + 27}{9} < 0$$

$$R(n) = \frac{-81\gamma c^2 n^2 + (6 + \gamma)(\gamma^2 - 15\gamma + 36)}{27}.$$

Using this we see that $Q(n) = O(1)$ and $R(n) = O(n^2)$ for $|n|$ large enough, meaning that $D(n) = O(n^4)$ for $|n|$

large enough, and that $|S(n)| = |T(n)| = O(n^2)$ for $|n|$ large enough. Using previous facts and formulas (2.20)-(2.22) for $|n|$ large enough, we conclude for $1 \leq m \leq 3$ and $|n|$ large enough

$$|\lambda_m(n)| \simeq O(n^2), \tag{2.23}$$

and so, for $|n|$ large enough and $1 \leq m \leq 6$, we have that

$$|\beta_m(n)| \simeq O(|n|). \tag{2.24}$$

Using this fact it is not difficult to verify that in terms of the coefficient vectors $U^\#(n)$ we have the following equivalence of norms:

$$\begin{cases} \|U\|_H^2 \sim \sum_{n \in \mathbb{Z}} (1 + n^2)^2 |U^\#(n)|^2, \\ \|U\|_X^2 \sim \sum_{n \in \mathbb{Z}} (1 + n^2)^3 |U^\#(n)|^2. \end{cases} \tag{2.25}$$

From the equivalences in (2.25) it is evident that π_0 and π_1 are bounded on H and on X with $\pi_0 + \pi_1 = I$, and it is clear that $AX_j \subset H_j$ where $X_j = \pi_j X$ and $H_j = \pi_j H$ for $j = 0, 1$. This yields the spectral decompositions $H = H_0 \oplus H_1$ and $X = X_0 \oplus X_1$.

2.1. Center manifolds of finite dimension and infinite codimension

Here we consider an abstract differential equations of the form

$$\frac{du}{dy}(y) = Au(y) + f(u(y)). \tag{2.26}$$

where X and H are Banach spaces with X densely embedded in H , $A \in \mathcal{L}(X, H)$, the space of bounded linear operators from X to H , and f is continuously differentiable from H into H with $f(0) = 0$ and $Df(0) = 0$. We will assume that the nonlinear part f has the regularizing effect: $f(H) \subset X$. This hypothesis on f is a stronger condition than those imposed in many works related with the existence center manifolds, but this completely natural for the Boussinesq type system considered in this paper. Existence of a local finite dimensional center manifold can be established in the same fashion as the approach used in **Quintero & Pego (2002)** in the case of having a center space with infinite dimension and infinite codimension for the Benney–Luke model. As in the later model, we must observe that the cutoff will be performed in the H norm, and not in the X norm as in **Quintero & Pego (2002)**. This is important since we need to use an energy functional which is defined on H , which is conserved in time for classical solutions (taking values in X), but is indefinite in general. Fortunately for us, this energy controls the H norm for solutions on the center manifold. So, we require obtaining a center manifold that contains solutions with large X norm but small H norm. This is a consequence that the nonlinearity f has a smoothing property, mapping H into X .

We will state the result for the existence of a locally invariant center manifold of classical solutions for the system (2.26) under certain conditions which allow the center subspace (that associated with the purely imaginary spectrum of A) to have finite dimension and infinite codimension. We start with some basic definitions and some hypotheses:

Definition 2.1. Let $J \subset \mathbb{R}$ be an open interval and $u: \mathbb{R} \rightarrow H$ be a function. We say that u is a classical solution of (2.26) on J if the mapping $y \mapsto u(y)$ is continuous from J into X , is differentiable from J into H and (2.26) holds for all $y \in J$.

Let $\beta > 0$, let Y and Z be Banach spaces and U be an open set in Y . We define the Banach spaces $C_b(U, Z)$, $Lip(U, Z)$ and Y^β by

$$C_b(U, Z) := \left\{ f \in C(U, Z) : \sup_{u \in Z} \|f(u)\|_Z < \infty \right\}$$

$$Lip(U, Z) := \{ f \in C(U, Z) : \|f(u) - f(v)\|_Z \leq M_f \|u - v\|_Y \text{ for all } u, v \in U \}$$

$$Y^\beta := \{ u \in C(\mathbb{R}, Y) : \|u\|_{Y^\beta} := \sup_t e^{-\beta|t|} \|u(t)\|_Y < \infty \}.$$

Throughout this section we assume that there are bounded projections π_0 and π_1 on H such that

- (i) $H = H_0 \oplus H_1$ with $H_i := \pi_i(H)$,
- (ii) $\pi_i|_X$ is bounded from X to X , and
- (iii) $AX_i \subseteq H_i$ where $X_i := \pi_i(X)$, for $i = 0, 1$.

We see that equation (2.26) can be rewritten as the first order system

$$\begin{aligned} \frac{d}{dy} u_0(y) &= A_0 u_0(y) + \pi_0 f(u(y)), \\ \frac{d}{dy} u_1(y) &= A_1 u_1(y) + \pi_1 f(u(y)), \end{aligned} \tag{2.27}$$

where $A_i \in \mathcal{L}(X_i, H_i)$ with $A_i y = \pi_i A y$ for $y \in X_i$. We assume the following splitting properties for the operator A_1 , associated with the linear evolution equation $du/dy = Au$.

(H1) There exists $\alpha > 0$ and a positive function M_1 on $[0, \alpha)$ such that for any $\beta \in [0, \alpha)$ and for any $g_1 \in C(\mathbb{R}, X_1) \cap H_1^\beta$ the equation

$$\frac{d}{dy} u_1 = A_1 u_1 + g_1 \tag{2.28}$$

has a unique solution in H_1^β given by $u_1 = K_1 g_1$, where $K_1 \in \mathcal{L}(H_1^\beta)$ with $\|K_1\|_{\mathcal{L}(H_1^\beta)} \leq M_1(\beta)$. Furthermore $\|K_1\|_{\mathcal{L}(X_1^\beta)} \leq M_1(\beta)$.

As done by **J. Quintero** and **R. Pego** in the case of the Benney–Luke model (see **Quintero & Pego (2002)**), we easily have that

Theorem 2.1 (Local Center Manifold Theorem). Let H, X, A, π_0, π_1 and f be as above, and let

$$B(\delta) = \{y \in H_0 : \|y\|_H < \delta\}.$$

Then for all sufficiently small $\delta > 0$ there exists $\phi_\delta: H_0 \rightarrow X_1$ such that

- (i) $\phi_\delta(0) = 0$ and $D\phi_\delta(0) = 0$.
- (ii) $\phi_\delta \in C_b(H_0, X_1) \cap Lip(H_0, X_1)$, and on any ball $B(\delta')$, ϕ_δ has Lipschitz constant $L(\delta')$ satisfying $L(\delta') < \frac{1}{2}$ and $L(\delta') \rightarrow 0$ as $\delta' \rightarrow 0^+$.
- (iii) The manifold $\mathcal{M}_\delta \subset X$ given by

$$\mathcal{M}_\delta := \{ \xi + \phi_\delta(\xi) : \xi \in X_0 \} \tag{2.29}$$

is a local integral manifold for (2.26) over $B(\delta) \cap X_0$. That is, given any $y \in \mathcal{M}_\delta$ there is a continuous map $u: \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{M}_\delta$ with $u(0) = y$, such that for any open interval J containing 0 with $\pi_0 u(J) \subset B(\delta)$ it follows that u is a classical solution of (2.26) on J . Moreover, $u_0 := \pi_0 u$ is the unique classical solution on J with $u_0(0) = \pi_0 y$ to the reduced equation

$$\frac{d}{dy} u_0(y) = A_0 u_0(y) + F_\delta(u_0(y)), \tag{2.30}$$

where $F_\delta: H_0 \rightarrow X_0$ is locally Lipschitz and is given by $F_\delta(w) := \pi_0 f(w + \phi_\delta(w))$.

(iv) For any open interval $J \subset \mathbb{R}$, every classical solution $u_0 \in C^1(J, H_0) \cap C(J, X_0)$ of the reduced equation (2.30) such that $u_0(y) \in B(\delta)$ for all $y \in J$ yields, via $u = u_0 + \phi_\delta(u_0)$, a classical solution u of the full equation (2.26) on J .

(v) The manifold \mathcal{M}_δ contains all classical solutions on \mathbb{R} that satisfy $\|u(y)\|_H \leq \delta$ for all y .

2.2. Linear dynamics analysis.

Now we are interested in establishing the solvability conditions to the linear level. First we consider the center subspace H_0 . We define the bounded C_0 -group $\{S_0(y)\}_{y \in \mathbb{R}}$ on H_0 with infinitesimal generator $\mathcal{A}_0 = A|_{X_0}$ by

$$S_0(y)U = \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \sum_{m=1}^2 v_m(n) U_m^\#(n) e^{\beta_m(n)y} e^{inx}. \tag{2.31}$$

Now, we want to determine the Green function to solve the problem in the hyperbolic subspace H_1 . Let us consider the inhomogeneous linear equation

$$\frac{d}{dy}U(y) = \mathcal{A}_1 U(y) + G(y) \tag{2.32}$$

where $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}|_{X_1}$. We need to observe that $|\Re(\lambda_m(n))| \geq \alpha > 0$ for all $n \in \mathbb{Z}$, except for $m = 1, 2$ when $n \neq 0$. Let $0 \leq \varrho < \alpha$ and let $G \in C(\mathbb{R}, X_1) \cap H_1^\varrho$, where for any Banach space Y ,

$$Y^\varrho = \{u \in C(\mathbb{R}, Y) \mid \|u\|_{Y^\varrho} := \sup_y e^{-\varrho|y|} \|u\|_Y < \infty\}. \tag{2.33}$$

Hereafter we will assume m and n are such that $1 \leq m \leq 6$ and $n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$, or $m = 5, 6$ for $n = 0$. Suppose $U \in C^1(\mathbb{R}, H_1) \cap C(\mathbb{R}, X_1)$ is a solution belonging to H_1^ϱ . Then using the Fourier series expansion in x and multiplying by the matrix $Z(n)$ yields the differential equation

$$\frac{d}{dy}U_m^\#(n, y) = \beta_m(n)U_m^\#(n, y) + G_m^\#(n, y) \tag{2.34}$$

The functions $G_m^\#(n, \cdot)$ and $U_m^\#(n, \cdot)$ belong to \mathbb{R}^ϱ ($Y = \mathbb{R}$ in (2.33)). From the fact that $|\beta_m(n)| \geq \alpha > \varrho$, we conclude necessarily that

$$\begin{cases} U_u^\#(n, y) = \int_\infty^y e^{\beta_u(n)(y-\tau)} G_u^\#(n, \tau) d\tau, \\ U_s^\#(n, y) = \int_{-\infty}^y e^{\beta_s(n)(y-\tau)} G_s^\#(n, \tau) d\tau. \end{cases} \tag{2.35}$$

where for $0 < |n| \leq n_0$ we have $u = 3, 5$ and $s = 4, 6$, and for $|n| > n_0$ we have $u = 1, 3, 5$ and $s = 2, 4, 6$. As a direct consequence any solution of (2.32) in H_1^ϱ is unique. We will see that the formulas (2.35) together with the representation for $U = \pi_1 U$ in (2.19) allow us to establish the existence of a solution in H_1^ϱ . To see this, we decompose equation (2.32) using projections into the "unstable" and "stable" subspaces. The projections for $U \in H$ are

$$\begin{aligned} \pi_u U &= \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \sum_{m=3,5} v_m(n) U_m^\#(n) e^{inx} \\ &\quad + \sum_{|n| > n_0} \sum_{m=1,3,5} v_m(n) U_m^\#(n) e^{inx}. \end{aligned} \tag{2.36}$$

$$\begin{aligned} \pi_s U &= \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \sum_{m=4,6} v_m(n) U_m^\#(n) e^{inx} \\ &\quad + \sum_{|n| > n_0} \sum_{m=2,4,6} v_m(n) U_m^\#(n) e^{inx}. \end{aligned} \tag{2.37}$$

Clearly π_u and π_s are bounded on H and X and $\pi_u + \pi_s = \pi_1$. Now, we introduce a Green's function operator

$S(y)$ defined for nonzero $y \in \mathbb{R}$ by

$$S(y)U = \begin{cases} - \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \sum_{m=3,5} v_m(n) U_m^\#(n) e^{\beta_m(n)y} e^{inx} \\ - \sum_{|n| > n_0} \sum_{m=1,3,5} v_m(n) U_m^\#(n) e^{\beta_m(n)y} e^{inx}, & y < 0, \\ \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \sum_{m=4,6} v_m(n) U_m^\#(n) e^{\beta_m(n)y} e^{inx} \\ + \sum_{|n| > n_0} \sum_{m=2,4,6} v_m(n) U_m^\#(n) e^{\beta_m(n)y} e^{inx}, & y > 0. \end{cases} \tag{2.38}$$

By the definition of the norm in H and X (see (2.25)), we have that

$$\begin{aligned} \|\pi_1 U\|_X^2 &= \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \sum_{m=3}^6 |U_m^\#(n)|^2 \\ &\quad + \sum_{|n| > n_0} \sum_{m=1}^6 (1+n^2)^3 |U_m^\#(n)|^2, \\ \|\pi_1 U\|_H^2 &= \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \sum_{m=3}^6 |U_m^\#(n)|^2 \\ &\quad + \sum_{|n| > n_0} \sum_{m=1}^6 (1+n^2)^3 |U_m^\#(n)|^3. \end{aligned}$$

On the other hand, for $1 \leq m \leq 6$ and $y \neq 0$ and $n \neq 0$, we have that

$$|e^{\beta_m(n)y}| = e^{\Re(\beta_m(n))y} \leq e^{-\alpha|y|}.$$

Using this fact, we see directly for $Y = H$ or X that,

$$\begin{aligned} \|S(y)U\|_Y &\leq (|U_5^\#(0)|^2 + |U_6^\#(0)|^2) e^{\Re(\beta_5(0))y} \\ &\quad + \sum_{n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}} \sum_l |U_l^\#(n)|^2 e^{-2\Re(\beta_l(n))y} \\ &\leq e^{-2\alpha|y|} \|U\|_Y^2. \end{aligned}$$

We also have for $y > 0$ that

$$\sup_{\lambda \geq \alpha} \lambda^{-1} |e^{-\lambda y} - 1| \leq t,$$

$$\sup_{\lambda \geq \alpha} \lambda e^{-\lambda y} = \begin{cases} \alpha e^{-\alpha y}, & \alpha y \geq 1, \\ 1/ey, & \alpha y \leq 1. \end{cases}$$

Following the same type of calculation and using previous facts, one can easily verify that for some constant C (independent of y) we have the following norm bounds:

$$\|S(y)\|_{\mathcal{L}(Y)} \leq C e^{-\alpha|y|} \quad (Y = H \text{ or } X), \tag{2.39}$$

$$\|S(y)\|_{\mathcal{L}(H,X)} \leq \begin{cases} C e^{-\alpha y}, & \alpha|t| \geq 1, \\ C|y|^{-1}, & \alpha|y| \leq 1, \end{cases} \tag{2.40}$$

$$\|S(y) - \pi_s\|_{\mathcal{L}(X,H)} + \|S(-y) + \pi_u\|_{\mathcal{L}(X,H)} \leq Cy, \quad y > 0, \quad (2.41)$$

where $\mathcal{L}(Y)$ and $\mathcal{L}(H, X)$ respectively denote the space of bounded operators on Y , and from H to X . Clearly, we have that $S(y) \rightarrow \pi_s$ (resp. $-\pi_u$) strongly as $y \rightarrow 0^+$ (resp. 0^-). Therefore the families $\{S(y)\}_{y>0}$ and $\{-S(-y)\}_{y>0}$ are analytic semigroups in $\pi_s H$ and $\pi_u H$ respectively ([?, p.62]). Moreover, we also have that S is C^1 from $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ to $\mathcal{L}(H)$ with $dS(y)/dy = A_1 S(y)$. Therefore, we conclude that equation (2.35) yield the formula

$$U(y) = \int_{-\infty}^{\infty} S(y - \tau)G(\tau) d\tau \quad (2.42)$$

for the solution of (2.32). Finally, we need to establish that $U \in C(\mathbb{R}, X)$, $U \in H_1^q$, and dU/dy exists in H and satisfies (2.32). The computations in this case follows as those done for the Benney–Luke equation in [?], but for completeness we include the details. First observe that

$$U(y) = \int_{|s| \leq \alpha^{-1}} S(s)G(y-s) ds + \int_{|s| \geq \alpha^{-1}} S(s)G(y-s) ds.$$

The first term is in $C(\mathbb{R}, X)$ since $G \in C(\mathbb{R}, X)$ and we have the estimate (2.39). Now, since $G \in H^q$, the we may use (2.40) to see that the second integral converges in X uniformly on compact sets in y . Then we have that $U \in C(\mathbb{R}, X)$.

On the other hand, using (2.39) we have for $Y = H$ or X that $U \in Y^q$. In fact, if $G \in Y^q$ then

$$\begin{aligned} e^{-q|y|} \|U(y)\|_Y &\leq C \|G\|_{Y^q} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha|s|+q(|y-s|-|y|)} ds \\ &\leq C \|G\|_{Y^q} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(\alpha-q)|s|} ds \\ &\leq \frac{2C}{\alpha-q} \|G\|_{Y^q}. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Moreover, we have that

$$\|U(y)\|_{Y^q} \leq \frac{2C}{\alpha-q} \|G\|_{Y^q}.$$

It remains to show $U = \pi_s U + \pi_u U$ is differentiable in H and satisfies (2.32). We check in a standard fashion that $\pi_s U$ is differentiable. For $h > 0$ we compute

$$\begin{aligned} \frac{\pi_s U(y+h) - \pi_s U(y)}{h} &= \left(\frac{S(h) - \pi_s}{h} \right) \pi_s U(y) \\ &+ \frac{1}{h} \int_0^h (S(\tau) - \pi_s) G(t+h-\tau) d\tau \\ &+ \frac{1}{h} \int_y^{y+h} \pi_s G(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Using (2.41) and $G \in C(\mathbb{R}, X)$, as $h \rightarrow 0^+$ we deduce that

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0^+} \left(\frac{S(h) - \pi_s}{h} \right) \pi_s U(y) &= A_1 \pi_s U(y), \\ \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{1}{h} \int_y^{y+h} \pi_s G(\tau) d\tau &= \pi_s G(y). \end{aligned}$$

Since we have that $S(y) \rightarrow \pi_s$ strongly as $y \rightarrow 0^+$, the we have that

$$\lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{1}{h} \int_0^h (S(\tau) - \pi_s) G(t+h-\tau) d\tau = 0.$$

Hence the right derivative exists and satisfies $D_+ \pi_s U(t) = A_1 \pi_s U(t) + \pi_s G(t)$, so is continuous into H . It follows that $\pi_s U$ is differentiable. We may treat $\pi_u U$ in a similar way, and conclude that U is differentiable and satisfies (2.32). So, from the Theorem 2.1, we have established that system (2.8) admits a local center manifold having the properties stated in the Theorem.

2.3. Global existence and stability for $\gamma > 0$ and $|c| > 1$ (large enough)

We are now interested in proving global existence of classical solutions on the local center manifold, for initial data that is small in H -norm, which follows from the fact that the zero solution is stable on the center manifold characterized by the graph of a function $\phi_\delta : H_0 \rightarrow X_1$. We use strongly the existence an energy functional that is conserved in time for classical solutions. We define the energy functional $\mathcal{E} : H \rightarrow \mathbb{R}$ by $\mathcal{E}(U) = \mathcal{E}_0(U) + \mathcal{E}_1(U)$, where the quadratic part is

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_0(U) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(-|u_1|^2 - \frac{1}{6} |\partial_x u_1|^2 + |u_2|^2 + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{3} |\partial_x u_2|^2 + \frac{1}{6} |u_3|^2 - |u_5|^2 - \frac{1}{\gamma} |\partial_x u_5|^2 \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{\gamma} |u_6|^2 + 2cu_5 u_1 \right) dx - \frac{1}{6\pi} (u_4, u_2)_{-1,1}, \end{aligned} \quad (2.44)$$

where $(\cdot, \cdot)_{-1,1}$ represents the pairing between \tilde{H}^{-1} and \tilde{H}^1 , and the remaining part is

$$\mathcal{E}_1(U) = \frac{1}{\pi(p+1)} \int_0^{2\pi} u_5 (p u_2^{p+2} - u_1^{p+2}) dx. \quad (2.45)$$

From the definition, \mathcal{E} is a smooth function from H to \mathbb{R} . After multiplying appropriately the equation (2.6) by u_2 and equation (2.7) by u_6 , one can easily verify that if $U \in C^1(\mathbb{R}, H)$ is a classical solution of the first order equation (2.8), then for all $y \in \mathbb{R}$

$$\frac{d}{dy} \mathcal{E}(U(y)) = 0.$$

Even though previous property, this energy can not be used to obtain a solution throughout the variational method since neither \mathcal{E} nor \mathcal{E}_0 is not positive define in the space H . We will see that energy \mathcal{E}_0 is positive on the center space H_0 , and also that this controls the norm of U in H , via the center manifold result. We note that from the definition of the variable $U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)$, we have a priori that $u_1 = \partial_x v$ has mean zero on $[0, 2\pi]$, meaning that $\widehat{U}_1(0) = 0$.

Lemma 2.1. *Let $|c| > 1$ large enough and $\gamma > 0$. Then there is a positive constant $M_0 > 1$ such that for any $U \in H_0$ with $\widehat{U}_1(0) = 0$,*

$$M_0^{-1} \|U\|_H^2 \leq \mathcal{E}_0(U) \leq M_0 \|U\|_H^2. \tag{2.46}$$

Proof. From the Fourier series representation of $U \in H_0$ given with $\widehat{U}_1(0) = 0$, we have that

$$U = \begin{pmatrix} 0 \\ U_2^\#(0) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \begin{pmatrix} in(U_1^\#(n) + U_2^\#(n)) \\ \beta_1(n)(U_1^\#(n) - U_2^\#(n)) \\ \beta_1^2(n)(U_1^\#(n) + U_2^\#(n)) \\ \beta_1^3(n)(U_1^\#(n) - U_2^\#(n)) \\ -\frac{cn\gamma i}{\Theta_1(n)}(U_1^\#(n) + U_2^\#(n)) \\ -\frac{cn\gamma\beta_1(n)i}{\Theta_1(n)}(U_1^\#(n) - U_2^\#(n)) \end{pmatrix} e^{inx} = \widehat{U}(0) + \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \widehat{U}(n)e^{inx}.$$

We also have that $\mathcal{E}_0(U) = \sum_{0 \leq |n| \leq n_0} \mathcal{E}_0(\widehat{U}(n)e^{inx})$. We note that

$$\mathcal{E}_0(\widehat{U}(0)) = |U_2^\#(0)|^2,$$

On the other hand, for $\beta_1(n) = \beta$ we have that

$$\mathcal{E}_0(\widehat{U}(n)e^{inx}) = \Gamma_1(n)|U_1^\#(n) + U_2^\#(n)|^2 + \Gamma_2(n)|U_1^\#(n) - U_2^\#(n)|^2$$

where

$$\Gamma_1(n) = -n^2 - \frac{n^4}{6} + \frac{\beta^4}{6} - \frac{c^2 n^2 \gamma}{\Theta_1^2(n)}(n^2 + \gamma) - \frac{2c^2 n^2 \gamma}{\Theta_1(n)}$$

$$\Gamma_2(n) = |\beta|^2 \left(1 + \frac{n^2}{3} + \frac{c^2 n^2 \gamma}{\Theta_1^2(n)}(n^2 + \gamma) - \frac{\beta^2}{3} \right)$$

Since for $|c| > 1$ (large enough) we have that $\beta_1^2(n) = \lambda_1(n) < 0$ for $0 < n \leq n_0$, then we have the right side of

the second term is positive. Now, for the first term, we use the polynomial equation for $\beta_1(n)$ given in (2.11). First note that

$$-n^2 - \frac{n^4}{6} + \frac{\beta^4}{6} - \frac{c^2 n^2 \gamma}{\Theta_1^2(n)}(n^2 + \gamma) - \frac{2c^2 n^2 \gamma}{\Theta_1(n)} = \frac{L_1 + L_2}{6\Theta_1^2(n)}$$

where L_1 and L_2 are given by

$$L_1 = (\beta^4 - n^2(n^2 + 6))\Theta_1^2(n),$$

$$L_2 = -12c^2 n^2 \gamma \Theta_1(n) - 6c^2 n^2 \gamma (n^2 + \gamma).$$

But we have that

$$L_1 = \beta^8 - 2(n^2 + \gamma)\beta^6 + [(n^2 + \gamma)^2 - n^2(n^2 + 6)]\beta^4 + 2n^2(n^2 + \gamma)(n^2 + 6)\beta^2 - n^2(n^2 + \gamma)^2(n^2 + 6)$$

$$L_2 = -12c^2 n^2 \gamma \beta^2 + 6c^2 n^2 (n^2 + \gamma).$$

Using this, we get that

$$L_1 + L_2 = \beta^8 - 2(n^2 + \gamma)\beta^6 + [(n^2 + \gamma)^2 - n^2(n^2 + 6)]\beta^4 + (2\beta^2 - (n^2 + \gamma))[(n^2 + \gamma)(n^2 + 6) - 6c^2 n^2]n^2.$$

But from (2.11), we have that

$$\beta^6 - (6 + 3n^2 + \gamma)\beta^4 + [(6 + 2n^2)(n^2 + \gamma) + n^2(6 + n^2)]\beta^2 = n^2[(6 + n^2)(n^2 + \gamma) - 6\gamma c^2].$$

Then using that $\beta_1^2(n) < 0$ for $0 < n \leq n_0$, we finally get that

$$L_1 + L_2 = 3\beta^8 - [2(6 + 3n^2 + \gamma) + 3(n^2 + \gamma)]\beta^6 + [2(n^2 + \gamma)(4n^2 + \gamma + 9) + n^2(n^2 + 6)]\beta^4 - (n^2 + \gamma)(n^4 + 2n^2 + 6\gamma)\beta^2 \geq 0.$$

This fact implies that

$$\min_{0 < n \leq n_0} (\Gamma_1(n), \Gamma_2(n)) (|U_1^\#(n) + U_2^\#(n)|^2 + |U_1^\#(n) - U_2^\#(n)|^2) \leq \mathcal{E}_0(\widehat{U}(n)e^{inx}) \leq \max_{0 < n \leq n_0} (\Gamma_1(n), \Gamma_2(n)) (|U_1^\#(n) + U_2^\#(n)|^2 + |U_1^\#(n) - U_2^\#(n)|^2),$$

which implies that

$$\min_{0 \leq n \leq n_0} (\Gamma_1(n), \Gamma_2(n)) (|U_1^\#(n)|^2 + |U_2^\#(n)|^2) \leq \mathcal{E}_0(\widehat{U}(n)e^{inx}) \leq \max_{0 \leq n \leq n_0} (\Gamma_1(n), \Gamma_2(n)) (|U_1^\#(n)|^2 + |U_2^\#(n)|^2),$$

In other words, we have shown that

$$\mathcal{E}(U) \sim \sum_{0 \leq n \leq n_0} (1+n^2)^2 \left(|U_1^\#(n)|^2 + |U_2^\#(n)|^2 \right) \sim \|U\|_H^2.$$

□

The first consequence of this fact is the following result:

Corollary 2.1. *Let $|c| > 1$ large enough and $\gamma > 0$. Then there are $\delta_1 > 0$ and $M_1 > 1$ such that for any $U \in H_0$ with $\widehat{U}_1(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ and $\|U\|_H < \delta_1$,*

$$\frac{1}{M_1} \|U\|_H^2 \leq |\mathcal{E}(U)| \leq M_1 \|U\|_H^2.$$

Proof. First note that from the Hölder inequality with $q = p + 2$, there is some positive constant $C = C(p)$ (independent of U) such that

$$\begin{aligned} |\mathcal{E}_1(U)| &= \left| \frac{1}{\pi(p+1)} \int_0^{2\pi} u_5 (p u_2^{p+2} - u_1^{p+2}) dx \right| \\ &\leq C \|u_5\|_{\widehat{H}^1} \left(\|u_2\|_{\widehat{H}^1}^{p+1} + \|u_1\|_{\widehat{H}^1}^{p+1} \right) \\ &\leq C \|U\|_H^{p+2} \end{aligned}$$

Moreover for some constants C_0 and $C_1 = C_1(p)$ (independent of U), we conclude that

$$\begin{aligned} |\mathcal{E}(U)| &\geq |\mathcal{E}_0(U)| - |\mathcal{E}_1(U)| \\ &\geq C_0 \|U\|_H^2 - C_1 \|U\|_H^{p+2} \\ &\geq \|U\|_H^2 \left(C_0 - C_1 \|U\|_H^p \right). \end{aligned}$$

Let $\delta_1 > 0$ be such that $C_0 - \delta_1^p C_1 > 0$. Then for $\|U\|_H \leq \delta_1$ with $U \in H_0 \setminus \{0\}$ we have that

$$|\mathcal{E}(U)| \geq \|U\|_H^2 \left(C_0 - C_1 \delta_1^p \right).$$

The second claim of this lemma follows directly. In fact, for $U \in H$ we have that

$$\begin{aligned} |\mathcal{E}(U)| &\leq C \left(\|U\|_H^2 + \|U\|_H^{p+2} \right) \\ &\leq C \|U\|_H^2 \left(1 + \|U\|_H^p \right). \end{aligned}$$

□

Now, we are interested in estimating the energy \mathcal{E} on the center manifold. In other words, we want to obtain a similar estimates for the lift of \mathcal{E} to the center manifold \mathcal{M}_δ .

Lemma 2.2. *sl Let ϕ_δ as in Theorem 2.1. Then there exist constants $\delta_2 > 0$ and $C_2 > 1$ such that for all $\xi \in H_0$ with $\|\xi\|_H < \delta_2$ we have*

$$\frac{1}{C_2} \|\xi\|_H^2 \leq \mathcal{E}(\xi + \phi_\delta(\xi)) \leq C_2 \|\xi\|_H^2.$$

Proof. Let us define the functional $\tilde{\mathcal{E}} : H_0 \rightarrow \mathbb{R}$ by

$$\tilde{\mathcal{E}}(\xi) := \mathcal{E}(\xi + \phi_\delta(\xi)),$$

where the function ϕ_δ is defined in Theorem (2.1). First note that $\|\phi_\delta(\xi)\|_H = o(\|\xi\|_H)$. Since \mathcal{E} is smooth and $\mathcal{E}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$, then $\mathcal{E}'(\xi) = O(\|\xi\|_H)$. As a consequence of this fact and that $\mathcal{E}_1(U) = O(\|U\|_H^{p+2})$, we have for $\xi \in H_0$ that

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(\xi + \phi_\delta(\xi)) &= \mathcal{E}_0(\xi) \\ &\quad + O(\|\xi\|_H \|\phi_\delta(\xi)\|_H) + \mathcal{E}_1(\xi + \phi_\delta(\xi)) \\ &= \mathcal{E}_0(\xi) + o(\|\xi\|_H^2). \end{aligned}$$

as $\|\xi\|_H \rightarrow 0$. Then by the previous result, we get the conclusion. □

We first establish that solutions starting in the center manifold are appropriately bounded.

Lemma 2.3. *Let $\xi \in X_0$ be such that $\widehat{\xi}_1(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ and that $\|\xi\|_X \leq \delta_2$. There exists a unique classical solution $U(\xi, \cdot)$ for the full problem (without cutoff) (2.8) on \mathbb{R} with initial condition $\pi_0 \circ U(\xi, \mathbf{0}) = \xi$ such that on any open interval J containing $\mathbf{0}$,*

$$\|U_0(\xi, y)\|_H \leq C_2 \|\xi\|_H \text{ for any } y \in J.$$

Proof. We may assume that δ_2 small enough such that $\delta_2 \ll \delta$. Let $\xi \in X_0$ be such that $\|\xi\|_X \leq \delta_2$. Now, from Theorem 2.1, there exists a unique continuous function U from \mathbb{R} to the local center manifold \mathcal{M}_δ such that $\pi_0(U(\mathbf{0})) = \xi$, which turns out to be a classical solution of the equation (2.8) on any open interval $J \subset \mathbb{R}$ containing $\mathbf{0}$ such that $\|\pi_0(U(y))\|_H \leq \delta$ for any $y \in J$. On the other hand, since U is a classical solution and the energy \mathcal{E} is conserved, then we have for any $y \in J$ that

$$\frac{1}{C_2} \|\pi_0(U(y))\|_H^2 \leq \mathcal{E}(\pi_0(U(y))) = \mathcal{E}(U(\mathbf{0})) \leq C_2 \|\xi\|_H^2,$$

meaning $\|\pi_0(U(y))\|_H \leq C_2 \|\xi\|_H$, for any $y \in J$ as desired. A continuation argument shows that U is a classical solution for the full problem (without cutoff) (2.8) on \mathbb{R} . □

Now we are in position to state the main result on the existence and the stability on the center manifold. The proof of this result follows in the same fashion as the Benney–Luke equation done by **Quintero and Pego** in ?.

Theorem 2.2. (Global Existence and stability on the center manifold) *Let ϕ_δ be given by applying Theorem 2.1 to (2.8). There exist positive constants δ_3 and C_3 such that, for any $\xi \in X_0$ with $\widehat{\xi}_1(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ and $\|\xi\|_H \leq \delta_3$, there is a unique classical solution U on \mathbb{R} to (2.8) such that $\pi_0 U(\mathbf{0}) = \xi$ and $\|U(y)\|_H \leq 2C_2 \|\xi\|_H$ for all $y \in \mathbb{R}$. Moreover, for any $T > \mathbf{0}$ the map taking ξ to U is Lipschitz continuous from H_0 to $C([-T, T], H)$.*

Acknowledgments. J. R. Quintero was supported by the Mathematics Department at Universidad del Valle (Colombia) under the project C.I. 7910.

References

- Grover, M.** (2001). An existence theory for three-dimensional periodic travelling gravity-capillary water waves with bounded transverse profiles. *Physica D* **152**(1): 295–415.
- Grover, M., Mielke, A.** (2001). A spatial dynamics approach to three-dimensional gravity-capillary steady water waves. *Proc. Royal Soc. Edin. A* **131**(1): 83–136.
- Grover, M., Schneider, A.** (2001). Modulating pulse solutions for a class of nonlinear wave equations. *Commun. Math. Phys.* **219**: 489–522.
- Haragus-Courcelle M., Schneider G.** (1999). Bifurcating fronts for the Taylor-Couette problem in infinite cylinders. *Z. Angew. Math. Phys.* **50**: 120–151.
- Kirchgässner, A.** (1982). Wave solutions of reversible systems and applications. *J. Diff. Eqns.* **45**: 113–127.
- Mielke, A.** (1988). Reduction of quasilinear elliptic equations in cylindrical domains with applications. *Math. Meth. Appl. Sci.* **101**: 51–56.
- Mielke, A.** (1991). *Hamiltonian and Lagrangian Flows on Center Manifolds*. Berlin: Springer-Verlag.
- Mielke, A.** (1992). On nonlinear problems of mixed type: a qualitative theory using infinite-dimensional center manifolds. *J. Dyn. Diff. Eqns.* **4** (1): 419–443.
- Pazy, A.** (1983). *Semigroups of Linear Operators and Applications to Partial Differential Equations*. Springer-Verlag, New York.
- Quintero J., Pego R.** (1999). Two-dimensional solitary waves for a Benney-Luke equation. *Physica D* **132**: 476–496.
- Quintero J., Pego R.** (2002). A host of Travelling Waves in a Model of Three-Dimensional Water-Wave Dynamics. *Nonlinear Science* **12**: 59–83.
- Sandstede B., Scheel A.** (1999). An Essential instability of pulses and bifurcations to modulated travelling waves. *Proc. Roy. Soc. Edin. A* **129**: 1263–1290.
- Sandstede B., Scheel A.** (2004). Defects in oscillatory media: Toward a classification. *SIAM J. Appl. Dynam. Syst.* **3**: 1–68.
- Scarpellini, B.** (1990). On nonlinear problems of mixed type: a qualitative theory using infinite-dimensional center manifold. I and II. *J. Appl. Math. Phys. (ZAMP)*. **42**: 289–314.
- Vanderbauwhede, A., and Iooss, G.** (1982). On nonlinear problems of mixed type: a qualitative theory using infinite-dimensional center manifold. I and II. *Dynamics Reported, New Series* **1**: 125–163.
- Vanderbauwhede A.** (1989). Centre manifolds, normal forms and elementary bifurcations. *Dynamics Reported, New Series* **2**: 89-169.

Microestructura y propiedades ópticas de películas de bismuto y óxido de bismuto depositadas con magnetron desbalanceado

Diana María Otálora¹, Giovany Orozco², Jhon Jairo Olaya-Flórez^{2,*}

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

²Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

El bismuto y el óxido de bismuto son materiales de gran interés tecnológico y teórico debido a sus amplias propiedades ópticas y eléctricas. En este trabajo, se fabricaron por medio de la técnica de magnetron desbalanceado (UBM) películas delgadas de bismuto (Bi) y óxido de bismuto (Bi_2O_3) a temperatura ambiente y sobre sustratos de vidrio, con el objeto de evaluar sus propiedades con respecto al método de crecimiento. Las propiedades microestructurales de las muestras se estudiaron mediante difracción de rayos X (*X-ray diffraction*, XRD) y microscopía láser confocal (*confocal laser scanning microscopy*, CLM), en tanto que su composición elemental se analizó con la técnica de espectroscopia de electrones Auger (*Auger electron spectroscopy*, AES) y sus propiedades ópticas con el método de la espectroscopia ultravioleta visible (UV/Vis) en el rango de longitudes de onda de 500 – 1800 nm. Con base en los resultados de XRD se observó que ambos materiales son policristalinos, con una estructura romboédrica para el bismuto y la fase metaestable para el óxido de bismuto. Mediante el análisis de las propiedades ópticas se obtuvieron valores en la banda de energía prohibida de 2,3 eV y 2,27 eV para el bismuto y el óxido de bismuto, respectivamente.

Palabras clave: bismuto, microestructura, óxido de bismuto, propiedades ópticas, magnetron desbalanceado.

Microstructure and optical properties of bismuth and oxide bismuth films using unbalanced magnetron

Abstract

Bismuth and bismuth oxide are materials of technological and theoretical interest because of their optical and electrical properties. Thin films of bismuth (Bi) and bismuth oxide (Bi_2O_3) on glass substrates were produced at room temperature using the unbalanced magnetron sputtering (UBM) technique. The microstructural characterization of samples was studied using x-ray diffraction (XRD) and confocal laser microscopy (CLM), while their elemental composition was analyzed with Auger electron spectroscopy (AES) and their optical properties with ultraviolet-visible (UV/Vis) spectroscopy in the wavelength range of 500 - 1800 nm. XRD results showed that both materials have a polycrystalline character, with a rhombohedral structure for bismuth and phase for bismuth oxide. The energy band gap was 2.3 eV and 2.27 eV for bismuth and bismuth oxide, respectively.

Key words: Bismuth, microstructure, bismuth oxide optical properties, unbalanced magnetron sputtering.

Introducción

El semimetal bismuto es uno de los pocos metales que se expanden al solidificarse; tiene una conductividad térmica menor que la de cualquier otro metal, exceptuando el mercurio; es inerte en el aire seco a temperatura ambiente, pero en un ambiente húmedo se oxida con facilidad, y por encima de su punto de fusión forma rápidamente películas de óxido (Yang, 2008). Cuando el bismuto se crece en la forma de una película delgada exhibe un comportamiento inusual comparado con las propiedades del material en volumen. Un ejemplo de ello se observa en la tendencia de la resistividad *versus* la disminución de la temperatura, lo que está relacionado con el espesor de la película que satura a bajas

temperaturas. El bismuto presenta características particulares, tales como la marcada diferencia en sus propiedades de superficie y volumen, la banda de energía prohibida, la existencia de estados electrónicos superficiales que se cruzan con el nivel de Fermi, una alta movilidad de portadores, su baja masa efectiva, su baja densidad de portadores y un gran camino libre medio, entre otras (Depablos, 2013; Hofmann, 2006). El bismuto es uno de los elementos más usados para aplicaciones en escalas nanométricas como las

*Correspondencia:

Jhon Jairo Olaya-Flórez, jjolaya@unal.edu.co

Recibido: 23 de septiembre de 2014

Aceptado: 28 de enero de 2015

películas delgadas, las nanopartículas, o las multicapas nanoestructuradas (Lutskii, 1965; Sandomirskii, 1967; Dresselhaus, *et al.*, 2003; Hicks & Dresselhaus, 1993; Lin, *et al.*, 2000; Iyengar, *et al.*, 2012; Boffoué, 1998), y puesto que es un metal pesado no contaminante, existe gran interés por desarrollarlo como reemplazo de otros metales pesados, por ejemplo, en electrodos para la detección de metales pesados (Economou, 2005; Xu, 2008).

El óxido de bismuto, Bi_2O_3 , es uno de los óxidos más simples y muchos trabajos se han dedicado al estudio de sus propiedades fisicoquímicas. Con este material se han logrado obtener diferentes estructuras cristalográficas de dimensiones micrométricas y nanométricas llamadas polimorfos. Se caracteriza por ser un conductor iónico, es decir, los iones de oxígeno se mueven fácilmente a través de él, pues tiene una amplia banda de energía prohibida, un alto índice de refracción, una alta permitividad dieléctrica y una buena fotoconductividad. Estas propiedades lo convierten en un buen candidato para su uso en aplicaciones tales como las pilas de combustible, los sensores, los conductores iónicos, los materiales fotoeléctricos, los superconductores de alta temperatura y cerámicas funcionales. También es un componente importante en la manufactura de vidrios cerámicos transparentes, recubrimientos ópticos y cerámicos, entre otras aplicaciones (Bedoya, *et al.*, 2012; Zhang, *et al.*, 2011; Nowak-Wozny, *et al.*, 2009; Wang, *et al.*, 2011; Schuisky & Harsta, 1996; Li, *et al.*, 2007; Lee, *et al.*, 2005).

En este trabajo se depositó bismuto y óxido de bismuto (Bi_2O_3) en forma de películas delgadas mediante el sistema de magnetron desbalanceado (*unbalanced magnetron*, UBM). Se estudiaron sus propiedades estructurales por medio de las técnicas de difracción de rayos X y microscopía óptica confocal; su composición se analizó con espectroscopia Auger y las propiedades ópticas con la técnica de espectroscopia ultravioleta visible (UV/Vis). Todo ello con el objeto de evaluar sus fases y estructura, así como su comportamiento óptico con respecto a las propiedades que dependen del método de crecimiento reportadas en la bibliografía.

Materiales y métodos

Las películas delgadas de bismuto y óxido de bismuto se fabricaron en un sistema de *sputtering* con magnetron desbalanceado sobre sustratos de vidrio a temperatura ambiente, los cuales se limpiaron con acetona e isopropanol en ultrasonido antes de la deposición. Para generar la descarga se utilizó un blanco de bismuto (99,999 % de pureza) con un diámetro de 10,1 cm. Para el crecimiento de los recubrimientos de bismuto se usó un ambiente gaseoso de argón de pureza ultra alta, y para el caso del óxido del bismuto, una mezcla de argón y oxígeno en una proporción de 20 a 80. En la tabla 1 se resumen los parámetros para la deposición utilizados en la fabricación de las películas delgadas.

Tabla 1. Condiciones de deposición para la fabricación de las películas delgadas de bismuto y óxido de bismuto

Parámetro	Valor para bismuto	Valor para óxido de bismuto
Potencia	40 W	40 W
Distancia sustrato blanco	50 mm	50 mm
Presión base	$\sim 9 \times 10^{-4} Pa$	$\sim 9 \times 10^{-4} Pa$
Presión trabajo	$\sim 0,5 Pa$	$\sim 0,5 Pa$
Flujo de gas (argón)	9 sccm	(80 % argón – 20 % oxígeno) 9 sccm

El espesor de las películas se midió con un perfilómetro Dektak 150. Los tiempos de depósito se optimizaron para obtener un espesor final de las películas de aproximadamente 120 nm.

Para la caracterización microestructural se hicieron medidas de difracción de rayos X (XRD) usando el equipo X-pert PRO PANalytical en el modo Bragg-Brentano, y con la línea monocromática $K\alpha$ del cobre, cuya longitud de onda es de 1.540998 Å, una corriente de trabajo de 40 mA, y una diferencia de potencial de 45 kV. La morfología de las películas se estudió con un microscopio óptico confocal Zeiss LSM 700 con poder de resolución máximo de 250 nm y una longitud de onda de 405 nm. Para el análisis composicional de las muestras se usó el equipo de espectroscopia de electrones Auger (AES) de la marca Omicron Nanotechnology que cuenta con un espejo cilíndrico analizador (*cylindrical mirror analyzer*, CMA) de 3 KeV. Para la caracterización óptica se utilizó un espectrofotómetro Cary 5000 UV-Vis-NIR de alto rendimiento en la gama de 175 a 3.300 nm, en condiciones de presión atmosférica normal y temperatura ambiente. Este sistema es controlado por el programa Cary WinUV basado en Windows. El rango de longitudes de onda fue de 500 a 1.800 nm.

Resultados y discusión

Caracterización microestructural

En la figura 1 se muestra el espectro de difracción de rayos X obtenido para la película de bismuto. En general, las películas presentaron una estructura romboédrica ($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$), con una orientación mixta en varios planos cristalinos que se resumen en la tabla 2. Los parámetros de red presentaron valores de: $a=4,5839 \text{ \AA}$, $b=4,5839 \text{ \AA}$, $c=12,1642 \text{ \AA}$, menores a los reportados en el material en bulto (se utilizó como referencia la ficha del código 01 – 085 – 1331), lo cual es un indicativo de tensiones residuales en la película. Esto también se corroboró con el cambio de las posiciones de los picos experimentales con respecto a los picos de difracción del patrón de referencia y puede explicarse por los efectos de re-nucleación y los defectos producto de la ausencia de condiciones de equilibrio en el crecimiento del recubrimiento (Albella, 2003).

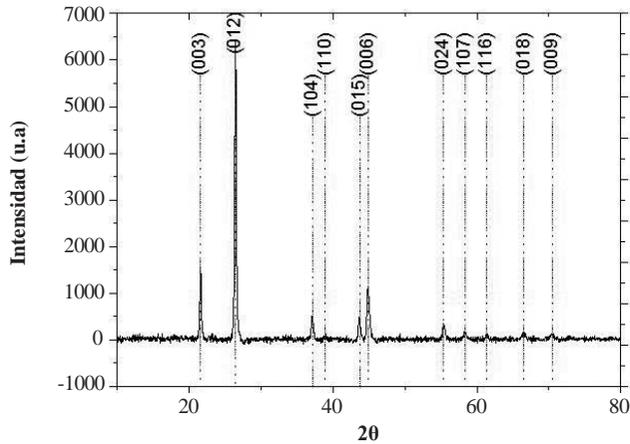


Figura 1. Patrón de difracción de rayos X para una muestra representativa de bismuto depositado por *sputtering* con magnetrón desbalanceado. Se presentan los índices de Miller correspondientes a los planos cristalinos asociados al material.

Tabla 2. Posiciones y planos de difracción en el bismuto obtenidos a partir del espectro XRD mostrado en la figura 1

(hkl)	Experimental 2θ	Referencia 2θ	Incertidumbre (%)
0 0 3	21,578	22,593	4,489001018
0 1 2	26,417	27,266	3,110467249
1 0 4	37,080	38,135	2,765963026
1 1 0	38,967	39,737	1,935475753
0 1 5	43,646	44,78	2,531040643
0 0 6	44,855	46,13	2,762410579
0 2 4	55,332	56,252	1,634253004
1 0 7	58,303	59,658	2,269771028
1 1 6	61,285	62,483	1,916681337
0 1 8	66,418	67,836	2,090335515
0 0 9	70,358	71,983	2,257060695

El patrón de difracción para la muestra de óxido de bismuto se muestra en la figura 2, y las direcciones y ángulos de difracción más importantes del espectro se resumen en la tabla 3. Se puede observar que las muestras de óxido de bismuto son policristalinas con una orientación mixta que corresponde a la fase de acuerdo con el PDF (Powder Diffraction File) de referencia 01 – 078 – 1793, por lo que tiene una estructura tetragonal ($\alpha=\beta=\gamma=90$). También se observó la presencia de bismuto sin oxidar con la misma estructura observada en la figura 1. Las constantes de red para el óxido de bismuto presente en estas muestras fueron de: $a=8,1747 \text{ \AA}$, $b=8,1747 \text{ \AA}$, $c=5,4110 \text{ \AA}$.

Debido a la cercanía de los picos principales en el espectro de difracción de rayos X que presentan los distintos polimorfos del bismuto, las muestras de se analizaron por microscopía Raman con el objeto de confirmar su composición en fases. En la figura 2b se muestra un espectro Raman para el óxido de bismuto crecido por *sputtering* con magnetrón desbalanceado.

Al igual que en el caso de lo encontrado en las muestras de bismuto, las películas delgadas de óxido de bismuto también presentaron tensiones residuales, lo cual se comprobó por el corrimiento de los picos en el patrón de difracción, es decir, por el cambio de las constantes de red.

Microscopia láser confocal

En la figura 3a y b se muestra una micrografía con CLM de una muestra de bismuto y en la figura 3c y d la correspondiente a una muestra de óxido de bismuto, $\beta - Bi_2O_3$. Los aumentos de 500 X y 1000 X permitieron observar que las superficies eran homogéneas con presencia de capas o imperfecciones probablemente asociadas al proceso de deposición de estos tipos de recubrimientos. Con el análisis se obtuvo una rugosidad lineal media (Figura 3b) (calculada sobre la línea roja en la imagen de la figura 3b) de $R_{al} \approx 0,033 \mu m$, y una rugosidad superficial (calculada sobre toda el área mostrada

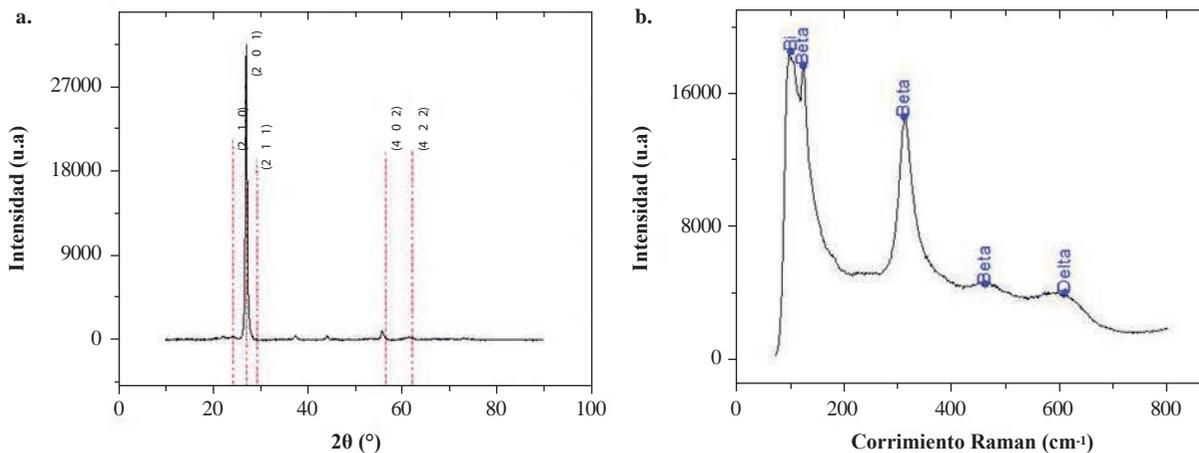


Figura 2. a. Patrón de difracción experimental de una muestra representativa de óxido de bismuto. Se muestran los picos correspondientes al óxido de bismuto en su fase β . **b.** Espectro Raman de una película delgada de óxido de bismuto depositado por *sputtering* con magnetrón desbalanceado. Se muestran los picos presentados etiquetados con sus respectivas fases.

Tabla 3. Reporte de las posiciones y planos cristalinos para el óxido de bismuto obtenidos a partir del espectro XRD mostrado en la figura 3

(hkl)	Experimental 2θ	Referencia 2θ	Incertidumbre (%)
2 1 0	24,237	25,713	5,739898106
2 0 1	26,998	27,945	3,386294507
2 1 1	29,288	30,278	3,268709954
4 0 2	56,498	57,752	2,171353373
4 2 2	62,203	62,975	1,224454148

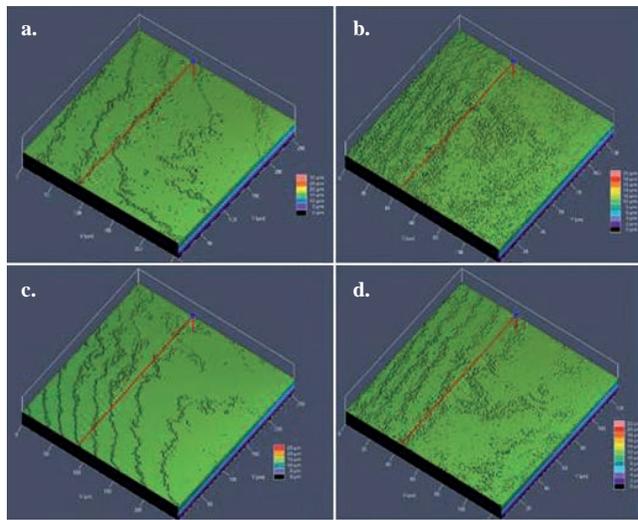


Figura 3. Microscopía confocal para una muestra de bismuto: **a.** 500X (250 × 250 μm) y **b.** 1000X (120 × 120 μm), y una muestra de óxido de bismuto β: **c.** 500X (250 × 250 μm) y **d.** 1000X (120 × 120 μm).

en la figura 3b) de 120 × 120 μm, de $R_{aA} \approx 0,096 \mu m$. Las muestras de óxido de bismuto presentaron valores de rugosidad lineal y superficial (obtenidas a partir de la figura 3d) de: $R_{aL} \approx 0,028 \mu m$ y $R_{aA} \approx 0,092 \mu m$. Nótese que ambos

depósitos mostraron una baja rugosidad, lo que se refleja en su apariencia física de brillo metálico tipo espejo; sin embargo, los recubrimientos de óxido de bismuto son, en general, menos rugosos que los de bismuto, lo que puede deberse a la disminución de la cantidad de partículas no fundidas en la superficies del óxido de bismuto, las cuales se forman durante el proceso de deposición debido al bajo punto de fusión del bismuto.

Composición química

En la figura 4a se muestra el espectro de electrones Auger de una muestra de bismuto. La energía cinética del electrón emitido fue igual a la energía electrónica Auger, dada por la posición del pico en el espectro, E_{WXY} , resultante de la diferencia entre las energías de enlace de los niveles electrónicos involucrados en el proceso:

$$E_{WXY} = E_X - E_W - E_Y \tag{1}$$

Para asignar a cada pico el elemento, así como su transición Auger, se usaron los datos tabulados en la literatura (Watts, 2003). Se puede observar que la mayoría de los picos corresponden al bismuto, a excepción de los correspondientes al silicio, el cual es del sustrato. Para obtener información del porcentaje en peso de cada elemento de la muestra por medio de la espectroscopia Auger, se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$x_i = \frac{y_i / s_i}{\sum_a y_a / s_a} \times 100, \tag{2}$$

donde x_i es la concentración en % en peso del elemento i , s_i es el factor de sensibilidad AES para el elemento i , en tanto que y_i es la intensidad del pico. Los valores de la sensibilidad se encuentran tabulados (Watts, 2003). Así, la muestra resultó estar compuesta de 99 % de bismuto y 1 % de silicio.

Las posiciones de los picos, el elemento correspondiente, la transición que produce el electrón Auger y la energía de enlace obtenidos a partir de la figura 4a, se muestran en la tabla 4. Estas transiciones concuerdan con lo encontrado por

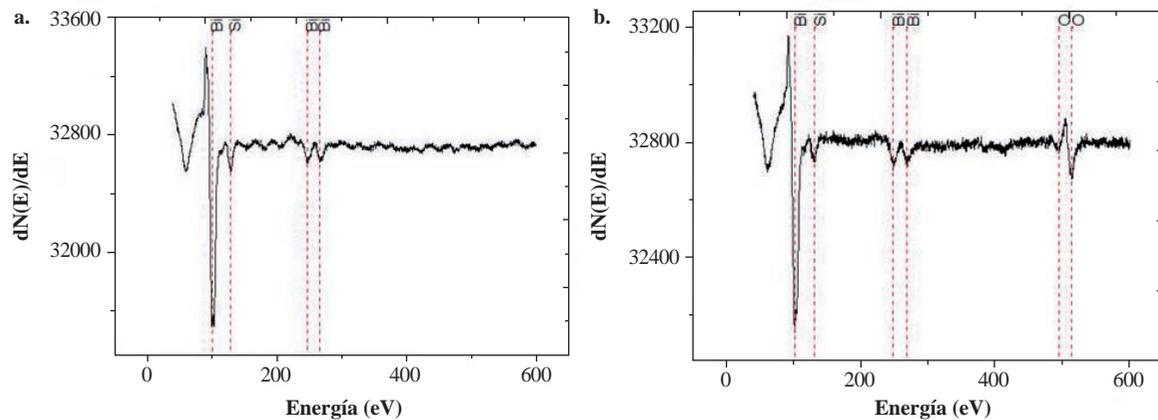


Figura 4. Espectro Auger para una muestra de: **a.** bismuto, **b.** óxido de bismuto. Se describen las señales de Bi (Bismuto), Si (Silicio) y O (Oxígeno).

Tabla 4. Energías de enlace para las muestras de bismuto y óxido de bismuto según la figura 4

Bismuto (figura 4 a)			
Elemento	Posición del pico eV	Transición	Energía de enlace
Bismuto	101,74	N ₇ O ₄ O ₄	104
Silicio	128,8	L ₁ M ₁ M ₁	133
Bismuto	247,15	N ₅ O ₃ O ₃	254
Bismuto	267,02	N ₄ O ₃ O ₃	278
Óxido de bismuto (figura 4 b)			
Bismuto	101,2	N ₇ O ₄ O ₄	104
Silicio	130,8	L ₁ M ₁ M ₁	133
Bismuto	247,6	N ₅ O ₃ O ₃	254
Bismuto	268,4	N ₄ O ₃ O ₃	278
Oxígeno	493,7	KL ₁ L ₁	484
Oxígeno	513,9	KL ₃ L ₃	518

Jovalekic, *et al.*, 2009). Como se mencionó anteriormente, la asignación de un elemento a cada pico se hace por medio de los datos tabulados (Watts, 2003).

En la figura 4b se ve el espectro Auger para una muestra de óxido de bismuto. De acuerdo con los cálculos de la composición química, la muestra estaba compuesta de un 85 % de bismuto, un 14 % de oxígeno y un 1 % de silicio proveniente del sustrato. La lista de posiciones de los picos, del elemento correspondiente, la transición y la energía de enlace se muestran en la tabla 4.

Caracterización óptica

El espectro de transmisión para la muestra de bismuto depositada sobre vidrio se muestra en la figura 5a. Esta medición se realizó en el rango de longitudes de onda de 500–1.800 nm. Debido a la apariencia física de las muestras, que resultaron tener un brillo metálico, se esperaba que la transmitancia fuera baja, al menos en el rango de longitudes de onda visibles. Esto se confirmó con los resultados de transmitancia; además, la absorbancia de la muestra también resultó ser baja, ya que se encontró dentro del rango de 1,1 a 1,5 %.

Como puede observarse, la mayor parte de la radiación electromagnética incidente sobre la muestra es reflejada, una parte es transmitida y otra pequeña porción es absorbida. Así, cuando la transmisión disminuye, la reflexión y la absorción incrementan; también se puede observar que en el mínimo de transmisión se presenta un máximo en la reflexión y en la absorción.

Teniendo en cuenta la relación que hay entre el coeficiente de transmisión y el coeficiente de absorción óptica (Bhattacharyya, *et al.*, 2009; Swanepoel, 1983), se tiene que:

$$T = \exp(-\alpha d),$$

donde T es la transmitancia, α es el coeficiente de absorción y d es el espesor de la muestra. Sin embargo, primero hay que tener una buena aproximación del espesor real de la muestra, para lo cual se emplea el método propuesto por Bhattacharyya, *et al.* (2009). En resumen, este método consiste en el cálculo de las constantes ópticas por medio del espectro de transmisión de una muestra mediante el modelo de Kramer–Kronig, con el fin de relacionar el índice de refracción con el coeficiente de absorción. Una vez obtenidos estos valores, se realiza un proceso de iteración por medio del cual se calcula teóricamente la transmisión en función de la longitud de onda. Al comparar estos valores teóricos de la transmisión con los resultados experimentales se obtiene una buena aproximación del valor del espesor de la muestra. Ahora bien, el valor de la banda de energía prohibida óptica se puede calcular con la siguiente ecuación (Bhattacharyya, *et al.*, 2009; Jayachandran, 1997):

$$\alpha(h\nu) = \frac{(h\nu - E_g)^n}{h\nu},$$

donde $h\nu$ es la energía de los fotones incidentes, E_g es la banda de energía prohibida óptica entre la banda de valencia y la banda de conducción y n es el exponente que caracteriza la transición electrónica, ya sea directa o indirecta. Así, n es 1/2, 3/2, 2 y 3 para transiciones directas permitidas, directas prohibidas, indirectas permitidas e indirectas prohibidas, respectivamente. En este trabajo se analizó el caso de las transiciones directas permitidas, es decir, $n = 1/2$.

Así, E_g se obtiene graficando $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ y extrapolando la sección lineal de esta gráfica hasta cero (Figura 5b). Como resultado, se obtuvo que para el bismuto:

$$E_g = 2,3 \pm 0,01 \text{ eV}.$$

Este valor calculado es mucho menor al reportado por la literatura (Sandomirskii, 2003) para películas delgadas de bismuto depositadas por evaporación térmica con un espesor de aproximadamente 150 nm, para las cuales $E_g = 4,4 \text{ eV}$ (Jayachandran, 1997), y para películas de bismuto depositadas por sputtering con $E_g = 4,0 \text{ eV}$ (Ortiz, 2012; El-Sayed, 2006). Una posible explicación para este valor de banda de energía prohibida es la rugosidad del material: una superficie con una rugosidad alta genera una mayor cantidad de dispersión de fotones y, por lo tanto, a mayor rugosidad el valor de la energía de la banda de energía prohibida es menor, como también lo es la absorbancia (Ortiz, 2012). Por otro lado, un corrimiento en el valor puede deberse a vacancias reticulares, ya que las películas que contienen vacancias tendrán una mayor energía de banda de energía prohibida (Ortiz, 2012).

Por último, como resultado de la aplicación del método de Bhattacharyya, *et al.* (Figura 5c), se obtuvo un espesor de la muestra de bismuto de $114,3 \pm 0,7 \text{ nm}$, el cual difiere ligeramente del medido por perfilometría: $121,6 \pm 0,1 \text{ nm}$.

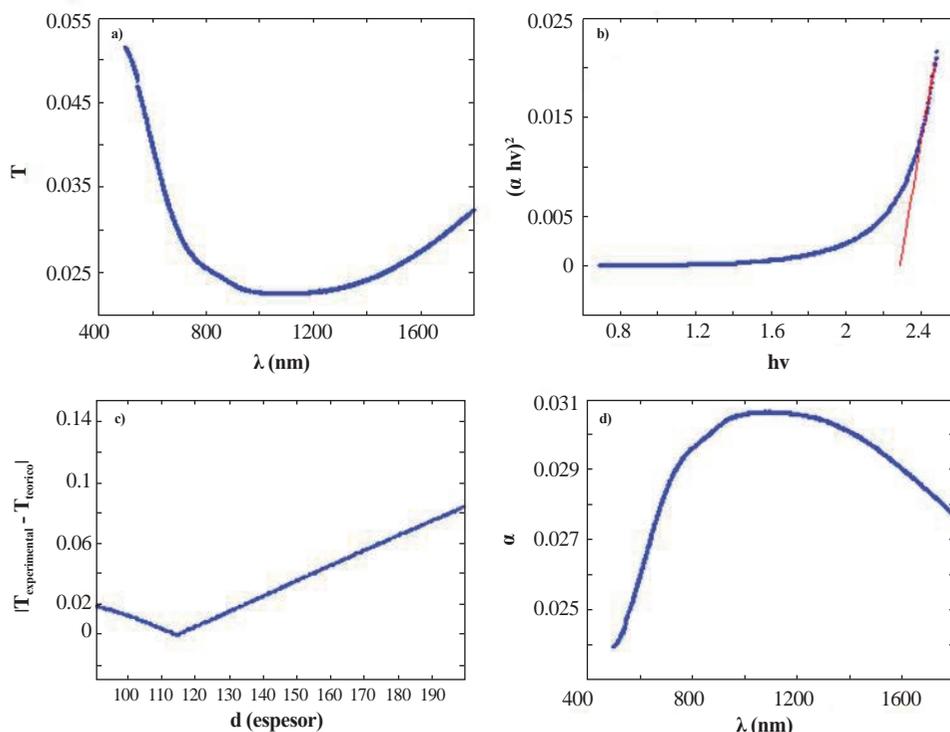


Figura 5. a. Transmitancia en función de la longitud de onda para el bismuto crecido por *sputtering* con magnetrón desbalanceado. b. Gráfica para el cálculo de la banda de energía prohibida en el recubrimiento de bismuto. c. Comparación entre la transmitancia teórica y la experimental. d. Coeficiente de absorción en función de la longitud de onda $\alpha(\lambda)$ para el bismuto depositado por *sputtering* con magnetrón desbalanceado.

Tabla 5. Porcentaje de error entre el espesor teórico (medido por perfilometría) y la energía de la banda de energía prohibida con los valores obtenidos experimentalmente

	Espesor (nm)	Energía de banda de energía prohibida (eV)
Experimental	114,3	2,3
Teórico	121,6	4,0
% de error	6	42,5

Con estos valores se determinó el coeficiente de absorción como función de la longitud de onda para el bismuto, tal como se muestra en la figura 5d. En la tabla 5 se resumen los resultados para el bismuto.

El espectro de transmisión para el óxido de bismuto crecido en este trabajo se muestra en la figura 6a. La transmitancia para el óxido de bismuto fue baja y menor que la presentada por la muestra de bismuto; además, la transmisión aumentó con el incremento de la longitud de onda, a diferencia del bismuto, en el que fue mayor en los extremos de longitudes de onda y tuvo un mínimo para las longitudes de onda media. Esto podría implicar una baja absorción o reflexión en longitudes de onda altas. Al igual que las muestras de bismuto, el óxido de bismuto β resultó tener un brillo metálico, es decir, una alta reflexión, por lo que su absorción también fue baja, aunque mayor que la del bismuto.

Al analizar estos resultados se pudo calcular el valor de E_g para el óxido de bismuto:

$$E_g = 2,27 \pm 0,02 \text{ eV.}$$

Este es un valor ligeramente menor al obtenido para la muestra de bismuto. El valor de la banda de energía prohibida directa calculado en este trabajo fue muy cercano al reportado en la literatura (Jayachandran, 1997; He, et al., 2007; Fan, et al., 2006; Iljin, et al., 2010; Leontie, et al., 2005; Patil, et al., 2007; Patil, et al.; Yadav, et al., 2007; Sirota, et al., 2012), el cual es de aproximadamente 2,46 eV. Cabe aclarar que, según la técnica de preparación empleada, llegan a predominar ciertas fases del óxido de bismuto. La banda de energía prohibida directa de este material puede variar entre 2 eV y 3,96 eV (Gujar, et al., 2006). Más específicamente, para la fase $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ el rango de variación de la banda de energía prohibida es de 2,47–3,4 eV (Gujar, et al., 2006). Con dicho valor es de esperarse que este material sea un poco mejor conductor que el bismuto puro.

Continuando con los cálculos, como puede verse en la figura 6b, el valor del espesor de la película de óxido de bismuto es de $129,6 \pm 0,7$ nm, el cual difiere un poco del valor medido por perfilometría: $127,7 \pm 0,1$ nm.

El coeficiente de absorción para el óxido de bismuto como una función de la longitud de onda, se muestra en la figura 6c. La pequeña transmisión (Figura 6a) y la falta de interferencia en

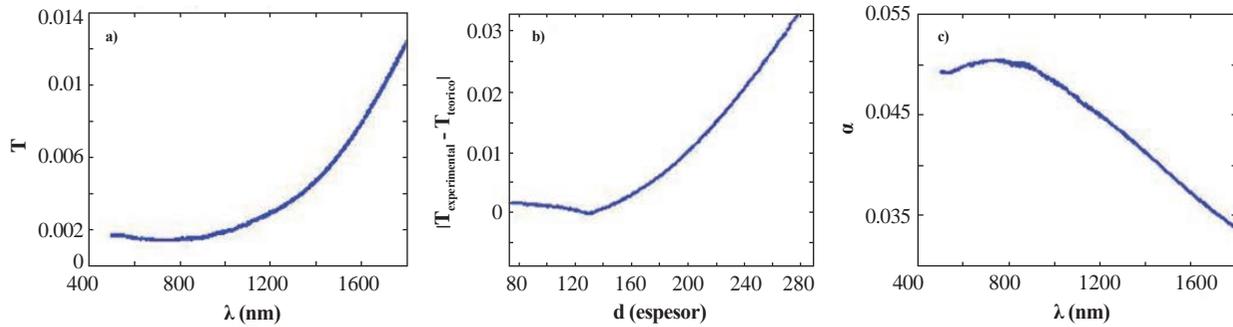


Figura 6. a. Transmisión en función de la longitud de onda para una muestra de óxido de bismuto depositada por *sputtering* con magnetrón desbalanceado. **b.** Curva utilizada para obtener el espesor de la película. **c.** Coeficiente de absorción en función de la longitud de onda para el óxido de bismuto depositado por *sputtering* con magnetrón desbalanceado.

Tabla 6. Comparación de los valores teóricos y los experimentales del espesor y la energía de la banda de energía prohibida del óxido de bismuto

	Espesor (nm)	Energía del band gap (eV)
Experimental	129,6	2,27
Teórico	127,7	2,46
% de error	1,5	7,7

el espectro puede ser consecuencia de que una gran fracción del material depositado sobre el sustrato de vidrio tiene una estructura amorfa, o puede relacionarse con un mayor grado de reflectancia o dispersión que de absorción (Hjinas, *et al.*, 2010). Es claro que en el presente caso la conclusión tanto de los resultados de caracterización estructural por difracción de rayos X como de los obtenidos para las propiedades ópticas apunta a que la poca transparencia de las películas crecidas está más relacionada con una gran reflectancia que con la absorción. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Hjinas, *et al.* (2010) para películas de óxido de bismuto depositadas por *sputtering* de corriente directa, a pesar de que en ese caso la composición en fase de la muestra es una combinación de las fases α y δ .

En la tabla 6 se comparan los resultados obtenidos con los registrados como valores teóricos.

Conclusiones

Se prepararon películas delgadas de bismuto y óxido de bismuto mediante la técnica de *sputtering* con magnetrón desbalanceado. Con base en los análisis de difracción de rayos X, se concluyó que el bismuto presentaba la típica estructura romboédrica y los depósitos de Bi_2O_3 estaban compuestos principalmente de la fase tetragonal $\beta-Bi_2O_3$. Por medio de espectroscopia Raman también se observó la presencia de la fase $\delta-Bi_2O_3$. El análisis óptico mostró que tanto las muestras de bismuto como las de óxido de bismuto fueron altamente reflectivas, presentando una baja transmisión y un bajo índice de absorción. Sin embargo, las muestras de óxido de bismuto

obtenidas por tratamiento térmico mostraron mayor transmisión y menor reflexión comparadas con las de bismuto. La película delgada de óxido de bismuto en su composición $\beta + \delta$, en donde la fase beta es la dominante, presentó una energía de la banda de energía prohibida de 2,27 eV, menor que la del bismuto, la cual fue de 2,3 eV. Para el caso del depósito de bismuto, la energía prohibida resultó ser menor a lo reportado en la literatura. Este comportamiento probablemente se debe a la rugosidad de la muestra producto de la presencia de partículas no fundidas sobre su superficie. Otra explicación podría ser la poca presencia de vacancias de oxígeno.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

Albella, J.M. 2003. Láminas delgadas y recubrimientos. Preparación, propiedades y aplicaciones. Editorial CSIC - CSIC Press. España. pp.101-123.

Bedoya, C. M., Pinzón, M.J., Orjuela, J.E.A., Restrepo, E., Olaya, J.J. 2012. Physical-chemical properties of bismuth and bismuth oxides: Synthesis, characterization and applications. *Dyna*, **79** (176): 139-148.

Bhattacharyya, S.R., Gayen, R.N., Paul, R., Pal, A.K. 2009. Determination of optical constants of thin films from transmittance trace. *Thin Solid Films*. **517**: 5530-5536. Disponible en: www.sciencedirect.com.

Boffoué, M. O., Lenoir, B., Scherrer, H., Dauscher, A. 1998. Pulsed laser deposition of bismuth in the presence of different ambient atmospheres. *Thin Solid Films*. **322**: 132-137. Disponible en: www.sciencedirect.com.

Depablos, O. L. 2013. Estabilidad estructural de películas delgadas de óxido de bismuto ($\delta-Bi_2O_3$). (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.

Dresselhaus, M.S., Lin, Y.M., Rabin, O., Jorio, A., Souza Filho, A.G., Pimenta, M.A., Saito, R., Samsonidze, G., Dresselhaus, G. 2003. Nanowires and nanotubes. *Materials Science and Engineering: C* **23**: 129-140. Disponible en: www.sciencedirect.com.

- Economou, A.** 2005. Bismuth – film electrodes: Recent developments and potentialities for electroanalysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. **24**: 334-340. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- El-Sayed, N.Z.** 2006. Physical characteristics of thermally evaporated bismuth thin films. *Vacuum*. **80**: 860-863. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Fan, H.T., Pan, S.S., Teng, X.M., Ye, C., Li, G.H., Zhang, L.D.** 2006. δ -Bi₂O₃ thin films prepared by reactive sputtering: Fabrication and characterization. *Thin Solid Films*. **513**: 142-147. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Gujar, T.P., Shinde, V.R., Lokhande, C.D.** 2006. Spray pyrolysed bismuth oxide thin films and their characterization. *Materials Research Bulletin*. **41**: 1558-1564. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Hicks, L.D. & Dresselhaus, M.S.** 1993. Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor. *Physical Review*. **B 47**: 16631
- Hofmann, P.** 2006. The surfaces of bismuth: Structural and electronic properties. *Progress in Surface Science*. **81**: 191-245. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Iljinas, A., Burinskas, S., Dudonis, J.** 2010. Synthesis of Bismuth Oxide Thin Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering. *Proceedings of the VIII International Conference ION 2010, Kazimierz Dolny, Poland, June 14-17*.
- Iyengar, A. S., Liang, D., Xuan, P.A., Abramson, A. R.** 2012. Densification effects on the electrical behavior of uniaxially compacted bismuth nanowires. *Acta Materialia*. **60**: 2369-2378. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Jayachandran, K.** 1997. *Optical Studies in Bismuth, Antimony, Bismuth Oxide and Antimony Oxide Thin Films*. (Thesis for awarding the degree of Doctor of Philosophy in Physics). Mahatma Gandhi University. School of Pure and Applied Physics.
- Jovalekić, C., Zdujić, M., Atanasoska, Lj.** 2009. Surface analysis of bismuth titanate by Auger and X-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of Alloys and Compounds*. **469**: 441-444. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Lee, J.H., Ohara, S., Nagashima, T., Hasegawa, T., Sugimoto, N., Igarashi, K., Katoh, K., Kikuchi, K.** 2005. Clock Recovery and Demultiplexing of High-Speed OTDM Signal Through Combined Use of Bismuth Oxide Nonlinear Fiber and Erbium-Doped Bismuth Oxide Fiber. *IEEE Photonic Tech L*. **17**: 2658-2660. Disponible en: www.ieeexplore.ieee.org.
- Leontiea, L., Caramanb, M., Visinoiuc, A., Rusua, G.I.** 2005. On the optical properties of bismuth oxide thin films prepared by pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*. **473**: 230-235. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Li, L., Yang, Y., Fang, X., Kong, M., Li, G., Zhang, L.** 2007. Diameter-dependent electrical transport properties of bismuth nanowire arrays. *Communications*. **141**: 492-496. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Lin, Y.M., Sun, X., Dresselhaus, M.S.** 2000. Theoretical investigation of thermoelectric transport properties in cylindrical Bi nanowires. *Physical Review*. **B 62**: 4610.
- Lutskii, V.N.** 1965. Features of optical absorption of metallic films in region where metal turns into a dielectric. *Soviet Physics JETP Letters*. **2**: 245.
- Nowak-Wozny, D., Janiczek, T., Mielcarek, W., Gajewski, J.B.** 2009. Fractional electrical model for modified bismuth oxide. *J. Electrostatics*. **67**: 18-21. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Ortiz, M. F.** 2012. *Recubrimientos de bismuto depositados por la técnica sputtering D.C. pulsado*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica y Mecatrónica. Bogotá D.C.
- Patil, R.B., Yadav, J.B., Puri, R.K., Puri, V.** 2007. Optical properties and adhesion of air oxidized vacuum evaporated bismuth thin films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. **68**: 665-669. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Patil, R.B., Puri, R.K., Puri, V.** 2007. Oxidation temperature dependent optical properties of bismuth oxide thin films: Effect of vapour chopping and air exposure. *Applied Surface Science*. **253**: 8682-8688. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Sandomirskii, V.B.** 1967. Quantum size effect in a semimetal film. *Soviet Physics JETP*. **25**: 101.
- Schuisky, M. & Harsta, A.** 1996. Epitaxial growth of Bi₂O_{2.33} by halide Cvd. *Chem. Vap. Depos.* **2** (6): 235-238.
- Sirota, B., Reyes-Cuellar, J., Kohli, P., Wang, L., McCarroll, M.E., Aouadi, S.M.** 2012. Bismuth oxide photocatalytic nanostructures produced by magnetron sputtering deposition. *Thin Solid Films*. **520**: 6118-6123. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Swanepoel, R.** 1983. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **16**: 1214-1222. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Wang, Y., Zhao, J., Wang, Z.** 2011. A simple low-temperature fabrication of oblique prism-like bismuth oxide via a one-step aqueous process. *Colloid Surface A*. **377**: 409-413. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Watts, J. F. & Wolstenholme, J.** 2003. *An Introduction to Surface Analysis by XPS and AES*. Wiley. Chichester, Inglaterra. Cap. 1: 1-17; Cap. 3: 59-79.
- Weidong, H., Wei, Q., Xiaohong, W., Hailong, N.** 2007. Thin bismuth oxide films prepared through the sol-gel method. *Materials Letters*. **61**: 4100-4102. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Xu, H.** 2008. A nafion-coated bismuth film electrode for the determination of heavy metals in vegetable using differential pulse anodic stripping voltametry: An alternative to mercury-based electrodes. *Food Chemistry*. **109**: 834-839. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- Yang, Ch.** 2008. *A Study of Electrical Properties in Bismuth Thin Films*. Physics REU Summer. University of Florida. Gainesville, FL 32611. Disponible en: www.phys.ufl.edu
- Zhang, L., Hashimoto, Y., Taishi, T., Nakamura, I., Ni, Q.-Q.** 2011. Fabrication of flower-shaped Bi₂O₃ superstructure by a facile template-free process. *Appl. Surf. Sci.* **257**: 6577-6582. Disponible en: www.sciencedirect.com.

Catalizadores de manganeso sintetizados por autocombustión y coprecipitación y su empleo en la oxidación del 2-propanol

María Haidy Castaño, Rafael Molina, Sonia Moreno*

Estado Sólido y Catálisis Ambiental (ESCA), Departamento de Química, Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

Se sintetizaron óxidos mixtos de manganeso a través de las metodologías de autocombustión y coprecipitación manteniendo constantes las relaciones $Mn^{2+}/Mg^{2+}=1$ y $M^{2+}/M^{3+}=3$, las cuales son características de los óxidos obtenidos a través de la descomposición térmica de precursores del tipo de la hidrotalcita. Los catalizadores se caracterizaron mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM), adsorción de N_2 , reducción a temperatura programada y se evaluaron en la oxidación catalítica del 2-propanol. Los resultados evidenciaron que el empleo de la autocombustión como método de síntesis permite generar óxidos con propiedades estructurales, texturales, de reducción-oxidación (redox) y catalíticas similares a las obtenidas para el óxido preparado a través del precursor tipo hidrotalcita. El desempeño catalítico de los óxidos mixtos se asoció directamente con sus propiedades redox. El óxido de manganeso obtenido por autocombustión se depositó sobre monolitos metálicos de FeCrAlloy y se evaluó el efecto de la adherencia de la fase activa por medio del recubrimiento previo de los materiales con alúmina coloidal. La oxidación del 2-propanol sobre el monolito evidenció que no hay pérdida de actividad cuando el catalizador está sobre un material estructurado.

Palabras clave: hidrotalcita, autocombustión, coprecipitación, monolito, COV.

Self-combustion and Co-precipitation manganese catalysts and their use in the oxidation of 2-propanol

Abstract

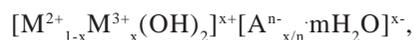
Manganese mixed oxides were synthesized by self-combustion and co-precipitation, maintaining constant the relationship $Mn^{2+} / Mg^{2+} = 1$ and $M^{2+} / M^{3+} = 3$, which are characteristic of the oxides obtained by thermal decomposition of hydrotalcite-like precursors. The catalysts were characterized using X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), N_2 adsorption, and temperature-programmed reduction, and they were evaluated in the catalytic oxidation of 2-propanol. The results showed that the use of such self-combustion synthesis method allows generating oxides with structural, textural, redox and catalytic properties similar to those obtained for the oxide prepared via a hydrotalcite-like precursor. The catalytic performance of mixed oxides was directly related to their redox properties. We evaluated the manganese oxide obtained by self-combustion deposited on FeCrAlloy metal monoliths, as well as the effect of the adhesion of the active phase of the precoat materials using colloidal alumina. The oxidation of 2-propanol over the monolith showed that there is no loss of activity when a catalyst is on a structured material.

Key words: Hydrotalcite, self-combustion, co-precipitation, monolith, VOC.

Introducción

La oxidación catalítica es una de las tecnologías empleadas para el control de los compuestos orgánicos volátiles (Everaert & Baeyens, 2004). Entre los sistemas catalíticos utilizados, los óxidos metálicos son de gran interés por ser económicos y por su versatilidad a la hora de aplicarlos en diferentes reacciones de oxidación. Aunque existen diversos métodos de síntesis para la preparación de óxidos mixtos (Schwarz, *et al.*, 1995), el método de coprecipitación de un precursor tipo hidrotalcita es el más empleado.

Los hidróxidos de doble capa (*layered double hydroxides*, LDH), también conocidos como arcillas aniónicas o compuestos del tipo de la hidrotalcita (HT), representan un grupo de materiales laminares sintéticos cuya fórmula general puede expresarse como



*Correspondencia:

Sonia Moreno, smorenog@unal.edu.co

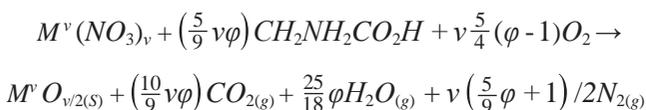
Recibido: 23 de julio de 2014

Aceptado: 19 de enero de 2015

donde M^{2+} y M^{3+} son cationes divalentes y trivalentes, respectivamente, A^n es un anión y x debe encontrarse en el intervalo entre 0,2 y 0,33 para preservar la estructura (Kovanda & JirátoVá, 2011; Xu, *et al.*, 2011). El empleo de precursores tipo hidrotalcita permite generar óxidos mixtos con grandes áreas superficiales (100-300 m²/g), así como interdispersión homogénea de los elementos, dispersión de la fase activa, efectos sinérgicos y carácter básico asociado a la presencia de pares ácido-base (O^{2-} - M^+) y oxígeno terminales (O^{2-}), características útiles en las reacciones de oxidación (Cavani, *et al.*, 1991; Di Cosimo, *et al.*, 1998; Vaccari, 1998).

En la síntesis de hidrotalcitas de manganeso, se ha estudiado la estabilidad térmica del material preparado por coprecipitación empleando $Mg(NO_3)_2$ y $MnCl_2$ en medio básico. Los estudios por TPR- H_2 han revelado que el 84 % del Mn^{2+} se oxida a Mn^{3+} durante la síntesis. Además, el tratamiento térmico a 390 °C conduce a la formación de un material amorfo, mientras que la calcinación a temperaturas mayores (670 y 1.000 °C) lleva a la cristalización de MgO y Mg_2MnO_4 (Fernández, *et al.*, 1994). En una serie de hidróxidos de doble capa con relaciones $(Mg+Mn)/Al=3$ y $Mg:Mn$ de 3:0 a 0:3, sintetizados por el método de coprecipitación, se ha evaluado la incorporación de Mn en las estructuras laminares de Mg-Al. Cuando existe la relación $Mg:Mn:Al=2,2:0,8:1$, se produce la formación de una única fase hidrotalcita y con el incremento del contenido de Mn se obtiene la mezcla de las fases LDH, $Mn(OH)_2$ y $MnCO_3$. Igualmente, los autores han reportado que cuando las hidrotalcitas se calcinan a 500 °C, se genera una solución sólida de MgO y cargas elevadas de Mn y, además de MgO , se forman las espinelas Mn_3O_4 y $MnAl_2O_4$ (Velu, *et al.*, 1999). En la evaluación de la oxidación del tolueno, del etanol y del butanol sobre óxidos mixtos de Mn, Co-Mn y Cu-Mn preparados por la descomposición térmica de hidrotalcitas, los materiales han exhibido un excelente comportamiento en la oxidación de los compuestos orgánicos volátiles (COV), atribuido principalmente a la generación de fases amorfas y ciclos de redox en los óxidos (Aguilera, *et al.*, 2011).

El empleo de hidrotalcitas como precursores de óxidos mixtos es uno de los métodos de síntesis más comunes debido a las propiedades únicas que presentan los materiales finales. Sin embargo, la autocombustión representa otro método de síntesis de gran interés en la preparación de materiales, ya que permite la generación directa de los óxidos mixtos en menores tiempos de síntesis sin la necesidad de formar un precursor para obtener óxidos mixtos con buena distribución y dispersión de las fases activas, así como buenas propiedades texturales. La reacción de autocombustión empleando nitratos metálicos y glicina como combustibles puede describirse a través de la siguiente ecuación general:



donde M es un metal de valencia v y ϕ es el oxígeno requerido para la oxidación completa del combustible. Cuando $\phi=1$ no se requiere oxígeno atmosférico, y $1 < \phi < 1$ indican, respectivamente, condiciones ricas y pobres en oxígeno (Mukasyan, *et al.*, 2007).

El medio inicial de reacción (solución acuosa), que permite la mezcla de los reactantes a nivel molecular al igual que las altas temperaturas de reacción que aseguran productos con alta pureza y cristalinidad, la corta duración del proceso y la formación de varios gases que inhiben el crecimiento del tamaño de las partículas y favorecen la síntesis de sólidos con grandes áreas superficiales, son algunos de los factores más importantes que contribuyen a las propiedades únicas de los productos finales sintetizados durante la autocombustión (Mukasyan & Dinka, 2007; Tahmasebi & Paydar, 2008).

Por otro lado, el empleo de materiales estructurados como los monolitos ha despertado gran interés en el control de gases contaminantes, entre estos los empleados en los convertidores catalíticos para la transformación de los gases de origen vehicular emitidos al ambiente (Heck, *et al.*, 2001). Entre las ventajas que presentan los monolitos se encuentran la baja pérdida de carga y de presión, una gran superficie por unidad de volumen o masa, un flujo de gases muy uniforme y, en el caso de los monolitos metálicos, una gran conductividad térmica y una notable resistencia mecánica (Cybulski & Moulijn, 1994).

Los monolitos metálicos están conformados por dos elementos: el soporte, que es el material estructural o sustrato metálico, y el catalizador, que recubre las paredes del monolito y que está compuesto de una fase activa dispersa sobre un soporte. El mayor inconveniente en la preparación de monolitos metálicos es la baja adherencia de la fase activa al sustrato metálico, razón por la cual se utilizan materiales como el FeCrAlloy, que contienen Al, el cual genera una capa de alúmina que permite la adhesión del recubrimiento catalítico después de ser sometido a un tratamiento térmico (Ivanova, *et al.*, 2013).

En este trabajo se estudió la síntesis de óxidos de manganeso mediante dos metodologías de síntesis, la coprecipitación y la autocombustión, y se compararon las propiedades estructurales, texturales, redox y catalíticas de los materiales a partir de las técnicas de caracterización empleadas. Igualmente, se prepararon monolitos metálicos cuya fase activa sería el catalizador más activo, lo que, hasta donde se sabe, constituye un método novedoso que no ha sido reportado hasta el momento en la literatura científica.

Procedimiento experimental

Síntesis de catalizadores

Coprecipitación. Se sintetizó el óxido mixto Mg-Al-Mn por medio de la descomposición térmica de precursores tipo hidrotalcita obtenido por el método de coprecipitación

simultánea, en el cual se emplearon las soluciones de los nitratos respectivos conservando las relaciones $M^{2+}/M^{3+}=3$ y $Mn^{2+}/Mg^{2+}=1$.

Para la síntesis se mezclaron los nitratos de Mg^{2+} , Al^{3+} y Mn^{2+} y se añadieron gota a gota a una solución de 0,2 M de K_2CO_3 con agitación constante, manteniendo el pH entre 9,5 y 10,5 (se agregó una solución de 1M de NaOH). El precipitado obtenido se dejó envejecer durante 18 h sin agitación. Posteriormente, el sólido se lavó y se secó a 60 °C en aire durante 18 h (obtención de la hidrotalcita HTMn) y se calcinó a 500 °C durante 16 h para obtener el óxido mixto denominado CPMn (la abreviatura CP indica coprecipitación).

Autocombustión. Se emplearon las soluciones de los nitratos de $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ y $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, que actuaron como oxidantes, y una solución de glicina [CH_2NH_2COOH], la cual se empleó como combustible. Se mantuvieron constantes las relaciones molares $M^{2+}/M^{3+}=3$, $Mn^{2+}/Mg^{2+}=1$, y una relación combustible/oxidante (glicina/nitratos) igual a 1,0.

El óxido mixto Mg-Al-Mn se obtuvo por la adición de los nitratos respectivos a la glicina con agitación constante. La solución resultante se sometió a evaporación lenta hasta la obtención de un gel que se calentó a alrededor de 100 °C, lo que dio el impulso necesario para llevar a cabo el proceso de ignición. Una vez se alcanzó la reacción de ignición, se obtuvo un polvo que se calcinó a 500 °C durante 4 h para eliminar los residuos carbonáceos y obtener finalmente el óxido ACMn (abreviatura en la que AC significa autocombustión).

Catalizadores estructurados

Se prepararon monolitos de 3 cm de longitud y 1,6 cm de diámetro empleando láminas de FeCrAlloy (Fe: 72,6 %; Cr: 22 %; Al: 4,8 %; Si: 0,3 %; y Y: 0,3 %). Se enrollaron láminas lisas y corrugadas de FeCrAlloy en torno a un eje para obtener el material estructurado. Por último, los monolitos generados se calcinaron a 900 °C durante 22 h para inducir la segregación de whiskers de $\alpha-Al_2O_3$ en la superficie que aseguraran la adherencia de la fase activa (Aguero, *et al.*, 2011; Pérez, *et al.*, 2010).

Para depositar la fase activa sobre el monolito, se empleó el método de deposición catalítica por vía húmeda, *washcoating*, y se evaluó el efecto del recubrimiento directo del soporte estructurado con la suspensión de la fase activa y el recubrimiento previo con un iniciador antes de emplear la suspensión de la fase activa (Barbero, *et al.*, 2008). Antes de realizar el recubrimiento, el óxido ACMn se molió en un molino de bolas a 400 rpm durante 5 h para obtener un tamaño de partícula de 27 μm . La distribución del tamaño de partícula se determinó en un analizador láser Mastersizer 2000 de Malvern Instruments.

Se preparó una suspensión al 12 % del catalizador ACMn molido con 2,1 % de alcohol de polivinilo, 8,4 % de Nyacol (20 % de alúmina coloidal, la cual actúa como iniciador) y 77,5 % de agua para realizar los recubrimientos.

Los monolitos se sumergieron luego en la suspensión durante 1 min y se retiraron a una velocidad de 3 cm por min^{-1} ; el exceso de suspensión se eliminó por centrifugación a 400 rpm durante 3 min; los monolitos se secaron a 120 °C durante 1 h después de cada inmersión. Por último, los monolitos recubiertos se calcinaron a 500 °C durante 2 h para obtener el catalizador M-Mn.

Con el fin de mejorar la adherencia de la suspensión en el monolito, se hizo un recubrimiento con Nyacol antes de emplear la suspensión de ACMn. Para esto, el monolito se sumergió durante 1 min en la suspensión de Nyacol, se secó a 120 °C durante 1 h y se calcinó a 500 °C durante 2 h. Posteriormente, se hizo el recubrimiento con la suspensión de ACMn siguiendo el procedimiento descrito anteriormente para así obtener el material M-Ny-Mn.

Con el fin de conocer el pH adecuado para ajustar la suspensión, se midió el potencial Vs. el pH en el óxido mixto ACMn. Las medidas del punto isoeléctrico se llevaron a cabo en un Zeta Meter System 3.0, empleando 20 mg de ACMn disperso en 250 ml de una solución de 0,001 M de KCl, y el pH se ajustó empleando soluciones de 0,01 M de KOH y HCl.

El punto isoeléctrico del catalizador ACMn fue 10,2. El valor más alto del potencial fue de 36 mV para un pH de 5, por lo que las suspensiones se prepararon ajustando un pH de 5 con HNO_3 diluido, el cual es un valor alejado del punto isoeléctrico del catalizador. De esta manera se incrementó la repulsión entre las partículas previniendo su aglomeración y obteniendo suspensiones más estables (Aguero, *et al.*, 2011).

La prueba de adherencia se llevó a cabo con el fin de conocer la pérdida de peso de los monolitos después de ser sometidos a un baño de ultrasonido. Para esto, los monolitos recubiertos se sumergieron en 25 ml de éter de petróleo y se llevaron a un baño de ultrasonido durante 30 min. Posteriormente, los monolitos se secaron a 120 °C durante 1 h y se calcinaron a 500 °C durante 2 h. Las pérdidas de peso de los recubrimientos se calcularon por la diferencia de peso de los monolitos antes y después del tratamiento con ultrasonido (Aguero, *et al.*, 2011).

Caracterización

El análisis químico de los materiales en polvo se hizo en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X MagixPro PW-2440 Phillips con una potencia máxima de 4 KW.

La composición de las fases presentes en los óxidos se determinó mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX) en un equipo SHIMADZU LAB- X XRD- 6000 provisto de un ánodo de cobre ($\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$), empleando una velocidad de 1° min^{-1} y un tamaño de paso de 0,02 $^\circ$. El tamaño de partícula se calculó con la ecuación de Scherrer, usando la señal más intensa de cada óxido.

La morfología de los óxidos de manganeso en polvo se estudió por microscopía electrónica de barrido empleando un aparato FEI QUANTA 200 en modo de alto vacío y con un voltaje de 30 kV. Para los materiales estructurados se empleó un equipo HITACHI S-2700 con voltaje de 15 kV

Para la determinación del área superficial de los óxidos, se obtuvieron isotermas de adsorción-desorción de N_2 a 77K, empleando un equipo Micromeritics ASAP 2020.

Los análisis de reducción a temperatura programada con hidrógeno (TPR-H2) se hicieron en un equipo Chembet 3000 Quantachrome equipado con un detector de conductividad térmica. Los materiales (100 mg) se sometieron previamente a desgasificación a 400 °C durante 1 h en presencia de Ar y se redujeron empleando una mezcla de H_2/Ar al 10 % (v/v), un flujo de 30 ml/min^{-1} y una rampa de calentamiento de 10 °C/min. Los consumos de hidrógeno se calcularon a partir de una curva de calibración de CuO.

Actividad catalítica

Los catalizadores en polvo y el catalizador estructurado se evaluaron en la oxidación catalítica del 2-propanol. Se empleó un reactor de lecho fijo en U, que opera en flujo continuo y a presión atmosférica, con un caudal total de 280 ml/min , 0,200 g de catalizador (tamizado < 250 μm) y una concentración de 1.000 ppm de 2-propanol.

Los catalizadores se activaron con un flujo de 280 ml/min de una mezcla de 21 % de O_2 en He a 400 °C durante 1 h y se estabilizaron durante 1 h con la corriente de la mezcla de oxígeno y el 2-propanol a 400 °C. La curva de ignición se obtuvo por enfriamiento a 1,5 °C/min desde 400 °C hasta 50 °C. Los reactivos y productos de la reacción de oxidación se analizaron en línea por espectrometría de masas (espectrómetro de masas Balzers Omnistar), siguiendo las señales m/z 45,43,41,18 y 44 asignadas respectivamente al 2-propanol y a los principales productos de reacción: acetona, propeno, agua y dióxido de carbono.

Resultados y discusión

Caracterización del precursor hidrotalcita

El patrón de difracción de la hidrotalcita de manganeso, HTMn, se presenta en la figura 1, donde se compara con el patrón de difracción típico de una hidrotalcita de Mg-Al. La presencia de las señales intensas en 11,3, 22,6 y 34,4 $^{\circ}2\theta$ indican la formación de una estructura laminar bien cristalizada con simetría 3R (Tsyganok & Sayari, 2006). Los parámetros cristalográficos a y c de las dos estructuras laminares HTMn y HTMgAl, se calcularon a partir de las reflexiones (110) y (003) de los perfiles, donde $a = 2d_{(110)}$ y $c = 3d_{(003)}$, respectivamente (Evans & Slade, 2006; Pérez, et al., 2011). El parámetro a , que corresponde a la distancia entre dos cationes, presentó el mismo valor para HTMn y para HTMgAl ($a = 0.307nm$), lo que sugiere que la presencia de manganeso no perturba dicha distancia. Sin embargo, el parámetro c , que corresponde al espesor

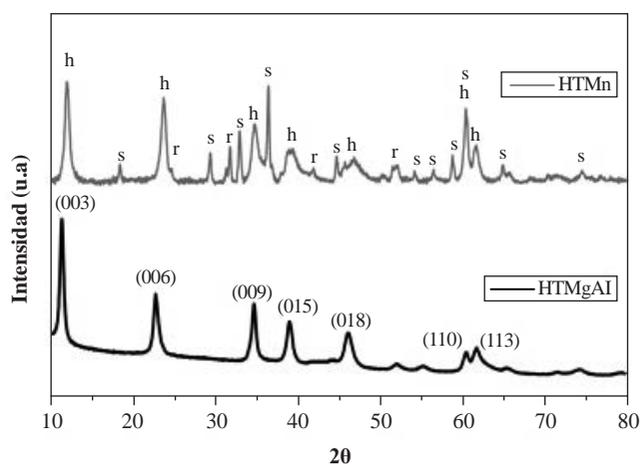


Figura 1. Difracción de rayos X (DRX) de las hidrotalcitas de Mn y de Mg-Al (h) fase hidrotalcita, (s) Mn_3O_4 , (r) $MnCO_3$

de tres láminas del tipo de la brucita más su espacio interlamina, reveló un valor ligeramente menor en HTMn (2,26 nm) que en HTMgAl (2,34 nm). Este resultado se atribuyó a un incremento de las fuerzas electrostáticas entre las láminas y las interláminas, efecto que sólo es posible si se encuentran los iones Mn^{3+} presentes en las láminas brucíticas (Velu, et al., 1999). La presencia de estos iones dentro de la estructura laminar explicaría, igualmente, por qué el Mn no afecta el parámetro a de la hidrotalcita HTMn.

La hidrotalcita de Mn reveló las mismas señales de la hidrotalcita de referencia (MgAl) y otras señales atribuidas a la formación de las fases hausmanita Mn_3O_4 (JCPDS 24-0734) y rodocrosita $MnCO_3$ (JCPDS 44-1472). La formación de Mn_3O_4 probablemente se debe a que parte del Mn^{2+} se oxida hasta Mn^{3+} en medio básico (condiciones de síntesis empleadas). Estos resultados concuerdan con los valores de los parámetros cristalográficos calculados para esta hidrotalcita (Fernández, et al., 1994; Velu, et al., 1999).

La micrografía de HTMn obtenida por SEM se muestra en la figura 2a. Es evidente la formación de una estructura laminar, lo que confirma la presencia de una estructura del tipo hidrotalcita.

Caracterización de los óxidos mixtos

Los patrones de difracción del óxido mixto obtenido a través de la descomposición térmica de la hidrotalcita de manganeso, CPMn, y el obtenido por autocombustión, ACMn, presentaron señales propias de espinelas de manganeso Mn_3O_4 , Mn_2MgO_4 , Mn_2AlO_4 y $MgMn_{1.75}Al_{0.25}O_4$ (JCPDS N° 24-0734, JCPDS N° 23-0392, JCPDS N° 29-0881 y JCPDS N° 01-075-0528, respectivamente), cuyos máximos coincidieron, sin ser posible su asignación exacta (figura 3). Se observó, además, la formación de la periclase MgO , fase normalmente obtenida tras la descomposición térmica de los precursores tipo hidrotalcita.

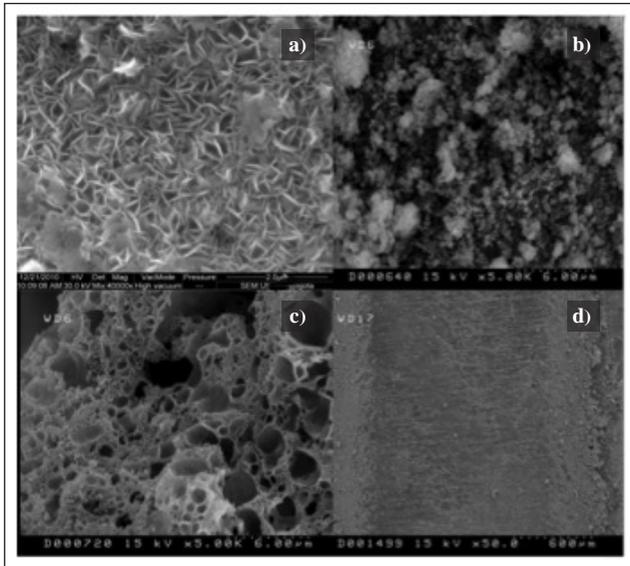


Figura 2. Micrografías de microscopía electrónica de barrido (SEM) de los materiales. a) HTMn, b) CPMn, c) ACMn, d) M-NyMn

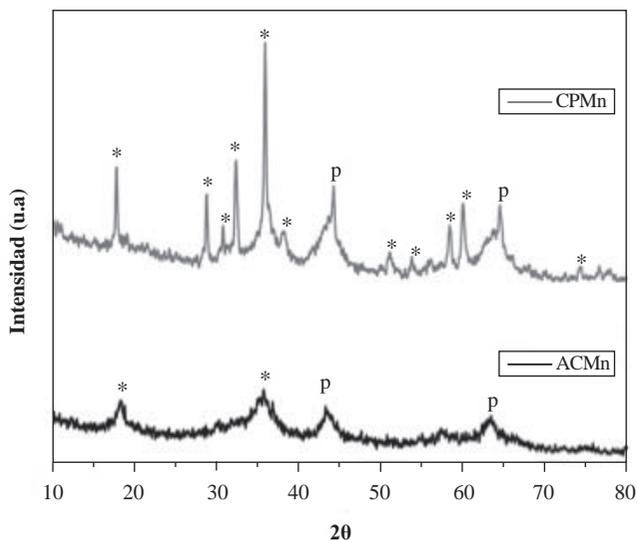


Figura 3. Difracción de rayos X (DRX) de los óxidos mixtos de manganeso. (p) MgO (*) Mn_3O_4 , Mn_2MgO_4 , Mn_2AlO_4 , $MgMn_{1.75}Al_{0.25}O_4$

Los tamaños de partícula de los óxidos, estimados mediante la ecuación de Scherrer y la señal más intensa (211), se presentan en la tabla 1. El óxido mixto obtenido por autocombustión presentó un tamaño de partícula mucho menor comparado con el obtenido en el óxido sintetizado a través del precursor tipo hidrotalcita, lo cual evidencia que la autocombustión alcanza materiales con tamaños de partícula muy pequeños en razón de la gran evolución de productos gaseosos que se produce durante la síntesis, lo que evita el contacto entre partículas y mejora la dispersión y distribución de la fase activa.

En las estructuras del tipo de la hidrotalcita la conservación de las relaciones $M^{2+}/M^{3+}=3$ y $M^{2+}/Mg^{2+}=1$ permitió obtener catalizadores con un excelente desempeño catalítico en la oxidación de los COV, como se ha demostrado en la oxidación catalítica del tolueno (Aguilera, *et al.*, 2011; Castaño, *et al.*, 2013; Pérez, *et al.*, 2011).

El análisis químico por FRX de los sólidos se presenta igualmente en la tabla 1. En los dos óxidos mixtos obtenidos se observa que las relaciones M^{2+}/M^{3+} y Mn^{2+}/Mg^{2+} correspondieron a las relaciones nominales establecidas, por lo que fue posible realizar una incorporación satisfactoria de las especies a través de las metodologías de coprecipitación y de autocombustión.

Las curvas de adsorción-desorción de N_2 sobre los dos óxidos de CPMn y ACMn revelaron el carácter mesoporoso de los materiales. El área BET fue la misma en los dos catalizadores (tabla 1), sin que se viera afectada por el método de síntesis empleado. En el óxido CPMn el área se atribuye a la formación de poros resultantes de la destrucción de los espacios laminares de la hidrotalcita después de la calcinación (pérdida de agua y carbonatos) (Aguilera, *et al.*, 2011). En el caso del óxido ACMn, la generación de gases como el CO_2 y el H_2O durante la combustión resulta en un efecto plantilla que conduce a la obtención de materiales con gran porosidad.

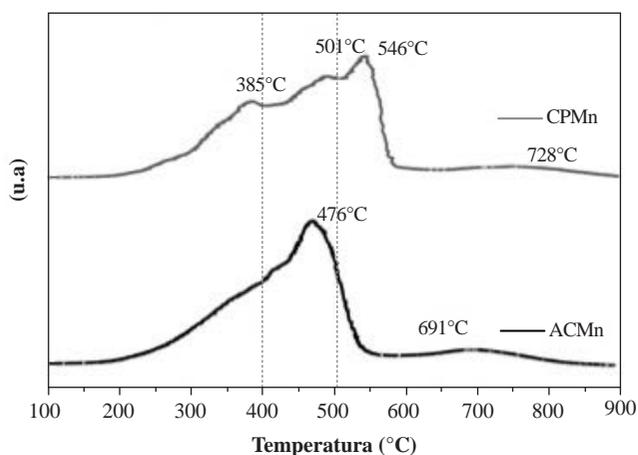
Las figuras 2b y 2c presentan las micrografías SEM del CPMn y del ACMn y allí se evidencia que el óxido mixto proveniente de la autocombustión presentó una estructura altamente porosa, con poros en el rango de los micrómetros, como resultado de la gran cantidad de productos gaseosos generados durante la síntesis del material. Aunque el ACMn evidencia la presencia de macroporos, la contribución de los mesoporos es evidente de acuerdo a los resultados de la isoterma de adsorción-desorción, con lo que se obtuvo un área BET similar a la del CPMn, el cual es un material fundamentalmente mesoporoso.

Los perfiles de TPR- H_2 de los óxidos de manganeso aparecen en la figura 4. En general, son perfiles bastante complejos en razón de los múltiples estados de oxidación del manganeso y a los diferentes ambientes químicos en los que se puede encontrar. Sin embargo, el perfil de reducción puede clasificarse en tres zonas principales, una de baja temperatura (<400 °C), otra de temperatura intermedia (400 °C- 500 °C) y una tercera de alta temperatura (>500 °C).

En la primera zona se verifican los procesos reductivos de especies de MnOx con diversos tamaños de partícula, y la transición de Mn_2O_3 a Mn_3O_4 . La segunda zona se atribuye al paso de la especie Mn_3O_4 hacia la forma reducida del manganeso MnO (Aguilera, *et al.*, 2011; Craciun, *et al.*, 2003; Döbber, *et al.*, 2004; Stobbe, *et al.*, 1999). En la tercera zona las señales se atribuyen a la presencia de fases tipo

Tabla 1. Composición química, tamaño de partícula, área específica (S_{BET}), consumos de hidrógeno y estado promedio de oxidación (AOS) de los óxidos

Sólido	Análisis químico		Tamaño de partícula ($\pm 3nm$)	S_{BET} ($\pm 10m^2 g^{-1}$)	Propiedades redox		
	M^{2+}/M^{3+}	Mn^{2+}/Mg^{2+}			Consumo H_2 (mmol/g) $\pm 0,1$		AOS
					Total	< 400 °C	
CPMn	2,9	1,2	34	186	3,7	1,4	3,2
ACMn	2,9	1,3	6	184	4,1	1,6	3,1

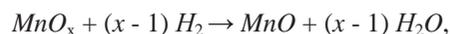
**Figura 4.** Perfiles de TPR- H_2 de los óxidos mixtos de manganeso

espinela, como se evidenció por DRX, y a la reducción del manganeso que hace parte de la solución sólida (Aguilera, *et al.*, 2011).

El óxido mixto ACMn presentó una señal más intensa en la reducción de $Mn_3O_4 \rightarrow MnO$, lo que puede asociarse a un mejor desempeño catalítico en reacciones de oxidación, ya que, como se ha establecido, los óxidos de manganeso con átomos de Mn en diferentes estados de oxidación, como es el caso de la hausmanita Mn_3O_4 , propician un ambiente de movilidad electrónica óptimo para efectuar una reacción de óxido-reducción sobre su superficie (Santos, *et al.*, 2009).

Los consumos de hidrógeno totales se presentan en la tabla 1, en la cual se reporta igualmente el consumo de hidrógeno a temperaturas menores de 400 °C debido a que es allí donde se verifica el comportamiento redox de los sólidos en condiciones de reacción catalítica. Al comparar los resultados de los óxidos de manganeso generados por las dos metodologías se observó que el óxido CPMn presentó, en promedio, las temperaturas más altas de reducción y el menor consumo de hidrógeno total, lo que sugiere la presencia de especies de manganeso de menor acceso o menor capacidad de reducción debido, probablemente, a mayores tamaños de partícula, como se evidenció por DRX. Sin embargo, el consumo de hidrógeno a temperaturas menores de 400 °C fue similar en los dos óxidos, lo que indicaría que es posible obtener óxidos con propiedades redox similares bajo las condiciones de reacción con ambas metodologías.

El estado promedio de oxidación (*average oxidation state*, AOS) de los óxidos de manganeso presentes en los catalizadores se indica también en la tabla 1. Dichos valores se estimaron mediante la siguiente reacción:



donde se asumió que el MnO_x presente se reduce hasta MnO, y el estado de oxidación promedio ($2x$) puede calcularse a partir del área bajo la curva de todos los picos en el análisis por TPR- H_2 y del porcentaje de manganeso presente en el catalizador (Pérez, H. *et al.*, 2011; Pérez, H., *et al.*, (2013); Torres, *et al.*, 2011).

Los resultados relativos al AOS sugieren que tanto en el CPMn como en el ACMn los iones de Mn se encontraban en una mezcla de estados de oxidación de 3+ y 2+, por lo que se constató que es posible obtener óxidos de manganeso con el mismo estado de oxidación mediante las dos metodologías.

La presencia de Mn en diferentes estados de oxidación es favorable, ya que se reconoce ampliamente que los óxidos que presentan diferentes estados de oxidación son más activos en las reacciones de oxidación total (Baldi, *et al.*, 1998; Kim & Shim, 2010).

Teniendo en cuenta los resultados de las diferentes caracterizaciones, es claro que mediante el método de autocombustión fue posible obtener óxidos mixtos con propiedades semejantes a los generados con el empleo de precursores del tipo de la hidrotalcita, pero en mucho menor tiempo de síntesis (~ 5 h Vs. 48 h), por lo que el óxido ACMn se seleccionó como fase activa en la obtención de catalizadores estructurados.

Caracterización del material estructurado

Considerando el comportamiento catalítico del óxido de manganeso obtenido por el método de autocombustión, resulta interesante evaluar la potencialidad de soportar dicho catalizador sobre un monolito metálico y estudiar el desempeño catalítico de este sistema.

En el desarrollo de sistemas catalíticos estructurados es de vital importancia la adherencia de la suspensión sobre el sustrato metálico, donde la retención del recubrimiento sobre el monolito puede llevarse a cabo a través de dos mecanismos: por un anclaje entre las mismas partículas del recubrimiento, o por medio de las irregularidades o rugosidad de la superficie del soporte, la cual se produce por el tratamiento térmico

del monolito de FeCrAlloy, el cual permite la formación de una superficie rugosa de whiskers de óxido de aluminio que facilita el anclaje del recubrimiento sobre la superficie del monolito (Aguero, et al., 2011; Avila, et al., 2005).

En la figura 5 se presenta la evolución de la masa de la suspensión retenida sobre el monolito en función de los recubrimientos realizados. El número de recubrimientos es función de la masa de fase activa que debe soportarse sobre los monolitos. Se obtuvieron alrededor de 0,180 g de ACMn después del proceso de calcinación sobre los materiales estructurados con un 60 % de adherencia, tal y como se indica en la tabla 2. La masa obtenida fue muy cercana a la empleada cuando se tiene el catalizador de manganeso en polvo para la oxidación catalítica del 2-propanol.

Como se ha planteado, la adherencia del catalizador sobre el soporte es muy importante y, aunque la superficie del sustrato metálico se somete a tratamiento térmico, algunas veces la afinidad química entre el monolito y la fase activa no es suficiente y estos tienden a separarse, lo que resulta en una baja adherencia. Esta baja adherencia puede contrarrestarse mediante un recubrimiento del monolito con una capa intermedia de alúmina, denominada comúnmente iniciador, sobre la cual se deposita posteriormente la fase activa. En general, la función del iniciador es actuar como “pegamento” entre el sustrato metálico y el catalizador aumentando la adherencia entre ellos (Montebelli, et al., 2014; Visconti, 2012), y generar sitios de enlace entre los whiskers de alúmina y el catalizador.

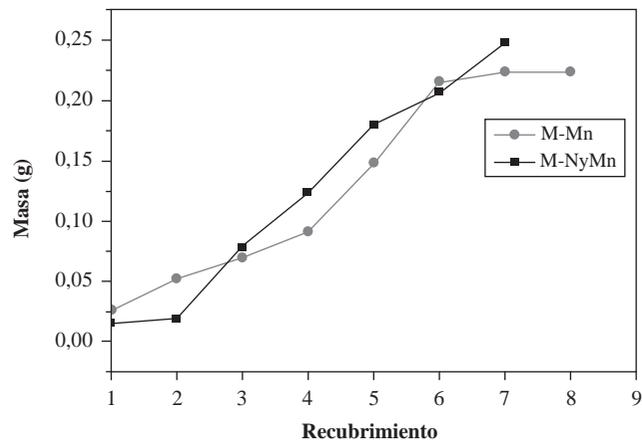


Figura 5. Inmersiones realizadas Vs. masa de suspensión retenida sobre los monolitos

Tabla 2. Masa de catalizador retenida después de calcinar a 500 °C y prueba de adherencia

Catalizador	Masa de catalizador (g)	Masa de Nyacol (g) (Ny)	% adherencia
M-Mn	0,186	----	60
M-NyMn	0,187	0,032	78

En la tabla 2 se evidencia el efecto benéfico del empleo de un iniciador en el sistema catalítico usado, comprobado mediante pruebas de adherencia, pues este aumentó la adherencia de la fase activa (MnMgAlO) sobre el monolito.

Aunque el porcentaje de adherencia incrementó, en la figura 5 se aprecia que el empleo de Nyacol como iniciador disminuyó ligeramente la masa de suspensión retenida durante el primer y el segundo recubrimiento. Sin embargo, también se observa que esta tendencia cambió a partir del tercer recubrimiento en el que la masa aumentó con el número de inmersiones.

El comportamiento durante el primer y el segundo recubrimiento se atribuye a una pérdida de rugosidad de la superficie del FeCrAlloy calcinado cuando se emplea un iniciador, debido a que se retiene una capa de alúmina proveniente del Nyacol que mejora la adherencia, pero hace más difícil la deposición de una mayor cantidad del óxido ACMn si se tiene en cuenta que uno de los mecanismos de retención de la fase activa sucede por efecto de la rugosidad de la superficie del monolito, tal como ha sido reportado por Barbero, et al. (2008), quienes señalan que una mayor adherencia con el empleo de un iniciador no compensa la baja cantidad de sólido retenido.

A partir del tercer recubrimiento, la superficie del material estructurado queda constituida principalmente por capas del catalizador de Mn (ACMn), desapareciendo así el efecto del iniciador, lo que explicaría el aumento de masa de la fase activa, en la cual el mecanismo de anclaje entre las partículas del recubrimiento prevalece y, por lo tanto, permite una mayor carga, como ocurre con el sistema M-Mn, en el cual se verifica que a mayor número de inmersiones mayor retención del catalizador.

La figura 6 presenta la apariencia de los materiales estructurados finales después de realizar los recubrimientos con la suspensión de ACMn y su posterior calcinación a 500 °C durante dos horas.

La figura 2d muestra la micrografía SEM de M-NyMn después de los recubrimientos y el proceso de calcinación; se aprecia un recubrimiento exitoso del monolito con el catalizador ACMn, evidenciando las posibilidades que se abren al emplear este tipo de catalizadores como fases activas en materiales estructurados.

Actividad catalítica

Es reconocido que la oxidación de 2-propanol se inicia con la adsorción en fase gaseosa del alcohol como especie 2-propóxido y que, posteriormente, ocurre la descomposición de esta especie a través de dos reacciones paralelas: la deshidrogenación hasta acetona, en la cual se requieren sitios básicos fuertes, y la deshidratación hasta propeno, en la cual están involucrados sitios ácidos fuertes y sitios básicos débiles (Liu & Yang, 2008; Manríquez, et al.,

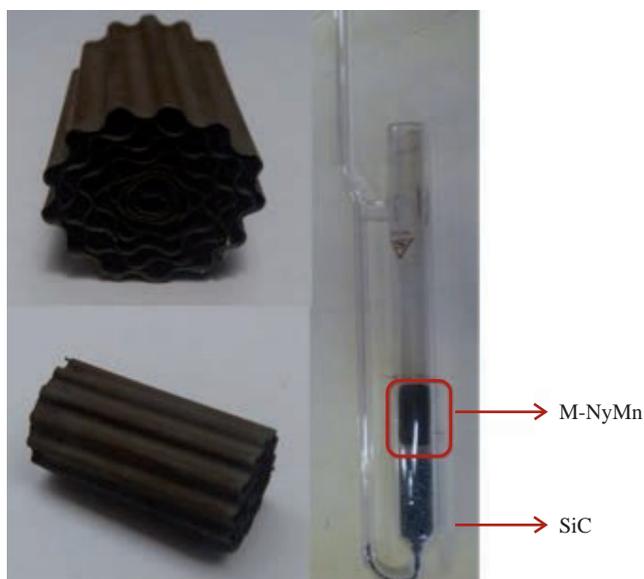


Figura 6. Apariencia del monolito M-NyMn de FeCrAlloy calcinado y montaje en el reactor de lecho fijo

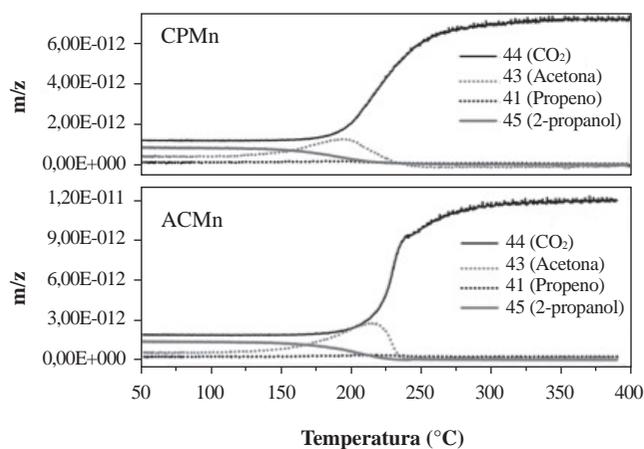


Figura 7. Distribución de especies durante la oxidación del 2-propanol

2004). La figura 7 presenta la evolución de las diferentes especies obtenidas en la oxidación del 2-propanol sobre ACMn y CPMn. La distribución de los productos en los dos catalizadores fue similar. Se evidencia la formación de acetona como intermediario de la reacción de acuerdo con las propiedades básicas y redox de los dos óxidos, sin que se obtuviera propeno al incrementar la temperatura.

Se obtuvieron las curvas *light-off* a partir de los resultados de *m/z* versus temperatura, transformando la señal *m/z* en términos de conversión y empleando los valores de T_{50} y T_{90} (temperatura necesaria para alcanzar el 50 % y el 90 % de conversión del 2-propanol, respectivamente) como medida de actividad. Los resultados se presentan en la tabla 3 y en la figura 8. El comportamiento catalítico de los óxidos

de manganeso obtenidos mediante las dos metodologías de síntesis fue muy semejante, lo cual concordó con los resultados de TPR- H_2 . Sin embargo, se registró una ligera diferencia en el 100 % de la conversión del 2-propanol hasta CO_2 , pues sobre el CPMn este valor se alcanzó a 320 °C mientras que sobre ACMn se logró a 300°C. Se sabe que la oxidación de los COV puede llevarse a cabo a través de un mecanismo redox de Mars Van Krevelan, en el cual la molécula orgánica es oxidada por los oxígenos de red más cercanos a la superficie del óxido, causando, a la vez, la reducción de este último, el cual vuelve a oxidarse por la presencia de oxígeno en fase gaseosa (Hosseini, *et al.*, 2012), lo que evidencia la existencia de una relación entre el comportamiento catalítico y las propiedades de redox de los catalizadores.

Por otra parte, el desempeño catalítico del material estructurado reveló una distribución de productos muy semejante a la obtenida sobre ACMn en polvo, lo que demuestra la formación de acetona como producto intermediario y la formación de CO_2 y agua como productos finales de la oxidación total del 2-propanol. Al igual que el sólido ACMn, el 100 % de la conversión del 2-propanol sobre M-NyMn se alcanzó a una temperatura de 300 °C y las temperaturas requeridas para alcanzar el 50 % y el 90 % de conversión del COV (tabla

Tabla 3. Desempeño catalítico de los catalizadores en polvo y del catalizador estructurado

Sólido	Oxidación del 2-propanol				
	Conversión		Conversión a CO_2		Acetona
	T_{50} (°C)	T_{90} (°C)	T_{50} (°C)	T_{90} (°C)	T_M (°C)
CPMn	190	230	224	270	196
ACMn	186	220	220	254	196
M-NyMn	190	220	220	270	200

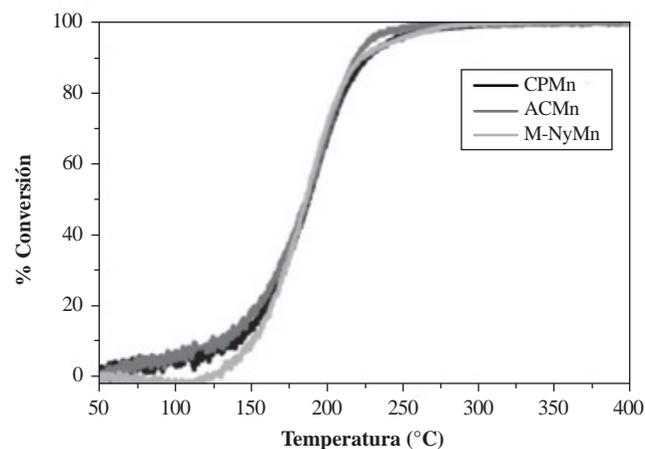


Figura 8. Conversión del 2-propanol sobre los catalizadores en polvo y el catalizador estructurado

3) fueron las mismas que para el catalizador en polvo. Estos resultados demuestran que la actividad catalítica del ACMn en la oxidación del 2-propanol se conservó en el monolito y el desempeño catalítico no disminuyó por soportarlo sobre un sistema estructurado, como sí se ha reportado para otros sistemas en la literatura científica (Ciambelli, *et al.*, 1999; Sanabria, *et al.*, 2010).

Conclusiones

El empleo de la autocombustión como método de síntesis permitió la generación de óxidos mixtos en menores tiempos de síntesis (~ 5 h) y con propiedades texturales, redox y catalíticas semejantes o superiores a las obtenidas por la metodología tradicional de coprecipitación (~ 48 h).

Los óxidos mixtos de manganeso preparados mediante las dos metodologías de síntesis presentaron un desempeño catalítico semejante en la oxidación del 2-propanol, lo que se atribuyó a propiedades redox equivalentes.

El empleo de alúmina coloidal sobre FeCrAlloy mejoró la adherencia del óxido de manganeso en un 30 % con respecto al material en el que no se usó Nyacol.

El óxido de manganeso ACMn sobre el monolito de FeCrAlloy presentó un desempeño catalítico comparable al que tiene en polvo, lo que permite confirmar su potencial para ser empleado como fase activa en materiales estructurados para reacciones de oxidación de diferentes COVs.

Agradecimientos

Los autores agradecen al profesor Mario Montes de la Universidad del País Vasco (España) por el apoyo durante la realización de la pasantía doctoral en su grupo de investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Aguero, F. N., Barbero, B. P., Almeida, L. C., Montes, M., Cadús, L. E. (2011). MnOx supported on metallic monoliths for the combustion of volatile organic compounds. *Chemical Engineering Journal*. **166** (1): 218-223.
- Aguilera, D. A., Pérez, A., Molina, R., Moreno, S. (2011). Cu-Mn and Co-Mn catalysts synthesized from hydrotalcites and their use in the oxidation of VOCs. *Applied Catalysis, B*. **104** (1-2): 144-150.
- Ávila, P., Montes, M., Miró, E. E. (2005). Monolithic reactors for environmental applications: A review on preparation technologies. *Chemical Engineering Journal*. **109** (1-3): 11-36.
- Baldi, M., Finocchio, E., Milella, F., Busca, G. (1998). Catalytic combustion of C3 hydrocarbons and oxygenates over Mn3O4. *Applied Catalysis B: Environmental*. **16** (1): 43-51.
- Barbero, B. P., Costa-Almeida, L., Sanz, O., Morales, M. R., Cadus, L. E., Montes, M. (2008). Washcoating of metallic monoliths with a MnCu catalyst for catalytic combustion of volatile organic compounds. *Chemical Engineering Journal*. **139** (2): 430-435.
- Castaño, M. H., Molina, R., Moreno, S. (2013). Mn-Co-Al-Mg mixed oxides by auto-combustion method and their use as catalysts in the total oxidation of toluene. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. **370** (0): 167-174.
- Cavani, F., Trifirò, F., Vaccari, A. (1991). Hydrotalcite-type anionic clays: Preparation, properties and applications. *Catalysis Today*. **11** (2): 173-301.
- Ciambelli, P., Palma, V., Tikhov, S. F., Sadykov, V. A., Isupova, L. A., Lisi, L. (1999). Catalytic activity of powder and monolith perovskites in methane combustion. *Catalysis Today*. **47** (1-4): 199-207.
- Craciun, R., Nentwick, B., Hadjiivanov, K., Knözinger, H. (2003). Structure and redox properties of MnOx/Yttrium-stabilized zirconia (YSZ) catalyst and its use in CO and CH4 oxidation. *Appl. Catal., A*. **243** (1): 67-79.
- Cybulski, A. & Moulijn, J. A. (1994). Monoliths in Heterogeneous Catalysis. *Catalysis Reviews*. **36** (2): 179-270.
- Di Cosimo, J. I., Díez, V. K., Xu, M., Iglesia, E., Apesteguía, C. R. (1998). Structure and Surface and Catalytic Properties of Mg-Al Basic Oxides. *Journal of Catalysis*. **178** (2): 499-510.
- Döbber, D., Kießling, D., Schmitz, W., Wendt, G. (2004). MnOx/ZrO2 catalysts for the total oxidation of methane and chloromethane. *Appl. Catal., B*. **52** (2): 135-143.
- Evans, D. & Slade, R. T. (2006). Structural Aspects of Layered Double Hydroxides. In X. Duan & D. Evans (Eds.), *Layered Double Hydroxides* (Vol. 119, pp. 1-87): Springer Berlin Heidelberg.
- Everaert, K. & Baeyens, J. (2004). Catalytic combustion of volatile organic compounds. *Journal of Hazardous Materials*. **109** (1-3): 113-139.
- Fernández, J. M., Barriga, C., Ulibarri, M.-A., Labajos, F. M., Rives, V. (1994). Preparation and thermal stability of manganese-containing hydrotalcite, $[Mg_{0.75}MnII_{0.04}MnIII_{0.21}(OH)_2](CO_3)_{0.11}nH_2O$. *Journal of Materials Chemistry*. **4** (7): 1117-1121.
- Heck, R. M., Gulati, S., Farrauto, R. J. (2001). The application of monoliths for gas phase catalytic reactions. *Chemical Engineering Journal*. **82** (1-3): 149-156.
- Hosseini, S. A., Niaei, A., Salari, D., Nabavi, S. R. (2012). Nanocrystalline AMn2O4 (A=Co, Ni, Cu) spinels for remediation of volatile organic compounds—synthesis, characterization and catalytic performance. *Ceramics International*. **38** (2): 1655-1661.
- Ivanova, S., Pérez, A., Centeno, M. Á., Odriozola, J. A. (2013). Chapter 9 - Structured Catalysts for Volatile Organic Compound Removal. In S. L. Suib (Ed.), *New and Future Developments in Catalysis*. Amsterdam: Elsevier. pp. 233-256.
- Kim, S. C. & Shim, W. G. (2010). Catalytic combustion of VOCs over a series of manganese oxide catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*. **98** (3-4): 180-185.
- Kovanda, F. & Jirátová, K. (2011). Supported layered double hydroxide-related mixed oxides and their application in the total oxidation of volatile organic compounds. *Applied Clay Science*. **53** (2): 305-316.

- Liu, S. Y. & Yang, S. M.** (2008). Complete oxidation of 2-propanol over gold-based catalysts supported on metal oxides. *Applied Catalysis A: General*. **334** (1-2): 92-99.
- Manríquez, M. E., López, T., Gómez, R., Navarrete, J.** (2004). Preparation of TiO₂-ZrO₂ mixed oxides with controlled acid-basic properties. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. **220** (2): 229-237.
- Montebelli, A., Visconti, C. G., Groppi, G., Tronconi, E., Cristiani, C., Ferreira, C., Kohler, S.** (2014). Methods for the catalytic activation of metallic structured substrates. *Catalysis Science & Technology*. **4** (9): 2846-2870.
- Mukasyan, A. & Dinka, P.** (2007). Novel approaches to solution-combustion synthesis of nanomaterials. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. **16** (1): 23-35.
- Mukasyan, A. S., Epstein, P., Dinka, P.** (2007). Solution combustion synthesis of nanomaterials. *Proceedings of the Combustion Institute*. **31** (2): 1789-1795.
- Pérez, A., Lamonier, J.-F., Giraudon, J.-M., Molina, R., Moreno, S.** (2011). Catalytic activity of Co-Mg mixed oxides in the VOC oxidation: Effects of ultrasonic assisted in the synthesis. *Catalysis Today*. **176** (1): 286-291.
- Pérez, H., Navarro, P., Delgado, J. J., Montes, M.** (2011). Mn-SBA15 catalysts prepared by impregnation: Influence of the manganese precursor. *Applied Catalysis A: General*. **400** (1-2): 238-248.
- Pérez, H., Navarro, P., Montes, M.** (2010). Deposition of SBA-15 layers on Fecralloy monoliths by washcoating. *Chemical Engineering Journal*. **158** (2): 325-332.
- Pérez, H., Navarro, P., Torres, G., Sanz, O., Montes, M.** (2013). Evaluation of manganese OMS-like cryptomelane supported on SBA-15 in the oxidation of ethyl acetate. *Catalysis Today*. **212**: 149-156.
- Sanabria, N. R., Ávila, P., Yates, M., Rasmussen, S. B., Molina, R., Moreno, S.** (2010). Mechanical and textural properties of extruded materials manufactured with AlFe and AlCeFe pillared bentonites. *Applied Clay Science*. **47** (3-4): 283-289.
- Santos, V., Pereira, M., Órfão, J., Figueiredo, J.** (2009). Synthesis and Characterization of Manganese Oxide Catalysts for the Total Oxidation of Ethyl Acetate. *Top. Catal.* **52** (5): 470-481.
- Schwarz, J. A., Contescu, C., Contescu, A.** (1995). Methods for Preparation of Catalytic Materials. *Chemical Reviews*. **95** (3): 477-510.
- Stobbe, E. R., de Boer, B. A., Geus, J. W.** (1999). The reduction and oxidation behaviour of manganese oxides. *Catal. Today*. **47** (1-4): 161-167.
- Tahmasebi, K. & Paydar, M. H.** (2008). The effect of starch addition on solution combustion synthesis of Al₂O₃-ZrO₂ nanocomposite powder using urea as fuel. *Materials Chemistry and Physics*. **109** (1): 156-163.
- Torres, J. Q., Giraudon, J.-M., Lamonier, J.-F.** (2011). Formaldehyde total oxidation over mesoporous MnOx catalysts. *Catalysis Today*. **176** (1): 277-280.
- Tsyganok, A. & Sayari, A.** (2006). Incorporation of transition metals into Mg-Al layered double hydroxides: Coprecipitation of cations vs. their pre-complexation with an anionic chelator. *Journal of Solid State Chemistry*. **179** (6): 1830-1841.
- Vaccari, A.** (1998). Preparation and catalytic properties of cationic and anionic clays. *Catalysis Today*. **41** (1-3): 53-71.
- Velu, S., Shah, N., Jyothi, T. M., Sivasanker, S.** (1999). Effect of manganese substitution on the physicochemical properties and catalytic toluene oxidation activities of Mg-Al layered double hydroxides. *Microporous and Mesoporous Materials*. **33** (1-3): 61-75.
- Visconti, C. G.** (2012). Alumina: A Key-Component of Structured Catalysts for Process Intensification. *Transactions of the Indian Ceramic Society*. **71** (3): 123-136.
- Xu, Z. P., Zhang, J., Adebajo, M. O., Zhang, H., Zhou, C.** (2011). Catalytic applications of layered double hydroxides and derivatives. *Applied Clay Science*. **53** (2): 139-150.

Habitat perturbation and survival strategies of the Andean catfish *Astroblepus mariae* (Fowler, 1919)

Uriel A. Buitrago-Suarez¹, Jose I. Mojica^{2,*}, Lisa K. Bonneau³

¹Department of Integrative Biology at Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, USA

²Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³Department of Natural Sciences Mount Marty College, Yankton, Dakota del Sur, USA

Abstract

Astroblepid species inhabit the Andean Cordilleras in South America. Their habitat has undergone a rapid transformation to the unimaginable levels of degradation since ancient times. State of knowledge on the habitat perturbation and the concomitant extirpation of endemic astroblepid species is scarce. The Andes Cordilleras are characterized by fertile soil and as a result of that, vast regions are transformed for agriculture and pasture for cattle. These processes require the use of water obtained from creeks and springs that causes remarkable changes of the natural configuration of these water systems and the disappearance of the fish fauna together with the zooplankton and aquatic flora. Despite these human actions, some species of *Astroblepus* may have the ability to respond to the rapid habitat transformation enabling them to survive. In this paper we will discuss the incidence of habitat perturbation in a localized stream segment on the presence of *Astroblepus mariae*.

Key words: Habitat perturbation, survival, refuge, buffer zone.

Perturbación de hábitat y estrategias de supervivencia del bagre *Astroblepus mariae* (Fowler, 1919)

Resumen

Las especies del género *Astroblepus* habitan en la cordillera de los Andes en Suramérica. Desde tiempos remotos sus hábitats han sufrido transformaciones rápidas que han resultado en niveles inimaginables de degradación. Sin embargo, es escaso el conocimiento sobre las perturbaciones de hábitat y la desaparición simultánea de especies endémicas del género *Astroblepus*. En general, los suelos de la cordillera de los Andes se caracterizan por su fertilidad, por lo que extensas regiones han sido transformadas para la agricultura y el pastoreo de ganado, procesos que requieren del uso de agua proveniente de arroyos y manantiales, lo cual conlleva cambios notables en la configuración natural de estos sistemas de agua, así como la desaparición de peces, zooplancton y flora acuática. A pesar de estas acciones antrópicas, algunas especies de *Astroblepus* parecen tener la capacidad de responder rápidamente a las transformaciones del hábitat y de sobrevivir en estas condiciones. Se discute aquí la incidencia de la perturbación del hábitat en un tramo de arroyo con presencia de *Astroblepus mariae*.

Palabras clave: perturbación de hábitat, supervivencia, refugio, zona amortiguadora.

Introduction

Astroblepus species, also called “climbing” or “suckermouth” catfish, inhabit streams from the piedmont to high altitude of the Andean cordilleras. Their habitat includes small, shallow creeks, and springs characterized by rocks, stones, gravel and mud, and diverse riverine vegetation. Their ability to climb (Johnson, 1912; Arratia, 1990; Howes, 1983; Buitrago-Suárez, 1995; Nelson, 2006; Gerstner, 2007; Schaefer et al., 2011; DeCrop, et al., 2013) enable them to explore unreachable habitats for other species of fish. Some species of this group of catfishes are the only representatives of the fish fauna from the highest Andes.

Little is known about the ecology of astroblepids, but as it has been described in more recent studies, anthropogenic activities cause an increase in habitat alteration with the

concomitant extirpation of local cryptic populations (Vélez-Espino, 2003, 2005 and 2006). Habitat degradation in the Andean cordilleras due to deforestation for pasture and agriculture is in fact modifying the population structure of these catfishes. Andean streams are remarkably modified for water supply for humans and cattle (Vélez-Espino, 2006). The Andean landscape is also characterized by the rich and fertile soil for agriculture. Large areas of the Andean slopes are used for industrial agriculture tubercle crops such as potatoes and for leguminous plants as well as for pastures. As a result of these processes, the natural configuration of

*Corresponding author:

José Iván Mojica Corzo, jimojicac@unal.edu.co

Recibido: 20 de octubre de 2014

Aceptado: 19 de enero de 2015

creeks has undergone a rapid transformation during the last decades. In some cases many of the water bodies are lost forever with their fish species, zooplankton and aquatic flora (Vélez-Espino, 2005).

A habitat suitability model has been established for species such as *Astroblepus ubidiai* to reflect abundance and make suggestions for the conservation of this species (Vélez-Espino, 2004). Because the Andean cordilleras water bodies share some similarities, these analyses can be applied to most species of *Astroblepus*. Degrees of habitat fragmentation in the Colombian Cordilleras are coupled with those of the other South American countries such as Ecuador, Bolivia, Chile, Peru and Venezuela. Although there are no studies on habitat fragmentation in the Andean Cordilleras of Colombia, the anthropogenic perturbation may be more devastating as the economy of this country has improved in the last five or so years. We observed and describe here a remarkable ability of these small catfishes to survive extreme habitat alterations.

We describe in this work the habitat conditions and behavior of a population of *A. mariae* from the Rio Negro drainage in the Departamento de Cundinamarca, in the northeast central part of Colombia. This is a preliminary report on the habitat alteration of this species of *Astroblepus* inhabiting the Colombian cordilleras and it serves as the baseline for further assessment of the habitat suitability index in the northern ranges of Colombia.

Materials and methods

Study area. Six creeks were sampled for fish and physico-chemical variables. The creeks are located in the watershed of the Rio Negro Basin, Department of Cundinamarca, central part of Colombia (4°39'26"-4°38'43"N and 73°52'5"-73°52'11" W). The area is characterized by extensive human activity such as agriculture, grazing, and human settlements including small villages called Corregimientos and aggregations of houses along the road. Creeks are tributaries of the Río Negro (Figure 1) which in turn is a tributary of the Río Meta, from the Orinoco Basin and are numbered 1 to 6 in the tables. Observations were performed during a 2 weeks period of December 2013 and January 2014. Creek 1 presented extreme anthropogenic perturbation, and it encompasses most of the analyses and discussion in this report.

Creek 1, which we refer here as the "Spring", is located about 0.9 miles from the village of "Mundo Nuevo" along the road to Choachi in the province of Cundinamarca (N. 4°39'26" and W. 73°52'5"). The Spring is about 250m (750 feet) long, width=30cms, depth=5cms to 10cms, with an approximate slope of 45°. Two distinctive segments were identified based on the degree of perturbation. The first segment is located on the left side of the road to Choachi and the other on right side of the same road. The segment on the left side of the road is identified as Spring Segment 1 (SprSeg1) and it extended from its origin to the road. With a length of no

more than 50ms (150 feet), this segment is located in an area with pasture, and cattle were present. The other segment, Spring Segment 2 (SprSeg2) was also pasture but without cattle. A distinctive third zone was also observed between SprSeg1 and SprSeg2 that is referred to here as the buffer or transition zone. This buffer zone was a short segment of no more than 10m. SprSeg1 and SprSeg2 were sampled for fish and physicochemical values (Table 1).



Figure 1. Map of the headwaters of the Rio Negro, central region of the Department of Cundinamarca.

Table 1. Values for variables measured in the analyses. Estimation of the cover (plants) was visual, as well as for the presence or absence of fish and plankton (p for presence and a for absence).

Creek	Oxygen ppm	Oxygen saturation	T°C	pH	Cover	Fish	Zooplankton
SprSeg1	2.49	29	23.4	6	3	a	a
SprSeg1	5.11	52.4	16.8	6	3	a	a
SprSeg1	5.38	55.6	17.1	7	3	a	a
SprSeg1	5.45	59.1	18.8	7	3	a	a
SprSeg1	5.10	58.0	21.1	7	3	a	a
SprSeg2	5.72	51.3	16.0	7	2	p	p
SprSeg2	6.30	58.5	15.0	7	2	p	p
Creek	6.30	65.0	14.0	7	1	p	p
Creek	6.80	66.7	14.6	7	1	p	p
Creek	6.54	64.5	14.8	7	1	p	p
Creek	6.50	65.4	15.7	7	1	p	p
Creek	6.25	62.8	15.8	7	1	p	p

Five sites were selected along SprSeg1 to measure the physicochemical variables (temperature, oxygen saturation (percentage) and concentration (parts per million), pH) were also estimated from its origin to the road. The sites were about 10ms apart from each other. Two sites were selected for SprSeg2 to measure the variables. These variables were also measured along the buffer zone. Substrate composition for both the “Spring” and the other creeks follows the classification of Vadas and Orth (2001). In addition vegetation abundance estimated as: 1 for abundant, 2 not abundant and 3 for absent (Table 1), was also estimated for all sites in the segments and buffer zone. Some plants were collected for further taxonomic determination. These variables were also estimated for Creeks 2 to 6 (referred to here as Creeks 2-6) for further comparison and data analyses.

Sampling for specimens of *Astroblepus mariae* was performed along the “Spring” and the other adjacent Creeks 2-6. Fish sampling gear included small seine nets and quick-seine nets. Estimated specimens were preserved and fixed in the field, and transported to Instituto de Ciencias Naturales (ICN-MHN Universidad Nacional de Colombia).

Other variables collected but not included in this analysis were; slope, length of the water bodies, width, depth, type of flow, substrate composition and zooplankton. Composition of zooplankton was assessed for the most abundant groups. Habitat perturbation was visually estimated and is described in this paper. Habitat perturbation description follows that in Vélez-Espino (2006).

Statistical analysis. The statistical tests are limited by the small sample sizes of the variables. If provided, levels of confidentiality need to be corroborated with larger sample sizes for the different variables. Some of the tests were adjusted for unbalanced data and included one-way-analysis of variance (ANOVA). Two one-way-analyses of variance were accomplished as follows: the first one was performed on the data collected to assess significant differences between Creeks 2-6 as one single group of data with the SprSeg1 with major human disturbance. Values for the variables from SprSeg2 were included with the group of Creeks 2-6 for these analyses because both groups of water systems shared similar characteristics, such as pH, oxygen concentration and saturation, and more importantly, the presence of fish. The second analysis was applied to assess significant differences within the “Spring” segments 1 and 2 SprSeg1 and SprSeg2 (see spring topography in the results session). The circle intercept test for the means was used to estimate the minimum vital conditions values required by individuals of *A. mariae* to exist in the sampled water systems. This analysis was performed considering the presence-absence of fish *versus* those variables with significant mean differences. The statistical analyses were performed with the software package JMP™. Due to the sample size differences between the two segments of the “Spring”, a t test with an unbalanced analysis was performed as recommended by the JMP™

Software Guide. A Tukey-Kramer test for degrees of data overlap was also performed in those cases where the t test did not render higher confidentiality (see pH means). Significant factors determining absence or presence of *A. mariae* are also estimated and discussed.

Results

The topography and substrate compositions were different for both the Creeks 2-6 and the “Spring”. Creeks 2-6 presented waterfalls, bedrock and large rocks. Width, depth and amount of water were substantially larger compared with the “Spring”. The Creeks 2-6 watersheds included areas used for agriculture but their shorelines were covered by abundant vegetation characterized by bushes and plants. Both segments of the “Spring”, SprSeg1 and SprSeg2 had the same substrate composition including sand, mud, gravel, pebble and no bedrock was observed. Unlike the Creeks 2-6, the “Spring” watershed had no streamside vegetation therefore it had a higher exposure to solar radiation, likely the reason why the temperature values were different (see t test below). The shoreline of SprSeg1 was the most exposed to solar radiation. The margins of this segment of the “Spring” were irregular and somewhat un-identifiable in some fragments. Cattle tracks and cattle feces were observed in the waterbed (Figure 2). The shoreline of this segment had no plants of any kind found along the SprSeg2. Down the slope, when the SprSeg1 reached the road, it changed direction and 10 or so meters it disappeared underneath a bridge. This short fragment of the “Spring” is separated from SprSeg1 by a fence, therefore no cattle were observed and it can be regarded as a buffer zone. Neither fish nor zooplankton were found in SprSeg1.

The SprSeg2 watershed consisted of grass and some scattered plants. Unlike the Creeks 2-6 that have bushes and tall plants, SprSeg2 was populated by *Ludwigia sp*, a small



Figure 2. Photograph of the SprSeg1. Note the levels of perturbation. Water flow is reduced to almost absent. Spring shoreline is undefined and naked with no plants; compared it with figure 3.

plant (Figure 3). Although this segment did not have cattle, it was used for grazing about a month before the exploration of the area (information taken from interviews *in situ*). Unlike SprSeg1, the margins of SprSeg2 were defined and had abundant *Ludwigia sp* on the shorelines and the water bed was composed by small falls, currents and ponds no more than one meter long and 50cms wide. The small falls harbored organic matter represented by leaves, grass, and sticks. Two specimens of *A. mariae* were collected and there was abundant zooplankton represented by arthropods and annelids. Several specimens of crabs were also observed.

The buffer zone in between the two segments of the “Spring” can be considered as a transition zone between the highly perturbed SprSeg1 and SprSeg2. The zone has distinctive features compared with both, SprSeg1 and SprSeg2. Unlike the two segments of the “Spring”, the buffer zone remains untouched and may have more stable conditions year round. It had abundant *Ludwigia sp* and may also serve as a refuge for *A. mariae* when cattle are switched to the SprSeg2.

In general, the group of Creeks 2-6 presented fairly stable conditions. The variables were constant along the length of their shoreline. This homogeneity represented more habitat stability and therefore more fish were collected in these creeks. Fish were collected in different parts of the creeks which is an indication of the favorable conditions for *A. mariae* in these small water systems. However, none of the creeks presented primary vegetation and plants on the shoreline of were exotic species. Most of the specific taxa are introduced and include representative species of Melastomataceae, Rosaceae, Solanaceae, Platanaceae and Scrofulariaceae. As expected, plants provide shade and are crucial suppliers of organic matter to sustain the creek habitat.



Figure 3. Photograph of the SprSeg2. Note the presence of *Ludwigia sp*, the complete reestablishment of the water flow and the spring shoreline. Compared with figure 2.

Zooplankton in these creeks was present and abundant. Composition of the zooplankton was mostly arthropods followed by annelids. Variables such as oxygen concentration, oxygen saturation, pH and temperature had no significant variation along the creek’s length and within the creeks with more stable conditions.

When the means of the variables from the “Creeks 2-6” and SprSeg2 were compared with those of the SprSeg1 (Table 1), significant differences were found from the analyses except for pH ($p > t = 0.1$). To reinforce this result a Tukey-Kramer test to assess closeness of the means for pH was also applied and the results concurred with the t test. ANOVA tests for the other mean variables (oxygen concentration, oxygen saturation and temperature) rendered significant differences with p values 0.01, 0.02 and 0.03 respectively.

Significant differences were also recovered from the second analysis for oxygen concentration, and pH when SprSeg1 (Table 1) was compared with SprSeg2, ($p > t = 0.05$ and $p > t = 0.08$ respectively). Probabilities of getting greater t values were observed for oxygen saturation and temperature. The means for these two variables were not different.

The third statistical analysis (the circle intercept test for the recovered means) rendered the following conclusions below when both presence and absence of fish (see also Table 1) were plotted versus the significant mean values. Individuals of *A. mariae* live in the Creeks 2-6 and SprSeg1 where the oxygen concentration had a minimum concentration equal or above 5.5ppm and temperatures of 16°C or lower. Borderline conditions were somewhat difficult to observe for oxygen saturation and pH. However these catfishes may prefer oxygen saturations of 55% or above and a pH value of 7.

Discussion

With the two recognized segments presenting different degrees of perturbation, creek 1 (or the “Spring”, Figs. 2 and 3) is regarded here as a natural laboratory to study not only the ecology but also behavioral responses of *A. mariae* to drastic environmental changes. The fact that fishes were found in this spring requires more attention and demands long-term studies to assess the habitat perturbation index, suitability index, management recommendations and most importantly, to estimate the evolutionary strategies of the individuals of *A. mariae* to habitat contingencies.

As described above, the characteristics for the “Spring” or Creek 1 are remarkably different from the other creeks (Creeks 2-6). It did not have cover provided by trees, and the size and width were comparatively smaller than those of Creeks 2-6. Added to these conditions is the fact that farmers switch their cattle constantly from SprSeg1 to SprSeg2 and vice versa when the pasture is depleted on the other segment. According with an interview, the farmers switch their cattle every month. Recovery of the suitable living conditions for *A. mariae* after grazing in either SprSeg1 or SprSeg2 may require longer time.

The presence of *A. mariae* individuals in this spring with such different conditions elicits different questions. For instance, what are the required factors of these catfishes for survival? Do they migrate long distances when the cattle are switched to SprSeg2 or do they stay in the refuge along that segment waiting for suitable conditions in the other side? How do these fishes respond to the increased temperature and other conditions related to the lack of shade provided by trees? All of these questions need to be answered with long term studies designed to provide us with more data.

When the cattle are switched to the SprSeg1, the individuals of *A. mariae* may have one of the following two responses or both. First, they may migrate in the search for better conditions, mainly food. This response implies migration up or down the stream of the main river channel. This response presents difficult barriers for individuals of *A. mariae*. Although no direct observations were made and were based on information gathered from local people, the main channel is the preferred habitat for exotic species such rainbow trout, cited as one of the most predaceous fish on native species in North America (Miller et al., 1989). Despite the fact that no studies have been done addressing local extinction of astrolepids in Colombia, we predict that this exotic fish may be one of the main causes of decline of *A. mariae*, combined with habitat perturbation by humans (see also Vélez-Espino, 2003). Other barriers are the water conditions on the main channel that may be unsuitable for long distance migrations. Oxygen concentration and pH may be too low in combination with the high turbidity of the Rio Negro that might prevent these catfishes from migrating along that river.

The other answer to the habitat alteration in the spring is a short migration to refuges along the “Spring” itself. These refuges are buffer zones or transition zones between high and medium perturbed habitats for both, SprSeg1 and SprSeg2. As observed in the field, the “Spring” presents two recognizable zones or segments and an untouched zone in between. The third zone may have stable conditions year round and serve as a micro-refuge for individuals of *A. mariae* during sudden and unexpected habitat alterations. We proposed the strategy of micro-refuge exploitation by these catfishes of the transition zone as the possible response when the conditions change dramatically after the introduction of cattle in the SprSeg2. Although in a small scale, our proposed refuge can be a homologue of the buffer zones and ecological corridors from current literature. The theory on ecological corridors and buffer zones is rather old and abundant (Simpson, 1936; Preston, 1960; Forman, 1983 and Simberloff & Cox, 1987). Both, buffer zones and ecological corridors are used by animals during a certain period of their life cycle and regardless of their size, these areas increase the chances of survival (Preston, 1960), conservation and sustainability of animal diversity (sensu Bennett, 1991 and Shafer, 1990). Buffer zones and ecological corridors permeate physical conditions and in general present

gradients of the environmental factors between disparate habitats (Simberloff and Cox, 1987). Our proposed micro-refuge may present suitable conditions for the individuals of *A. mariae* until the SprSeg1 recovers.

Recovering of SprSeg1 includes the reestablishment of the conditions for these catfishes to survive. The process has to be fast and it starts with and is determined by the blooming of the non-perennial plant *Ludwigia sp.* This plant blooms in the margins of highly perturbed springs and creeks to the extent that it can take over the waterbed of little water systems. This characteristic is advantageous not only for the plant itself but also for the zooplankton and astrolepids. The process starts with the establishment of the non-perennial plant followed by the surge of zooplankton (mainly arthropods and annelids) and later the invasion of *A. mariae*. Simultaneously with the reestablishment of the plant, the abiotic conditions, i.e., oxygen concentration, pH, temperature reach the suitable levels for animals to populate the recovering spring.

The presence of the plant in the transition zone is fundamental because it provides shelter to the fish and prevents undesirable matter from cattle, i.e., feces and urine from reaching the SprSeg2. The plant may also reestablish the normal oxygen levels, pH, and temperature before the water reaches the SprSeg2. These predictions need to be corroborated with more data and statistical analysis.

Assessing the existing habitat conditions for *A. mariae* is a daunting task mostly because of the lack of information on its taxonomic and systematic status. The distribution of *A. mariae* is unknown as it is for most of the 54 recognized species (Schaefer, 2003, and 2011). This situation makes the application of models assessing the ecological status of the species even more difficult because each species presents different responses to habitat disturbances. Studies on the taxonomy and distribution are fundamental before estimating habitat alteration and the species response to ecological changes. Systematics studies based on morphology and genetics using DNA currently underway by the main author will shed some light on the distribution and population structure of this species. Our aim in this report was not to present a complete analysis of the ecological status of *A. mariae*, but to present baseline conclusions for further and more comprehensive studies, i.e., habitat suitability index, human perturbation index and others.

Acknowledgements

We thank Miguel Leonardo Martínez for his help during the fieldwork. We also thank Miguel Leonardo Martínez Sr for driving the main author to the areas of study. We extend our thanks to José Espitia, Chief of the Museum of Natural History (Universidad de La Salle) and Marta García, Chief of the Zoology Collection (Departamento de Biología, Universidad Pedagógica Nacional at Bogotá). Julio Betancur (MHN-ICN) determined the specific name

of the small plant found along the SprSeg2. We extend our special thanks to Francisco Medellín (Departamento de Biología, Universidad Pedagógica Nacional). We thank the Biochemistry Lab personnel, Universidad de La Salle (Bogotá) for providing the main author with glassware and pH-meter for fieldwork. Donald Taphorn and an anonymous reviewer provided insightful comments and corrections to improve this manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest of any kind

Bibliography

- Arratia, G.** 1990. Development and diversity of the suspensorium of trichomycterids and comparison with loricarioids (Teleostei: Siluriformes). *Journal of Morphology* **205**: 193-218.
- Bennett, G.** (Ed). 1991. Towards a European Ecological Network. IEEP. Arnhem. The Netherlands.
- Buitrago-Suaréz, U.A.** 1995. Sistemática de las especies colombianas del género *Astroblepus* Humboldt 1805 (Pisces: Siluroidei: Astroblepidae). MSc. Dissertation ICN-UNal Colombia.
- DeCropp, W., E. Pauwels, L. Van Hoorebeke, T. Geerinckx.** 2013. Functional morphology of the Andean climbing catfish (Astroblepidae: Siluriformes): Alternative ways of respiration, adhesion, and locomotion using the mouth. *Journal of Morphology* **274**: 1164-1179.
- Forman, R.T.** 1983. Corridors in a landscape: their ecological structure and function. *Ekologia* **2**: 375-387.
- Gerstner, C.L.** 2007. Effects of oral suction and other friction-enhancing behaviors on the station-holding performance of suckermouth catfish (*Hypostomus* spp.). *Canadian Journal of Zoology* **85**: 133-140.
- Howes, G.J.** 1983. The cranial muscles of loricarioid catfishes, their homologies and values as taxonomic characters (Teleostei: Siluroidei). *Bulletin of the British Museum of Natural History (Zoology)* **45**: 309-345.
- Nelson, J.S.** 2006. *Fish of the World*. New Jersey: Wiley. 601p.
- Johnson, R.D.** 1912. Notes on the habits of a climbing catfish (*Arges marmoratus*) from the republic of Colombia. *Annals of the New York Academy of Sciences* **22**: 327-333.
- Miller, R.R., J.D. Williams, J.E. Williams.** 1989. Extinctions of North American Fishes during the last century. *Fisheries* **14** (6): 22-38.
- Preston, F.W.** 1960. Time and space and the variation of species. *Ecology* **29**: 254-283.
- Schaefer, S.A.** 2003. Family Astroblepidae. In Reis RE, Kullander SO, Ferraris CJ Jr, eds. *Check List of the Freshwater Fishes of South and Central America*. Porto Alegre: Edipucrs, 312-317
- Schaefer, S.A., P. Chakrabarty, A. Geneva, M. Sabaj-Pérez.** 2011. Nucleotide sequence data confirm diagnosis and local endemism of variable morphospecies of Andean astroblepids catfishes (Siluriformes: Astroblepidae). *Zoological Journal of the Linnean Society* **2011**: 1-13.
- Shafer, C.L.** 1990. *Nature reserves*. Smithsonian Institution Press.
- Simberloff, D., J. Cox.** 1987. Consequences and costs of conservation corridors. *Conservation Biology* **1**: 63-71.
- Simpson, G.G.** 1936. Data on the relationships of local and continental mammalian faunas. *Journal of Paleontology* **10**: 410-414.
- Vadas, R.L., D.J. Orth.** 2001. Formulation of habitat suitability models for stream fish guilds: do the standard methods work? *Transactions of the American Fish Society* **130**: 217-235.
- Vélez-Espino, L.A.** 2003. Taxonomic revision, ecology and endangerment categorization of the Andean catfish *Astroblepus ubidiai* (Teleostei: Astroblepidae). *Review in Fish Biology and Fisheries* **13**: 367-378.
- Vélez-Espino, L.A., M.G. Fox.** 2005. Demography and environmental influences on life-history traits of isolated populations of the Andean catfish *Astroblepus ubidiai*. *Environmental Biology of Fishes*. **72**: 189-204.
- Vélez-Espino, L.A.** 2006. Distribution and habitat index model for the Andean catfish *Astroblepus ubidiai* (Pisces: Siluriformes) in Ecuador. *Revista Biología Tropical* **54** (2): 623-638.

Listado taxonómico y distribución de los tricópteros inmaduros del departamento del Tolima

Edwin O. López-Delgado^{1,*}, Jesús M. Vásquez-Ramos^{1,2}, Gladys Reinoso-Flórez^{1,3}

¹Grupo de Investigación en Zoología, Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

²Programa de Biología, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia

³Programa de Biología, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Resumen

El presente listado taxonómico y de distribución de tricópteros inmaduros corresponde al material biológico depositado en la Colección Zoológica de la Universidad del Tolima-CZUT-Ma. Se registraron 14 de las 15 familias y 35 de los 45 géneros reportados para Colombia. Las familias más abundantes fueron Hydropsychidae, Hydroptilidae, Leptoceridae, y los géneros, *Smicridea*, *Leptonema* y *Hydroptila*. Con relación a la distribución altitudinal, los géneros con los mayores rangos de distribución fueron *Neotrichia*, *Leucotrichia* y *Smicridea*, recolectados desde los 244 m hasta los 3.533 m. Con el fin de establecer las relaciones entre los géneros de Trichoptera y las zonas de vida, se hizo un análisis de correspondencia cuyos resultados permitieron identificar que la mayor riqueza específica de este grupo faunístico en el departamento del Tolima se concentró en las zonas de vida correspondientes a bosque seco tropical, bosque húmedo premontano y bosque húmedo montano bajo.

Palabras clave: Trichoptera, Tolima, zonas de vida, correspondencia, CZUT.

Taxonomic list and distribution of immature caddisflies in the Department of Tolima

Abstract

This taxonomic list of the Trichoptera larvae references data from the Zoological Voucher Collection at Universidad del Tolima, Colombia (*Colección Zoológica de la Universidad del Tolima – CZUT-Ma*). This collection includes 14 families and 35 genera of Trichoptera (out of the 15 families and 45 genera currently registered in Colombia). The most abundant families were Hydropsychidae, Hydroptilidae and Leptoceridae. The most abundant genera were *Smicridea*, *Leptonema* and *Hydroptila*. Regarding altitudinal distribution of the taxa found in the collection, *Neotrichia*, *Leucotrichia* and *Smicridea* exhibited the widest distribution, since they were found from 244m to 3533m. Results from a correspondence analysis performed on the taxa vs Holdridge life zones data, revealed that the highest species richness of the order Trichoptera in Tolima (Colombia) concentrated in the tropical dry forest, wet pre-mountain forest and lower wet mountain forest zones.

Key words: Trichoptera, Tolima, Holdridge life zones, correspondence analysis, CZUT.

Introducción

Los tricópteros son organismos holometábolos, pues desarrollan los estados de huevo, larva, pupa y adulto (Posada & Roldán, 2003). Sus formas inmaduras son acuáticas y los adultos son voladores. Las larvas se encuentran en diferentes hábitats, principalmente en ecosistemas lóticos, presentan generalmente cinco estadios larvales con tamaños entre 1 y 30 mm, y pueden ser libres o vivir en refugios que construyen con seda y diferentes materiales orgánicos e inorgánicos. Estos organismos presentan tres regiones corporales bien desarrolladas y diferenciadas: cabeza, tórax y abdomen. La cabeza está esclerotizada, los ojos son pequeños y simples, presenta piezas bucales masticadoras bien desarrolladas y con una glándula productora de seda (Muñoz-Quesada, 2004). El tórax posee tres segmentos bien diferenciados, el protórax siempre aparece esclerotizado y los restantes tienen

diversos grados de esclerotización, proyectándose en cada uno de ellos un par de patas bien desarrolladas. El abdomen está dividido en nueve segmentos, que pueden o no tener branquias o pequeñas regiones esclerotizadas; en el último segmento abdominal se encuentran un par de propatas anales, cada una de ellas con una uña terminal, que pueden variar de forma en las distintas especies (Wiggins, 1996; Angrisano & Sganga, 2009).

En Colombia los tricópteros se distribuyen ampliamente en la región suroccidental, especialmente en las vertientes orientales y occidentales de las cordilleras Oriental y

*Correspondencia:

Edwin Orlando López Delgado, eolopezd@gmail.com

Recibido: 2 de septiembre de 2014

Aceptado: 13 de marzo de 2015

Occidental (Quintero & Rojas, 1987). Se han registrado un total de 15 familias, 45 géneros y 210 especies válidas, de cuyos organismos solo se ha reportado el 10 % (Muñoz-Quesada, 2004, Posada & Roldán, 2003). En el departamento del Tolima se han registrado 30 géneros de larvas de tricópteros distribuidos en 13 familias presentes en las cuencas de los ríos Coello, Prado, Amoyá y Totare (Vergara, et al., 1994; Reinoso, 1998, 2001; Carrillo, 2002; Guevara, 2004; Guevara, et al., 2006; Vásquez, et al., 2006, 2007, 2008, 2008a, 2008b; López, et al., 2006; López, 2007, Ramírez, et al., 2007, 2008a, 2008b, Reinoso, et al., 2007; Vásquez & Ramírez, 2008, López & Reinoso, 2008).

Ecológicamente, los tricópteros juegan un papel muy importante en los ecosistemas acuáticos, ya que hacen parte de la cadena trófica y son el principal alimento de una gran variedad de peces, aves y otros vertebrados que se encuentran cerca de los cuerpos de agua (Wiggins, 1996; Domínguez & Fernández, 2009). Además, se han posicionado como grupo potencialmente útil en los estudios sobre calidad del agua debido a su sensibilidad frente a los cambios físicos y químicos (Guevara, et al., 2006; Valero, et al., 2001). Por lo tanto, surge la necesidad de desarrollar estudios encaminados a conocer la riqueza taxonómica de este grupo y su distribución en las diferentes zonas de vida en la cordillera Central de los Andes colombianos.

Materiales y métodos

El listado de géneros de los tricópteros inmaduros se compiló a partir de la información de los organismos depositados en la Colección Zoológica de la Universidad del Tolima (CZUT-Ma). Los ejemplares provienen principalmente de los estudios de biodiversidad regional que se han desarrollado en el marco del convenio entre la Universidad del Tolima y la Corporación Autónoma Regional del Tolima – CORTOLIMA, como parte del Plan de Ordenamiento de las Cuencas Hidrográficas de Coello, Prado, Totare, Lagunillas, Anchique y Saldaña (subcuencas Amoyá, Anamichú, Patá, Hereje) del departamento de Tolima, Colombia.

A partir de los datos obtenidos de la colección biológica se elaboraron matrices de abundancia por familias y géneros con sus respectivas localidades, altitudes, coordenadas geográficas y zonas de vida, de acuerdo a la clasificación de Holdridge (1987) y con la ayuda del programa Microsoft Excel 2010. Además, con este mismo programa se calcularon y graficaron los datos sobre abundancia relativa. Los datos de distribución altitudinal se calcularon restando del valor más alto de altitud el menor registrado para cada uno de los taxones.

Con el fin de determinar la distribución de los géneros con respecto a las zonas de vida se hizo un análisis de correspondencia, en el cual se relacionaron los géneros con las zonas de vida registradas en cada punto de muestreo. Este análisis de ordenación se hizo con el programa estadístico CANOCO 4.5 (Lepš, J., & Šmilauer, P., 2003).

Resultados

Se presenta a continuación el listado taxonómico de los géneros de los tricópteros inmaduros registrados en el departamento del Tolima en las cuencas de los ríos Coello, Prado, Totare, Lagunillas, Anchique y Saldaña (subcuencas Amoyá, Anamichú, Patá, Hereje) (Tabla 1S, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/108/691> y Tabla 2S, <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/108/692>), en el que se reportan 35 géneros distribuidos en 14 familias. Las familias más abundantes fueron Hydropsychidae (42,7 %), Hydroptilidae (18,16 %) y Leptoceridae (9,26 %), y las menos abundantes y poco frecuentes, Anomalopsychidae (0,34 %), Ecnomidae (0,18 %) y Xiphocentronidae (0,07 %) (Figura 1).

Con relación a los géneros, los más abundantes fueron *Smicridea* (24,99 %), *Leptonema* (17,13 %) e *Hydroptila* (9,62 %), los cuales representan el 51,74 % del total de organismos registrados para el departamento del Tolima. En contraste, los menos abundantes fueron *Macronema* (0,03 %), *Mortoniella* y *Macrostemum* (ambos con 0,02 %) y, por último, *Mexitrichia* (0,01 %) (Figura 2).

Distribución altitudinal

En cuanto a la distribución altitudinal, los géneros que presentaron los rangos más amplios fueron *Neotrichia*, *Leucotrichia* y *Smicridea*, mientras que los rangos más bajos fueron registrados por *Ithytrichia*, *Banyallarga* y *Anomalocosmoecus*. Es importante destacar que los géneros *Mexitrichia* y *Macrostemum* solo se registraron en una de las localidades de estudio, por lo tanto su valor en la distribución altitudinal fue puntual (Figura 3).

Distribución de los taxones de acuerdo a las zonas de vida

Con relación a las zonas de vida, los géneros *Smicridea*, *Atopsyche*, *Helicopsyche* y *Nectopsyche* se distribuyeron ampliamente en la mayoría de las zonas del departamento, desde la de bosque seco tropical (bs-T) hasta la de bosque pluvial subalpino (bp-SA). En contraste, los taxones

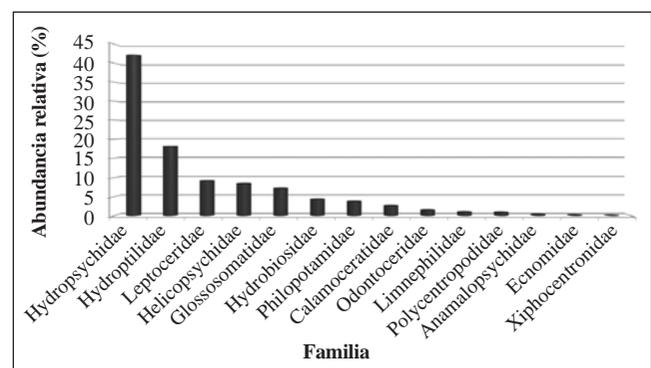


Figura 1. Abundancia relativa de las familias de las larvas del orden Trichoptera recolectadas en el departamento del Tolima entre el 2004 y el 2008

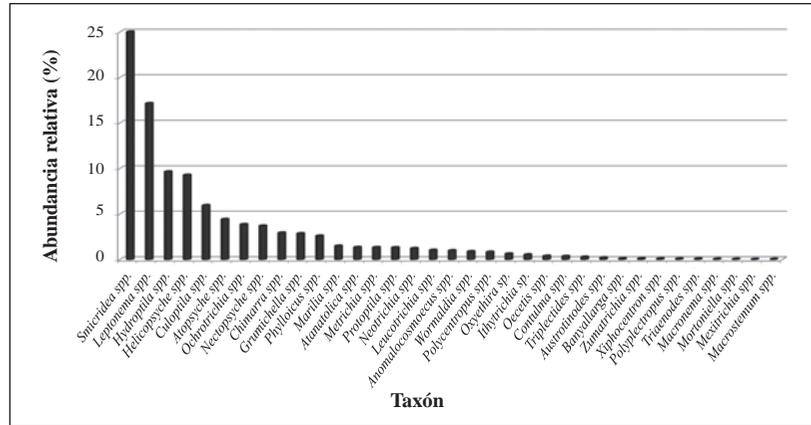


Figura 2. Abundancia relativa de los géneros de las larvas del orden Trichoptera recolectadas en el departamento del Tolima entre el 2004 y el 2008

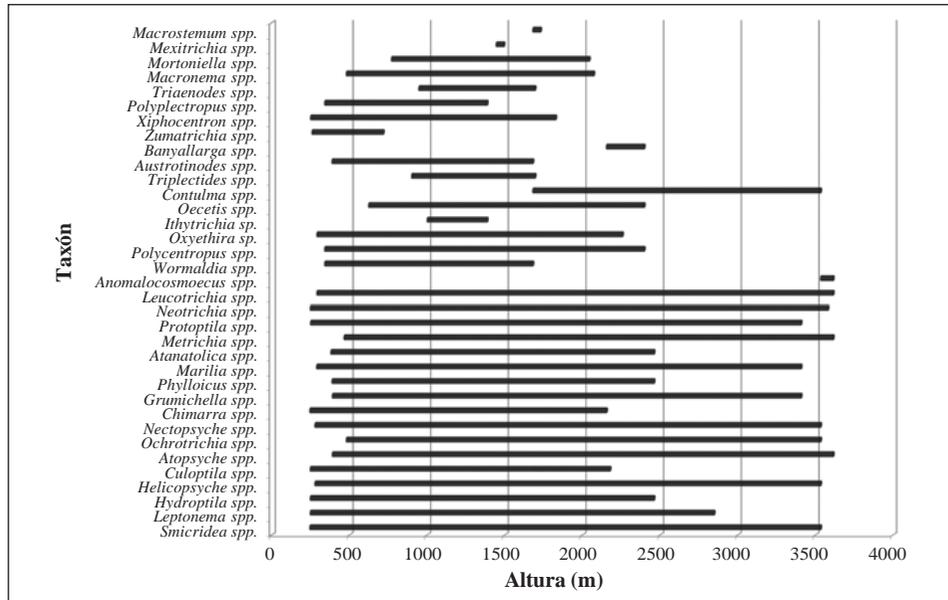


Figura 3. Distribución altitudinal de los géneros de las larvas del orden Trichoptera recolectadas en el departamento del Tolima

Anomalocosmoecus, de la zona de bosque pluvial subalpino (bp-SA); *Banyallarga*, de la de bosque húmedo montano bajo (bh-MB); *Macrostemum*, de la de bosque húmedo montano bajo (bh-MB), y *Mexitrichia*, de la de bosque húmedo premontano (bh PM), se registraron en una sola zona de vida; sin embargo, es importante tener en cuenta que el registro de estos dos últimos taxones es puntual, pues solo se han recolectado en una localidad de las 157 evaluadas (Tabla 1S) (Figura 4).

Discusión

Para Colombia se han reportado 15 familias y 45 géneros de Trichoptera (Muñoz-Quesada, 2004, Posada & Roldán, 2003). Catorce de estas familias y 35 de los géneros se han registrado en el departamento del Tolima, lo que evidencia la gran representatividad de la fauna de tricópteros en este

departamento, la cual probablemente aumentará a medida que se sigan fomentando y haciendo estudios taxonómicos y ecológicos en la región.

Según los datos obtenidos de la Colección Zoológica de la Universidad del Tolima, la familia más abundante en las diferentes cuencas evaluadas fue Hydropsychidae. Estos resultados concuerdan con los reportados en diferentes estudios hechos en el Tolima y en otras regiones del país, en los cuales se ha identificado que los organismos pertenecientes a esta familia se caracterizan por su versatilidad y capacidad para colonizar diferentes tipos de sustratos como rocas, arena, grava, cieno y hojarasca (Guevara, 2004; Muñoz-Q, 2004; López, et al., 2006; López, 2007; Vásquez-Ramos, 2008). Además, se ha evidenciado que la mayoría de individuos de esta familia, especialmente de los géneros *Smicridea* y

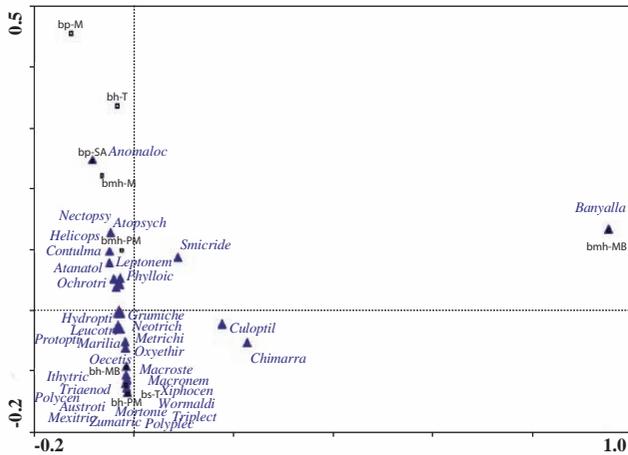


Figura 4. Distribución de los géneros de las larvas del orden Trichoptera recolectadas en el departamento del Tolima entre el 2004 y el 2008 en las diferentes zonas de vida evaluadas

Leptonema, poseen una gran capacidad para tolerar diferentes tipos de ambientes, desde aguas completamente limpias hasta aguas con algún grado de intervención antrópica (Correa, et al., 1981; Quintero & Rojas, 1987; Vergara, et al., 1994; Roldán, 1996; Guevara, 2004; Muñoz-Q, 2004; López, et al., 2006; Mosquera, et al., 2006; López, 2007; Vásquez-Ramos, 2008; Vásquez-Ramos, et al., 2010).

Otra de las familias más abundantes fue la Hydroptilidae, la cual se caracteriza por ser una de las más diversas del orden y por habitar zonas de corrientes tanto rápidas como lentas, principalmente en zonas tropicales (Moor & Ivanov, 2007). Igualmente, esta familia se ha encontrado en todas las regiones del mundo y en todos los pisos altitudinales colonizando diferentes tipos de sustratos como vegetación acuática, musgos y zonas de salpicaduras de sustratos pedregosos donde se alimenta del perifiton que crece sobre estas superficies (Flint, 1991; Posada & Roldán, 2003; Muñoz-Q, 2004; Moor & Ivanov, 2007; Vásquez-Ramos, 2008; Oliveira, et al., 2005; Gómez-Aguirre, et al., 2009; Springer, 2010).

Así mismo, la familia Leptoceridae registró una abundancia considerable, siendo también una de las más diversas del orden. Esta familia presenta diversos comportamientos tróficos, como en las larvas detritívoras o predatoras, en tanto que algunas se alimentan del perifiton, especialmente de diatomeas que crecen sobre las rocas de las zonas de salpicaduras (Muñoz-Q, 2004). Algunos autores como Holzenthal (1994) consideran que este grupo de organismos se encuentra en aguas con corrientes rápidas o lentas y poseen ventajas adaptativas como la construcción de refugios en forma cónica que les brindan protección y los hacen poco llamativos para sus depredadores.

Las familias Anomalopsychidae, Ecnomidae y Xiphocentronidae registraron los valores más bajos de abundancia en las cuencas evaluadas, por lo que se podría considerar a estas

tres familias como raras y poco frecuentes en el departamento del Tolima, lo cual coincide con lo reportado en otros departamentos por Posada & Roldán (2003), Muñoz-Q, 2004 y Ballesteros, et al., 1997. Dichos hallazgos podrían indicar que estos organismos poseen una alta sensibilidad a las variaciones ambientales y que presentan cierto grado de selectividad de microhábitats específicos.

Los individuos del género *Contulma* (Anomalopsychidae) se registraron en aguas con corrientes rápidas y sustratos con grava y arena desde los 1.680 m hasta los 3.533 m. Así mismo, los organismos registrados de la familia Ecnomidae, pertenecientes al género *Austrotinodes*, se recolectaron en corrientes rápidas con sustratos de roca, arena y hojarasca, desde los 387 m hasta los 1.680 m. Wiggins (2004) considera que los organismos de estas familias son muy raros y poco frecuentes en las recolecciones, por lo que algunos aspectos de su ecología y su biología aún son objeto de estudio. Por último, la familia Xiphocentronidae, registrada desde los 249 hasta los 1.827 m, se caracteriza por construir elaborados tubos de seda y arena pegados a las paredes de las piedras (Schmid, 1982); los organismos pertenecientes a esta familia se encontraron en corrientes de montaña densamente cubiertas por bosque, lo que podría indicar su preferencia por colonizar sustratos específicos, especialmente zonas de abundante vegetación riparia.

Los géneros más abundantes fueron *Leptonema* y *smicridea*, pertenecientes a la familia Hydropsychidae, los cuales se caracterizan por colonizar una amplia gama de sustratos (roca, hojarasca, grava, etc.), y construir extensas redes de seda que les facilitan la captura del alimento, convirtiéndolos en uno de los grupos más abundantes dentro del orden (Wiggins, 2004); algunos autores consideran que los taxones de la familia Hydropsychidae abarcan alrededor de 80 % de todos los tricópteros en el continente americano (Davis, et al., 1991; Quintero & Rojas, 1987; Vergara, et al., 1994; Roldán, 1996; Guevara, 2004; Muñoz-Q, 2004; Mosquera, et al., 2006; López, 2007; Vásquez-Ramos, 2008; Angrisano & Sganga, 2009; Vásquez-Ramos, et al., 2010), lo cual se ve reflejado en la alta densidad de organismos pertenecientes a estos taxones registrada en todas las regiones del país.

El género *Hydroptila*, perteneciente a la familia Hydroptilidae, fue el siguiente en orden de abundancia, situación que se debe, en parte, a su pequeño tamaño (1-5 mm), lo que le permite alcanzar densidades considerables en áreas pequeñas, especialmente en los tallos y hojas de plantas acuáticas (Flint, 1991).

Dos de los géneros menos abundantes en las diferentes cuencas evaluadas fueron *Macronema* y *Macrostemum*, pertenecientes a la familia Hydropsychidae. Estos taxones se caracterizan por ser raros y poco frecuentes en las recolecciones y, al parecer, su distribución está limitada por sus hábitos alimenticios, ya que construyen redes con

diámetros muy pequeños que les permiten alimentarse del perifiton más fino alojado en la columna de agua; además, los microhábitats que ocupan son difíciles de evaluar con los métodos de recolección convencionales, ya que se encuentran entre las grietas de las rocas y otros lugares de difícil acceso (Wallace, 1976; Wiggins, 1996).

Distribución altitudinal y zonas de vida

El amplio gradiente altitudinal presentado por los géneros *Neotrichia*, *Leucotrichia* y *Smicridea* se ha reportado en diferentes estudios llevados a cabo en la región andina (Ballesteros, *et al.*, 1997; Posada & Roldán, 2003; Guevara, 2004; López, *et al.*, 2006; Mosquera, *et al.*, 2006; López, 2007; Vásquez-Ramos, 2008). Algunos investigadores como Wiggins (1996), mencionan que estos organismos presentan una amplia distribución en el Neotrópico y que suelen ser euritolerantes, pues pueden encontrarse en ríos y quebradas con diferentes tipos de corrientes y temperaturas. Otro posible factor que puede influir en la amplia distribución de estos organismos es la capacidad que tienen los adultos para volar, ya que los individuos de estas dos familias poseen alas fuertes que les permiten desplazarse largas distancias y colonizar diferentes lugares de los cuerpos de agua (Davis, *et al.*, 1991).

Por otra parte, los taxones *Ithytrichia*, *Banyallarga* y *Anomalocosmoecus*, presentaron una variación altitudinal muy baja, resultado que podría indicar que estos géneros son sensibles a las variaciones de factores físicos como la temperatura, la materia orgánica disponible o el oxígeno disuelto, o a los cambios en la concentración química de nitritos, fosfatos, y en la conductividad eléctrica, entre otros (López, 2007; Vásquez-Ramos, 2008).

En cuanto a la distribución altitudinal, la precipitación y la temperatura, la mayor riqueza de la fauna tricóptera se concentró en las zonas de vida de bosque seco tropical bs-T, de bosque húmedo premontano y de bosque húmedo montano bajo, hecho probablemente está relacionado con la gran heterogeneidad y diversidad de hábitats que se encuentran en los cuerpos de agua de estas zonas, así como con una mayor cobertura riparia, la cual juega un papel importante en la distribución y el aporte de energía a las cadenas tróficas de los ecosistemas acuáticos (Vásquez, 2012). Los géneros que se distribuyeron ampliamente en las diferentes zonas de vida correspondieron a *Smicridea*, *Atopsyche*, *Helicopsyche* y *Nectopsyche*.

Por otra parte, los taxones *Macrostemum* (bh-MB), *Mexitrichia* (bh-PM), *Banyallarga* (bh-MB) y *Anomalocosmoecus* (bp-SA), se registraron solamente en una zona de vida. Estos individuos al parecer presentan una distribución puntual con relación a la temperatura, la precipitación y la altitud, las cuales posiblemente influyen en su desarrollo óptimo (Guevara, 2004; López, *et al.*, 2006; Vásquez-Ramos & Ramírez, 2008). El género *Anomalocosmoecus*, por ejemplo,

se registró solamente en la zona de vida de bosque pluvial subalpino por encima de los 3.000 m, con aguas frías muy oxigenadas y con poca o nula intervención antrópica (López, *et al.*, 2006; Guevara, 2004), lo que podría ser indicativo de la selectividad de estos organismos por condiciones ambientales específicas y de su limitada distribución en el departamento del Tolima.

Es importante tener en cuenta que la distribución del orden Trichoptera obedece a un sinnúmero de variables físicas, químicas y ecológicas. Entre ellas vale la pena mencionar la oferta alimenticia, que sin lugar a dudas es un factor limitante para la distribución, la colonización y la diversificación del orden (Bonada, *et al.*, 2005). Debe resaltarse el hecho de que la mayoría de los ecosistemas altoandinos se caracterizan principalmente por aguas pobres en nutrientes (oligotróficas), en las cuales la oferta de algas, especialmente clorofíceas y cianofíceas, es muy baja (Ramírez & Viña, 1998), lo cual se evidencia en la poca abundancia y riqueza de la fauna tricóptera en las zonas de vida ubicadas en alturas superiores a los 2.900 m en el departamento del Tolima.

Estos resultados constituyen un aporte valioso por la información taxonómica que aportan sobre la distribución y las zonas de vida en las que se encuentran los géneros de tricópteros inmaduros en ambos flancos de la cordillera Central, y en el flanco occidental de la cordillera Oriental de la zona central de los Andes colombianos. Estos resultados son parte esencial del eje estructural para los futuros planes de manejo y conservación de las cuencas del departamento, especialmente en lo referente al uso responsable y sostenible del recurso hídrico.

Conclusiones

El departamento del Tolima alberga el 93 % de las familias y el 78 % de los géneros de tricópteros reportados para Colombia, de los cuales un alto porcentaje habita en las zonas de vida de bosque seco tropical, bosque húmedo premontano y bosque húmedo montano bajo.

Esta revisión permitió establecer que en el departamento del Tolima la familia Hydropsychidae, representada por los géneros *Leptonema* y *Smicridea*, fue la más abundante y frecuente, así como la de mayor distribución, corroborando así los resultados obtenidos en otros departamentos y evidenciando la alta capacidad de estos organismos para tolerar ambientes diversos.

Los taxones Anomalopsychidae (*Contulma*), Ecnomidae (*Austrotinodes*) y Xiphocentronidae (*Xyphocentron*) fueron los menos abundantes, lo que sugiere que estos organismos son raros y poco frecuentes en el departamento.

Agradecimientos

Agradecemos a la Colección Zoológica de la Universidad del Tolima (CZUT) por facilitar la información necesaria para la elaboración del presente documento.

Información suplementaria

Tabla 1S. Listado de los géneros de tricópteros inmaduros registrados en el departamento del Tolima

Tabla 2S. Listado de las estaciones donde se han registrado larvas del orden Trichoptera en el departamento del Tolima

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Angrisano, E. B.** (1995). Insecta Trichoptera. En: Lopretto, E. y Tell, G., (Eds.). Ecosistemas de aguas continentales: metodologías para su estudio. La Plata, Argentina: Ediciones Sur, Tomo III.
- Angrisano, E. B. & Sganga, J. V.** (2009). Trichoptera. En: E. Domínguez & H. R. Fernández (Eds.). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Primera edición. Tucumán: Fundación Miguel Lillo. p. 255-308.
- Ballesteros, Y. V., Zúñiga, M. C., Rojas de Hernández, A. M.** (1997). Distribution and structure of the order Trichoptera in various drainages of the Cauca River basin, Colombia, and their relationship to water quality. En: Proceedings of the 8th International Symposium on Trichoptera. Ohio: Ohio Biological Survey. p. 19-23.
- Lepš, J., & Šmilauer, P.** (2003). *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. United States of America. Cambridge university press.
- Bonada, N., Zamora-Muñoz, C., Rieradevall, M., Prat, N.** (2005). Ecological and historical filters constraining spatial caddisfly distribution in Mediterranean rivers. *Freshwater Biology*. **50**: 781-797.
- Carrillo D.** (2002). Aspectos bioecológicos de los macroinvertebrados en el embalse de Hidroprado, departamento del Tolima. Trabajo de grado (Biólogo). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Ibagué.
- Correa M., Machado, T., Roldán, G.** (1981) Taxonomía y ecología del orden Trichoptera en el departamento de Antioquia en diferentes pisos altitudinales. *Actualidades Biológicas*. **10** (36): 35-48
- Davis, B., Hudson, P., Armitage, B.** (1991). Distribution and abundance of caddisflies (Trichoptera) in the St. Clair-Detroit river system. *Internat. Assoc. Great Lakes*. **17** (4): 522-535.
- Domínguez, E. & Fernández, H. R.** 2009. Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología. E. Domínguez & H. R. Fernández (Eds.). Primera edición. Tucumán: Fundación Miguel Lillo. p. 656.
- Flint, O. S.** 1991. Studies of Neotropical Caddisflies, XLV: The taxonomy, phenology, and faunistics of the trichoptera of Antioquia, Colombia. Washington, D.C. Smithsonian Institution Press. *Smithsonian contributions to zoology*. **520**: 113.
- Gómez-Aguirre, A. M., Longo-Sánchez, M. C., Blanco, J. F.** (2009). Macroinvertebrate assemblages in Gorgona Island streams: Spatial patterns during two contrasting hydrologic periods. *Actual Biol*, **31** (91): 161-178. Fecha de consulta: mayo de 2014. Disponible en: [http://matematicas.udea.edu.co/~actubiol/publicaciones_pdf/2009/2_RAB_31\(91\)_PDFs/Mss31\(91\)_PDFs/Ensamblaje de macroinvertebrados de las quebradas. pdf](http://matematicas.udea.edu.co/~actubiol/publicaciones_pdf/2009/2_RAB_31(91)_PDFs/Mss31(91)_PDFs/Ensamblaje de macroinvertebrados de las quebradas. pdf).
- Guevara G.** 2004. Análisis faunístico del orden Trichoptera en su estado larval en la cuenca del río Coello, departamento del Tolima. Trabajo de grado (Maestría). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Ibagué.
- Guevara, G., López, E., Reinoso, G., Villa-Navarro, F.** (2006). Structure and distribution of the Trichoptera fauna in a Colombian Andean river basin (Prado, Tolima) and their relationship to water quality. *Proceedings of the XIIth International Symposium on Trichoptera*. Mexico, D.F.
- Guevara, G., Reinoso, G., Villa-Navarro, F.** (2006). Caddisfly larvae (Insecta: Trichoptera) of the Coello River basin in Tolima (Colombia): Spatial and temporal patterns and bioecological aspects. *Proceedings of the XIIth International Symposium on Trichoptera*. Mexico, D.F.
- Holdridge, L.** (1987). *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica: IICA. p. 216.
- Holzenthal, R.** 1994. Orden Trichoptera. En: Solís, A. (Ed.). *Las familias de insectos de Costa Rica*. Derechos Reservados, Instituto Nacional de Biodiversidad, Costa Rica. Santo Domingo de Heredia, Heredia, Costa Rica. Fecha de consulta: mayo 2014. Disponible en: <http://www.inbio.ac.cr/papers/insectoscr/Texto83.html>.
- López E., Reinoso, G., Guevara, G., Villa, F.** (2006). Estructura, distribución y relaciones con el Índice de Calidad de Aguas de la tricoptero fauna en la cuenca del río Prado (Tolima, Colombia). En: F. Villa, C. Rivera, G. Reinoso, M. Núñez (Eds.). *Resúmenes del VII Seminario Colombiano de Limnología y I Reunión Internacional sobre Ríos y Humedales Neotropicales*. Asociación Colombiana de Limnología, Ibagué. p. 18.
- López E.** (2007). Análisis faunístico de las larvas del orden Trichoptera en la cuenca del río Prado y la subcuenca de Amoyá (Tolima-Colombia). Trabajo de grado (Biólogo). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Ibagué.
- López E., Reinoso, G.** (2008). Variación temporal de la fauna del orden Trichoptera en la cuenca el río Prado. En: P. Landázuri (Ed.). *Memorias XLIII Congreso Nacional de Ciencias Biológicas*. Armenia, Quindío. p. 34.

- Moor, F.C. & Ivanov, V.D.** (2008). Global diversity of caddisflies (Trichoptera: Insecta) in fresh water. *Hydrobiologia*. **595**: 393-407.
- Mosquera Z., Bejarano, D., Asprilla, S.** (2006). Estudio del orden Trichoptera (Insecta) en dos ecosistemas lóticos del municipio de Quibdó, Chocó-Colombia. En: F. Villa, C. Rivera, G. Flórez, M. Núñez, & X. Carranza (Eds.). *Memorias VII Seminario Colombiano de Limnología y I Reunión Internacional sobre Ríos y Humedales Neotropicales*. Ibagué: León Gráficas. p. 85-91.
- Muñoz-Q, F. y Paprocki, H.** (2003). Claves para la identificación de las larvas de las familias neotropicales de trichoptera. *Caldasia*. **25** (1): 169-192.
- Muñoz-Quesada, F.** (2004). El orden Trichoptera (Insecta) en Colombia, II: inmaduros y adultos, consideraciones generales. En: Fernández, F, MG, Andrade & G, Amat (Eds.). *Insectos de Colombia, Volumen III*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., p. 319-349.
- Oliveira, A. M., Hamada, N., Nessimian, J. L.** (2005). Chaves de identificação de larvas para famílias e gêneros de Trichoptera (Insecta) da Amazônia central, Brasil. *Revista Brasileira de Entomologia*. **49** (2): 181-204.
- Posada JA. & Roldán, G.** (2003). Clave ilustrada y diversidad de las larvas de Trichoptera en el noroccidente de Colombia. *Caldasia*. **25** (1): 169-192.
- Quintero, A. & Rojas, A.** (1987). Aspectos bioecológicos del orden Trichoptera y su relación con la calidad del agua. *Revista Colombiana de Entomología*. **13** (1): 26-38.
- Ramírez F., Vásquez, J., Reinoso, G., Guevara, G.** (2007). En busca de lo desconocido: una nueva familia en el bentos tolimense (Trichoptera: Xiphocentronidae). En: G. Cervantes (Ed.). *Memorias del XLII Congreso Nacional de Ciencias Biológicas*. Departamento de Publicaciones, Universidad Simón Bolívar, Barranquilla. p. 30.
- Ramírez F., Vásquez, J., Reinoso, G., Guevara, G.** (2008a). Leptocéridos (Trichoptera) de la cuenca del río Totare, Tolima-Colombia. En: E. Peña, J. Cantera, M. Zúñiga, S. Duque, E. Londoño, L. Aguirre, B. Albán, P. Bedoya (Eds.). *Resúmenes del VIII Seminario Colombiano de Limnología y I Reunión Internacional de Cuencas Bajas y Zonas Estuarinas*. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, p. 53.
- Ramírez F., Vásquez, J., Reinoso, G., Guevara, G.** (2008b). Los tricópteros y su papel bioindicador: caso del río Totare. En: P. Landázuri (Ed.). *Memorias XLIII Congreso Nacional de Ciencias Biológicas*. Armenia, Quindío. p. 33
- Reinoso G.** (1998). Efemerópteros (Arthropoda: Insecta) del río Combeima en el trayecto comprendido entre Juntas y El Totumo municipio de Ibagué departamento del Tolima. Trabajo de grado (Maestría). Universidad de los Andes, Departamento de Ciencias Biológicas, Bogotá.
- Reinoso G.** (2001). Estudio bioecológico de los tricópteros del río Alvarado en el trayecto comprendido entre El Salado y Alvarado, Tolima. Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología.
- Reinoso G., Villa, F., Esquivel, H., García, J., Vejarano, M.** (2007). Biodiversidad faunística y florística de la cuenca del río Totare – Biodiversidad regional fase III. Informe final. Universidad del Tolima. Ibagué.
- Reinoso G., Guevara, G., Vejarano, M., García, J., Villa, F.** (2008). Áreas de interés para la conservación en la cuenca del río Prado (Tolima, Colombia): macroinvertebrados y calidad de agua como factores clave. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*. **20**: 102-116.
- Roldán, P. G.** (1996). Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia. Bogotá (Colombia): Fondo FEN Colombia.
- Roldán, P. G.** (2003). Bioindicación de la calidad de agua en Colombia: uso del método BMWP/Col. Medellín (Colombia): Universidad de Antioquia.
- Schmid, F.** 1982. La famille des Xiphocentronides (Trichoptera: Annulipalpia). *Mémoires de la Société Entomologique du Canada*. **121**: 1-127.
- Strum, H.** 1960. Die terrestrischen Puppgehäuse von Xiphocentron strumi Ross (Xiphocentronidae, Trichoptera). *Zool. Jahrb. Syst.* **87** (4/5): 387-394.
- Valero, L., Durán, P., Arellano, E.** (2001). Trichoptera como indicadora de calidad de agua. Río Albarregas. Mérida, Venezuela. *Rev. Ecol. Lat. Am.* **8** (1): 11-16.
- Vásquez J., Ramírez, F., Reinoso, G., Guevara, G.** (2006). Preferencias de sustrato del orden Trichoptera (clase Insecta) en la cuenca del río Combeima, Ibagué - Colombia. En: F. Villa, C. Rivera, G. Reinoso & M. Núñez (Eds.). *Resúmenes del VII Seminario Colombiano de Limnología y I Reunión Internacional sobre Ríos y Humedales Neotropicales*. Asociación Colombiana de Limnología, Ibagué. p. 138.
- Vásquez J., Ramírez, F., Reinoso, G., Guevara, G.** (2007). Aspectos bioecológicos del orden Trichoptera en su estado larval en la cuenca del río Totare, Colombia. En: G. Cervantes (Ed.). *Memorias del XLII Congreso Nacional de Ciencias Biológicas*. Departamento de Publicaciones, Universidad Simón Bolívar, Barranquilla. p. 35.
- Vásquez J., Ramírez, F.** (2008). Aspectos bioecológicos del orden Trichoptera en su estado larval en la cuenca del río Totare, departamento del Tolima. Trabajo de grado (Biólogo). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Ibagué.
- Vásquez J., Ramírez, F., Reinoso, G., Guevara, G.** (2008a). Hydroptílidos (Trichoptera) de la cuenca del río Totare, Tolima-Colombia. En: E. Peña, J. Cantera, M. Zúñiga, S. Duque, E. Londoño, L. Aguirre, B. Albán, P. Bedoya & D. Santofimio (Eds.). *Resúmenes del VIII Seminario Colombiano de Limnología y I Reunión Internacional de Cuencas Bajas y Zonas Estuarinas*. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali.
- Vásquez J., Ramírez, F., Reinoso, G., Guevara, G.** (2008b). Estudio de los tricópteros en su estado larval en la cuenca del río Totare, Tolima, Colombia. En: P. Landázuri (Ed.).

Memorias XLIII Congreso Nacional de Ciencias Biológicas. Armenia, Quindío. p. 31.

- Vásquez-Ramos, J. M., Ramírez-Díaz, F., Reinoso, G.** (2010). Distribución espacial y temporal de los tricópteros inmaduros en la cuenca del río Totare (Tolima-Colombia). *Caldasia*, **32** (1): 129-148.
- Vásquez, J.** (2012). Composición y estructura de tricópteros en cuencas con bosque seco tropical del departamento del Tolima. Universidad del Tolima. Trabajo de grado (Magister en Ciencias Biológicas). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Ibagué.
- Vergara R., Góngora, F., Prieto, M., Galeano, P.** (1994). Inventario de la entomofauna acuática de la quebrada Padilla, fuente del acueducto de Honda (Tolima). *Revista Colombiana de Entomología*. **20** (2): 115-123.
- Wallace J.B.** 1971 A progress report on the North American Macronema larvae: Their retreats, food and feeding nets (Trichoptera: Hydropsychidae). *Proceedings of the First International Symposium on Trichoptera*. p. 145-146.
- Wiggins G.B.** (1996). *Larvae of the North American Caddisfly Genera (Trichoptera)*, 2nd edition. University of Toronto Press, Toronto, p. 456.

Nueve especies nuevas del género *Sticta* (Ascomycota liquenizados: Lobariaceae) del morfotipo *fuliginosa* sensu lato de Colombia

Bibiana Moncada^{1,*}, Alejandra Suárez², Robert Lücking³

¹Licenciatura en Biología, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

²Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

³Science and Education, The Field Museum, Chicago, Illinois, Estados Unidos

Resumen

Como parte de una revisión taxonómica y sistemática del género *Sticta* en Colombia, se describen nueve especies nuevas correspondientes al morfotipo de *Sticta fuliginosa*: *Sticta arbusculotomentosa* Moncada & Betancourt sp. nov., *Sticta gallowayana* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta globulifuliginosa* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta hirsutifuliginosa* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta jaguirreana* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta macrofuliginosa* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta minutula* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta phyllidiofuliginosa* Moncada & Lücking sp. nov., y *Sticta plumbeociliata* Moncada & Lücking sp. nov. Todas las especies se discuten e ilustran. Se agrega una clave para las especies del morfotipo de *S. fuliginosa* presentes en Colombia.

Palabras clave: Andes, Costa Rica, filidios, isidios, lobulillos, región Andina.

Nine new species of the genus *Sticta* (Ascomycota liquenizados: Lobariaceae) of the *fuliginosa* sensu lato morphodeme from Colombia

Abstract

As part of a taxonomic and systematic revision of the genus *Sticta* in Colombia, nine species corresponding to the *Sticta fuliginosa* morphodeme are described as new: *Sticta arbusculotomentosa* Moncada & Suárez sp. nov., *Sticta gallowayana* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta globulifuliginosa* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta hirsutifuliginosa* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta jaguirreana* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta macrofuliginosa* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta minutula* Moncada & Lücking sp. nov., *Sticta phyllidiofuliginosa* Moncada & Lücking sp. nov., and *Sticta plumbeociliata* Moncada & Lücking sp. nov. All species are discussed and illustrated. A key to the species of the *S. fuliginosa* morphodeme in Colombia is provided.

Key words: Andes, Andean region, Costa Rica, isidia, lobules, phyllidia.

Introducción

El género *Sticta* pertenece a la familia Lobariaceae, siendo hasta el momento el género con mayor número de especies de esta familia. Por la presencia de cifelas en la superficie ventral es uno de los géneros de macrolíquenes más fácilmente reconocidos en el mundo (Galloway, 1994, 1997, 1998a, 2001, 2007, McDonald, et al., 2003, Moncada, 2012), aunque no debe confundirse con el género *Dendricosticta*, nombre recientemente asignado a un conjunto de especies del hemisferio norte del grupo de *Sticta wrightii* relacionado cercanamente con los géneros *Lobariella* y *Lobaria* s. lat. (Moncada, et al., 2013a). *Sticta* puede tener cianobacterias o algas verdes como fotobiontes primarios o, en ocasiones, la misma especie forma un cloromorfo y un cianomorfo (Purvis, 2000; Tønsberg & Goward, 2001, Takahashi, et al., 2006, Moncada, et al., 2013c). Tiene una distribución

cosmopolita, aunque está mejor representado en regiones tropicales (Joshi & Awasthi, 1982, Swinscow & Krog, 1988, Galloway, 1998b, Büdel, et al., 2000, Aptroot & Sparrius, 2002, Farkas, 2003). En Suramérica el género se encuentra principalmente en la zona subandina y andina, sobre varios sustratos como corteza, madera, rocas, suelo y troncos en descomposición (Galloway, 1997, Moncada, et al., 2014).

Hasta la fecha, las especies de *Sticta* presentes en el territorio colombiano eran poco conocidas. Luteyn (1999) hizo referencia a diez especies en las regiones paramunas y Sipman, et al. (2000) reconocieron 18 especies y una

* Correspondencia:

Bibiana Moncada; bibianamoncada@gmail.com

Recibido: 7 de septiembre de 2014

Aceptado: 11 de febrero de 2015

variedad para estas áreas. **Aguirre-C** (2008) presentó un total de 29 especies y mencionó a *Sticta* como un género mayormente andino, lo que fue confirmado por los estudios de **Moncada, et al.**, (2014). **Sipman, et al.** (2008) dieron a conocer un total de 42 nombres para Colombia. Sin embargo, este número solo cubre una pequeña parte de la diversidad real, ya que en una primera revisión monográfica, **Moncada** (2012) mencionó al menos 103 especies para el territorio colombiano. Este estudio se basó en un análisis de filogenia molecular (**Moncada, et al.**, 2013b) y una revisión de material tipo de más de 160 nombres descritos para el Neotrópico y otras partes del mundo, lo cual indica que una gran parte de estas especies son nuevas para la ciencia.

El morfotipo de la especie *Sticta fuliginosa* (Dicks.) Ach. es, probablemente, el de más fácil reconocimiento dentro del género. Es así como, en general, se puede asegurar que representan ejemplares con talos orbiculares de tamaños reducidos, menores a 10 cm de diámetro, caracterizados por asociarse con un fotobionte cianobacterial, tomento inferior claro, cifelas grandes, en su mayoría planas, y por sus isidios laminales para la propagación vegetativa. En su anatomía se reconoce su médula rala, blanca con reacciones negativas a K, KC, C y P, aunque **Gyelnik** (1931), mencionó que *S. fuliginosa* poseía una médula “K+ rufuscens y KC+ rosea”, además de mencionar los apotecios esparcidos en su superficie dorsal. Generalmente, el material con esta combinación de caracteres ha sido considerado como una sola especie con distribución cosmopolita (**Hue**, 1901; **Galloway**, 1994, 1997, 1998a, 2001, 2007; **Stizenberger**, 1895). Sin embargo, varios estudios moleculares han demostrado que se trata de un morfotipo que evolucionó muchas veces en el género *Sticta*, en clados distantes, así que en realidad se trata de muchas especies diferentes que comparten una morfología y, en algunos casos, una ecología semejante (**Moncada, et al.**, 2013b).

En la revisión filogenética del género *Sticta* para Colombia (**Moncada, et al.**, 2013b), se incluyó una muestra considerada como un topotipo de *S. fuliginosa*, así que el clado que contenía dicha muestra, con especímenes adicionales de Colombia, Norteamérica y Europa, fue denominado *S. fuliginosa* s.str. Sin embargo, la revisión del material tipo de *S. fuliginosa* hecha por **Magain & Sérusiaux** (comunicación personal, 2014) reveló que en la localidad tipo ocurren al menos dos especies diferentes, y que el material secuenciado pertenece a una especie aún sin describir, la cual va a ser formalmente descrita en otro trabajo (**Magain & Sérusiaux**, en preparación). Por lo tanto, el nombre de esta especie se cita aquí como *S. aff. fuliginosa*.

Con la descripción de estas nueve especies del morfotipo *fuliginosa* para Colombia, sumadas a *S. arachnofuliginosa*, *S. arbuscula* y *S. maculofuliginosa* (**Moncada & Lücking**, 2012b) *S. ciliata* (**Taylor** en **Mackay**, 1836), *S. cometiella* (**Vainio**, 1926), *S. aff. fuliginosa* (**Magain & Sérusiaux**, en preparación), *S. macrothallina* (cianomorfo) y *S.*

neopulmonarioides (cianomorfo) (**Moncada, et al.**, 2013c), *S. roseocyphellata* (**Moncada, et al.**, en preparación) y *S. viviana* (**Suárez & Lücking**, 2013), se completa un total de 19 especies con este morfotipo presentes en el país.

Materiales y métodos

Se revisaron aproximadamente 2.200 colecciones de *Sticta* presentes en los herbarios colombianos ANDES, COAH, COL, CUVC, FAUC. HUA, COAH, UDBC, UPTC, así como las colecciones históricas y colecciones tipo disponibles en los herbarios internacionales B, BM, F, G, H, L, MEL, OXF, PC, RBGE, TUR, U, US y W. A la mayoría de las muestras se les hizo una revisión morfológica y anatómica en la cual se estudiaron 168 caracteres (**Moncada & Lücking**, 2012b; **Moncada**, 2012, **Moncada, et al.**, 2013b). La química secundaria se evaluó mediante cromatografía de capa fina utilizando los solventes A y C (**Orange, et al.**, 2001; **Lumbsch**, 2002). Los estudios se hicieron en los laboratorios de la Licenciatura en Biología de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en Bogotá, y del Departamento de Botánica del The Field Museum, Chicago, Estados Unidos.

Resultados y discusión

Sticta arbusculotomentosa Moncada & Betancourt sp nov.

Index Fungorum IF550878

Differing from *Sticta arbuscula* in the coriaceous thallus with the upper surface pubescent-arachnoid, the isidia having a tomentose stalk, and the cyphellae being smaller than 2 mm diam.

Tipo. COLOMBIA. Cundinamarca: Municipio de Bogotá, D.C., Parque Nacional Natural Sumapaz, alrededores de la Laguna de Chisacá, sobre *Diplosthephium revolutum*; 3600 m; 1 Dic 2010, *L. Betancourt* 326 (UDBC, holotipo). (Figura 1)

Descripción. Fotobionte primario cianobacteria. Pedúnculo ausente. Talo orbicular a irregular, hasta 10 cm de diámetro, poco ramificado, con 0–2 ramificaciones por 5 cm de radio, ramificación anisotómica. Lóbulos suborbiculares, horizontales a ascendentes, adyacentes a imbricados, planos a involutos, con los ápices redondeados a irregulares e involutos y los márgenes enteros a crenados, no engrosados; entrenudos de los lóbulos de (4–)5–17(–20) mm de largo, (5–)8–13(–15) mm de ancho, subcoriáceos, frágiles. Superficie superior escrobiculada a levemente acostillada, de color verde esmeralda cuando fresco, gris parduzco y con frecuencia el margen marrón pálido en el herbario, opaca, con la línea marginal del mismo color; superficie pubescente a aracnoidea, sin papilas, sin pruina, con máculas irregulares, escasas, blancas. Cilios ausentes. Apotecios no observados. Propágulos vegetativos presentes, abundantes, en forma de isidios, principalmente laminares, agregados, ramificados, arbusculares, verticales a oblicuos, hasta de 2 mm de largo y 1 mm de ancho, más oscuros que el talo, de color marrón negruzco, brillantes, en sección transversal redondos a

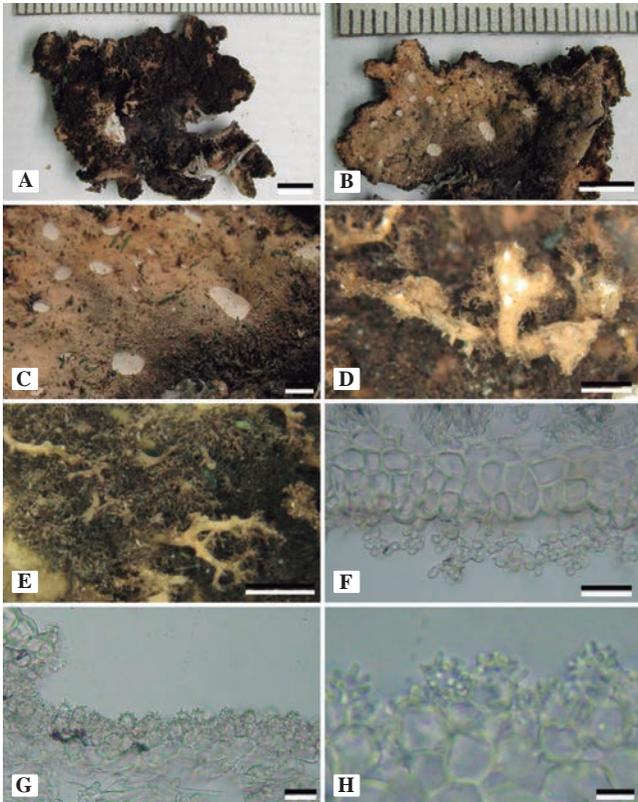


Figura 1. *Sticta arbusculotomentosa*. A. Vista de la superficie dorsal del talo. B. Superficie ventral del talo. C. Detalle de las cifelas y del tomento ventral. D. Detalle de los isidios arbusculares con cifelas. E. Detalle del tomento en los isidios arbusculares. F. Detalle del tomento ventral secundario. G-H. Cifela y cifeloblastos con papilas abundantes. Escala: A-B = 5 mm, C-E = 1 mm, F = 30 µm, G = 50 µm, H = 20 µm

levemente aplanados, cilíndricos a espatulados; pedúnculo si presente, cilíndrico, con cifelas y tomento. Médula laxa a compacta, de color blanco, K+ amarillo pálido a ocre, C-, KC+ amarillo pálido a ocre. Superficie inferior lisa a ondulada, de color blanco-crema, oscureciéndose hacia el centro. Tomento ventral principal inferior irregular, ausente hacia el margen, grueso (largo), fasciculado a esponjoso, suave, de color gris marrón pálido a oscuro. Tomento ventral secundario pubescente, claro. Rizinas ausentes. Cifelas escasas, 1–20 por cm² hacia el centro del talo y 21–40 por cm² hacia el margen, dispersas, redondeadas a irregulares, urceoladas con poro ancho a cupuliformes, inmersas a erumpentes, abajo del nivel del tomento, con el margen indiferenciado a levemente involuto de color blanco crema, con tomento secundario; poro de (0,1–)0,3–1(–1,5) mm de diámetro hacia el centro del talo; membrana basal pubescente, de color blanco, K- a K+ amarillo pálido, C-, KC+ amarillo pálido, P-. Picnidios no observados.

Corteza superior paraplectenquimática, de 25–40 µm de grosor, homogénea, conformada por 2–3 capas de células, de 6–16 µm de diámetro, con la pared de 1,2–2,5 µm de

grosor y el lumen redondeado a isodiamétrico de 5–15 µm de diámetro. Capa de algas de 25–45 µm de grosor, con las células de 12–18 µm de diámetro. Médula de 65–210 µm de grosor, con hifas de 2,5 µm de ancho, sin cristales. Corteza inferior paraplectenquimática, de 30–40 µm de grosor, con 1–2 capas de células; células de 6–18 µm de diámetro, con la pared de 1,2–2,5 µm de grosor. Tomento dorsal principal de 7–20 µm de largo, solitario, hifas ramificadas, moniliformes con los ápices libres. Tomento ventral principal de 300–850 µm de largo, en fascículos de 12–20 hifas, hifas ramificadas, apicalmente moniliformes con los ápices libres. Tomento ventral secundario presente, de 10–25 µm de largo, solitario, hifas ramificadas, moniliformes con los ápices libres. Cavidad de las cifelas 30–80 µm de alto; células de la membrana basal de la cifela (cifeloblastos) con abundantes papilas.

Etimología. Esta especie recibe su nombre por los isidios arbusculares con pedúnculos tomentosos y la superficie dorsal pubescente aracnoide.

Distribución y ecología. Andes de Colombia. Se ha encontrado entre 2.600 y 3.600 m, sobre corteza en lugares cerrados o en ramas secundarias con baja exposición solar, junto con hepáticas de los géneros *Frullania*, *Metzgeria*, *Plagiochila* y *Radula*. Se cuenta únicamente con dos registros que comprenden las zonas de vida subandina y de páramo de la región andina colombiana, en los departamentos de Antioquia y Cundinamarca.

Discusión. *Sticta arbusculotomentosa* es una de las pocas especies del género con isidios arbusculares, es decir con un pedúnculo pronunciado. Además, se caracteriza por presentar talos irregulares o menos frecuentemente, suborbiculares, con la superficie dorsal lisa a acostillada, pubescente aracnoidea, pero no escabrosa como en *S. arbuscula* Moncada & Lücking (Moncada & Lücking, 2012b). Los arbúsculos son laminares, robustos y hasta de 2 mm de longitud, con pedúnculos tomentosos y gruesos hasta de 1 mm de diámetro. *Sticta arbuscula* también produce isidios arbusculares, pero tiene un talo orbicular, pubescente a escabroso, con arbúsculos mayormente marginales y sin tomento. Las cifelas también son un carácter que ayuda a separar las especies, debido a que son menores de 2 mm en *S. arbusculotomentosa* y hasta de 3,5 mm en *S. arbuscula*.

Especímenes examinados. COLOMBIA. Antioquia: Municipio de Santa Rosa de Osos, Llanos de Cuiva; 2.600 m; 10 de abril, 1992, *F. Pineda* 654 (HUA). Cundinamarca: Municipio de Choachí, Parque Matarredonda; 3.351 m; 27 de noviembre, 2014, *Moncada* 8822 (UDBC).

***Sticta gallowayana* Moncada & Lücking sp. nov.**

Index Fungorum IF550805

Differing from *Sticta* aff. *fuliginosa* in the strongly branched, corymbose ('broccoliiform') isidia and the lack of papillae on the cells of the basal membrane of the cyphellae.

Tipo. COLOMBIA. Cundinamarca: Municipio de La Calera, Parque Nacional Natural Chingaza, Monterredondo; 4° 44' N, 73° 51' O; 3.430 m; 13 de abril, 2011, B. Moncada 4637 (UDBC, holotipo; COL, F, CUCV, isotipos). (Figura 2)

Descripción. Fotobionte primario cianobacteria. Pedúnculo ausente. Talo orbicular a irregular, hasta de 10 cm de diámetro, poco ramificado, con 0–2 ramificaciones por 5 cm de radio, ramificación politómica. Lóbulos suborbiculares, horizontales, imbricados, ondulados, con los ápices redondeados, revolutos, márgenes enteros a crenados, no engrosados; entrenudos de los lóbulos de 10–20 mm de largo, (5–)8–12(–18) mm de ancho, subcoriáceos, frágiles. Superficie superior escrobiculada a costillada, de color verde oscuro cuando fresco, gris verdoso con bordes marrón en el herbario, poco brillante, con la línea marginal del mismo color; superficie glabra, sin papilas, sin pruina, con máculas irregulares, blancas. Cilios ausentes. Apotecios no observados. Propágulos vegetativos presentes, abundantes, en forma de isidios, principalmente laminares, agregados, ramificados, corimbosos, verticales, hasta de 2 mm de largo y 0,2–0,5 mm de ancho, más oscuros que el talo, opacos, en sección transversal redondos, cilíndricos; pedúnculo si presente, cilíndrico a levemente aplanado en

isidios viejos, sin cifelas. Médula laxa, de color blanco, K–, C–, KC–, P–. Superficie inferior ondulada, de color crema. Tomento ventral principal denso hasta el margen, grueso (largo), esponjoso a fasciculado, suave, de color crema, oscureciéndose hacia el centro. Tomento ventral secundario ausente. Rizinas ausentes. Cifelas escasas, 1–10 por cm² hacia el centro del talo y 1–20 por cm² hacia el margen, dispersas, irregulares, urceoladas con poro ancho, inmersas a erumpentes, abajo del nivel del tomento, con el margen levantado e involuto de color crema, sin tomento; poro de (0,3–)0,5–2(–3) mm de diámetro hacia el centro del talo; membrana basal pubescente, de color blanco, K– a K+ amarillo pálido, C–, KC+ amarillo pálido, P–. Picnidios no observados.

Corteza superior paraplectenquimática, de 20–30 µm de grosor, homogénea, conformada por 3–4 capas de células, de 3–6 µm de diámetro, con la pared de 0,6–1 µm de grosor y el lumen redondeado a isodiamétrico de 1,2–5 µm de diámetro. Capa de algas de 30–70 µm de grosor, con las células de 12–20 µm de diámetro. Médula de 80–150 µm de grosor, con hifas de 2,5 µm de ancho, sin cristales. Corteza inferior paraplectenquimática, de 20–30 µm de grosor, con 2–3 capas de células; células de 4–8 µm de diámetro, con la pared de 0,6–1 µm de grosor. Tomento ventral principal de 165–260 µm de largo, en fascículos de 6–12 hifas, hifas simples, septadas con los ápices libres. Cavidad de las cifelas de 180–220 µm de alto; células de la membrana basal sin papilas.

Etimología. Esta especie recibe su nombre en honor del Dr. David Galloway (recién fallecido), especialista en el grupo, en reconocimiento por sus grandes aportes al estudio del género *Sticta* en el mundo.

Distribución y ecología. Andes de Colombia. Se ha encontrado entre 2.100–4.285 m, ampliamente distribuida en bosques subandinos, andinos y páramos, en lugares con intensidad lumínica media a alta. Se cuenta con registros procedentes de las cordilleras Central y Occidental, en hábitats de subandinos a páramo. Crece sobre diversos sustratos como corteza, roca, suelo y troncos, generalmente asociada con especies de los géneros *Frullania*, *Metzgeria* y *Lepicolea*.

Discusión. *Sticta gallowayana* es otra especie segregada de la especie colectiva *S. fuliginosa*, de la que se distingue principalmente por sus isidios corimbosos, superficie dorsal glabra, con máculas blancas irregulares, sin cilios ausentes y por la ausencia de papilas en los cifeloblastos. Otra especie con isidios de esta forma es *S. viviana* (Suárez & Lücking, 2013), que forma talos mucho más pequeños con la médula K+ amarilla-naranja y un tomento inferior secundario presente.

Especímenes examinados. COLOMBIA. Arauca: Municipio de El Playón, Parque Nacional Natural El Cocuy, Nevado del Cocuy, cabecera de la quebrada El Playón, Patio Bolos; 4.285 m; 7 de marzo, 1973, A. M. Cleef 8849 (COL, U). Boyacá: Municipio de Cucaita, a 10 km de Tunja; 2.950 m;

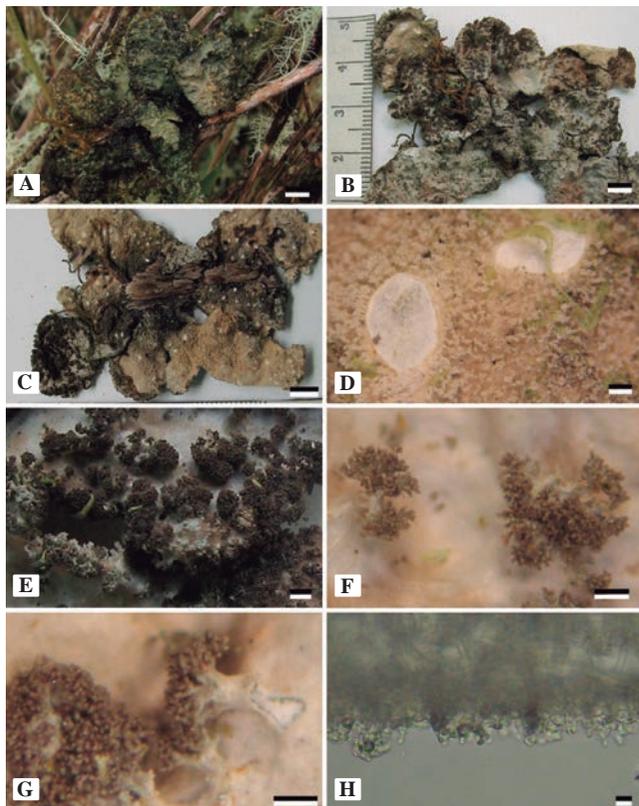


Figura 2. *Sticta gallowayana*. A. Vista dorsal del talo en vivo. B. Vista dorsal del talo en seco. C. Vista ventral del talo. D. Detalle de las cifelas y del tomento ventral. E-G. Detalle de los isidios corimbosos. H. Cifeloblastos con una papila. Escala: A-C = 5 mm, D-G = 1 mm, H = 10 µm.

12 de julio, 1986, *H. Sipman & O. Reyes 34476* (B, COL). Municipio de Villa de Leyva, SFF Iguaque, Caseta de administración a Villa de Leyva; 2.800 m; 25 de mayo, 2000, *B. Moncada & R. Dávila 870* (UDBC). SFF Iguaque, sector El Carrizal; 2.100–2.900 m; 9 de junio, 2001, *E. Linares, et al. 9630* (COL). Caldas: Municipio de Aranzazú, vereda El Diamante, Finca El Porvenir; 75° 26' O, 5° 15' N; 2.600 m; 2010, *L. F. Coca 85s* (UDBC). Municipio Villa María, Nevado del Ruíz, Noroccidente de termales, abajo del hotel; 3.500 m; 4 de febrero, 1979, *H. Sipman & H. Valencia 10533* (COL). Cundinamarca: Municipio de Bogotá, D.C., Parque Nacional Natural Sumapaz, proximidades de Laguna Grande; 3.700 m; 4 de septiembre, 1984, *J. Aguirre & H. Sipman 5006* (B, COL); *ibid.*; 3.500 m; 14 de julio, 1986, *H. Sipman, et al. 34502* (B, COL). Alrededores de la Laguna de Chisacá; 4° 17' N, 74° 12' O; 3724 m; 15 de agosto, 2010, *B. Moncada, et al. 3999, 4013, 4036, 4099, 4140* (UDBC). Municipio de Fómeque, Parque Nacional Natural Chingaza, sendero La Arboleda; 3.060 m; 12 de mayo, 2003, *B. Moncada & R. Dávila 1621* (UDBC). Municipio de La Calera, Parque Nacional Natural Chingaza, Monterrendodo; 4° 44' N, 73° 51' O; 3.430 m; 13 de abril, 2011, *B. Moncada 4636, 4637* (UDBC). Zona de amortiguación del Parque Nacional Natural Chingaza, Vía del ángulo al Rincón del Oso; 3.600 m; 7 de noviembre, 2011, *B. Moncada 4903, 4974* (UDBC). Municipio de Supatá, Alto El Tablazo, carretera Estación Radar a Supatá; 3.400 m; 12 de septiembre, 1985, *J. Aguirre & H. Sipman 5273* (B, COL). Risaralda: Municipio de Santa Rosa de Cabal, Valle de la Quebrada Betania, Hacienda La Sierra; 3.755 m; 25 de enero, 1980, *T. Boekhout 332b* (COL). Tolima: Municipio de Santa Isabel, Valle del Río Totarito, margen izquierda del Río; 3.730 m; 6 de febrero, 1980, *H. Valencia & T. Boekhout 52* (B, COL). Valle del Río Totarito. Entre el Paso Español y Hacienda La Ermita; 3.650 m; 9 de febrero, 1980, *H. Valencia & T. Boekhout 154* (COL).

***Sticta globulifuliginosa* Moncada & Lücking sp. nov.**

Index Fungorum IF550806

Differing from *Sticta* aff. *fuliginosa* in the usually larger thallus and lobes producing short, subglobose isidia, and in the absence of papillae on the cells of the basal membrane.

Tipo. COLOMBIA. Cundinamarca: Municipio de Guasca, Páramo de Guasca; 3.350 m; 18 de agosto, 2011, *B. Moncada 4757* (UDBC, holotipo; COL, F, isotipos). (Figura 3)

Descripción. Fotobionte primario cianobacteria. Pedúnculo ausente. Talo orbicular a irregular, hasta de 10 cm de diámetro, poco ramificado, con 0–2 ramificaciones por 5 cm de radio, ramificación politómica. Lóbulos suborbiculares, horizontales, imbricados, planos a revolutos, con los ápices redondeados, revolutos, márgenes enteros a lacerados, no engrosados; entrenudos de los lóbulos de 11–25 mm de largo, (5–)7–20(–35) mm de ancho, papiráceos a subcoriáceos, frágiles. Superficie superior escrobiculada a levemente foveolada o subfaveolada, de color marrón verdoso cuando

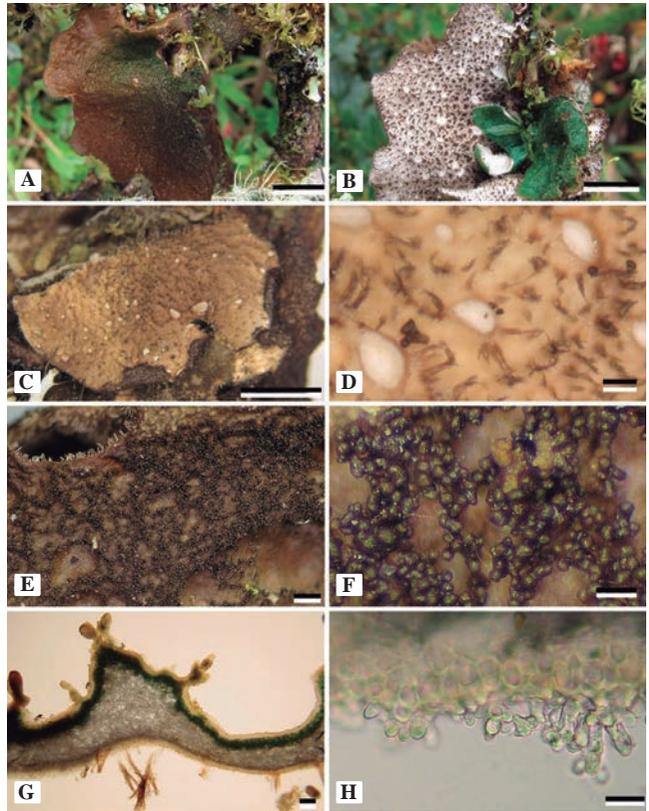


Figura 3. *Sticta globulifuliginosa*. A. Vista dorsal del talo en vivo. B. Vista ventral del talo en vivo. C. Superficie ventral. D. Detalle del tomento ventral y de las cifelas. E-F. Detalle de los isidios laminares. G. Anatomía del talo. H. Cifeloblastos. Escala: A-C = 1 cm, D-F = 0,5 mm, G = 100 μ m, H = 25 μ m

fresco, marrón oscuro en el herbario, brillante, con la línea marginal del mismo color; superficie glabra, sin papilas, sin pruina, con máculas irregulares, blancas a cremas. Cilios escasos a ausentes pero prolongaciones del tomento inferior visibles, fasciculados, marrón pálido, hasta de 0,5 mm de largo. Apotecios no observados. Propágulos vegetativos presentes, abundantes, en forma de isidios, principalmente laminares, dispersos a subagregados, simples a apicalmente ramificados, verticales, hasta de 0,2 mm de largo y 0,2 mm de ancho, más oscuros que el talo, de color marrón a marrón negruzco, brillantes, en sección transversal redondos a levemente aplanados, globulares a cilíndricos; pedúnculo si presente, cilíndrico a levemente aplanado, sin cifelas. Médula laxa, de color blanco, K+ amarillo pálido a ocre, C–, KC–, P–. Superficie inferior rugosa a acostillada, de color crema. Tomento ventral principal denso, escaso hacia el margen, grueso, más delgado hacia el margen, fasciculado a esponjoso, suave, de color marrón grisáceo con los ápices blancos. Tomento ventral secundario aracnoide, claro. Rizinas ausentes. Cifelas escasas, 1–10 por cm² hacia el centro del talo y 21–40 por cm² hacia el margen, dispersas, irregulares a angulares, urceoladas con poro ancho a cupuliformes, erumpentes a suprasésiles, abajo del nivel del tomento, con

el margen levantado e involuto de color crema a marrón, con tomento; poro de (0,01–)0,2–0,5(–0,7) mm de diámetro hacia el centro del talo; membrana basal pubescente, de color blanco, K+ amarillo, C–, KC+ amarillo, P–. Picnidios no observados.

Corteza superior paraplectenquimática, de 17–30 µm de grosor, homogénea, conformada por 2–3 capas de células, de 3–12 µm de diámetro, con la pared de 0,6–2,5 µm de grosor y el lumen redondeado a isodiamétrico de 2,5–10 µm de diámetro. Capa de algas de 30–55 µm de grosor, con las células de 10–15 µm de diámetro. Médula de 30–65 µm de grosor, con hifas de 2,5 µm de ancho, sin cristales. Corteza inferior paraplectenquimática, de 12–20 µm de grosor, con 1–2 capas de células; células de 6–12 µm de diámetro, con la pared de 0,6–2,5 µm de grosor. Tomento ventral principal de 170–210 µm de largo, en fascículos de 6–12 hifas, hifas ramificadas, apicalmente moniliformes con los ápices entrecruzados. Tomento ventral secundario de 12–25 µm de largo, solitario, hifas ramificadas, moniliformes con los ápices libres. Cavidad de las cifelas de 70–180 µm de alto; células de la membrana basal de la cifela (cifeloblastos) con una papila.

Etimología. Esta especie recibe su nombre por sus característicos isidios globulares.

Distribución y ecología. Andes de Colombia. Se ha encontrado entre 2.400–4.000 m, en bosques andinos y de páramo, en lugares con intensidad lumínica media a alta. Se cuenta con registros procedentes de la vertiente occidental de las cordilleras Central y Oriental, en las zonas de vida andina y de páramo de la región andina colombiana. Crece sobre corteza, generalmente asociada con hepáticas del género *Metzgeria* y líquenes como *Coccocarpia pellita*, *Everniastrum cirrhatum* y *Leptogium* spp.

Discusión. Además de la ausencia de papilas en los cifeloblastos, *Sticta globulifuliginosa* se diferencia de *S. aff. fuliginosa* por el tamaño de los talos, que son más grandes y con isidios cortos y anchos, subglobosos, generalmente no ramificados. Estos isidios, entre otros caracteres, también la distinguen de las otras especies segredadas con talos grandes, como *S. arachnofuliginosa* Moncada & Lücking (Moncada & Lücking, 2012b), *S. gallowayana* (con isidios corimbosos; ver arriba), *S. macrofuliginosa* (con talo faveolado y apotecios; ver abajo) y *S. phyllidioduliginosa* (con filidios; ver abajo).

Especímenes examinados. COLOMBIA. Boyacá: Municipio de Duitama, Páramo de La Rusia, 1 km al sur de Laguna Negra; 3.745 m; 15 de diciembre, 1972, A. M. Cleef 7280 (B, COL). Municipio de El Cocuy, Parque Nacional Natural El Cocuy, sendero Cabaña Sisuma rumbo a Pico Pan de Azúcar; 3.800–4.800 m; 20 de abril, 2011, D. Fonseca & F. Martínez 104 (UDBC). Municipio de Villa de Leyva, SFF Iguaque, Caseta de administración a Villa de Leyva; 2.800 m; 29 de octubre, 2002, B. Moncada & R. Dávila 1726 (UDBC).

Caldas: Municipio de Villa María, Nevado del Ruíz, costado noroccidental, a 500 m de la estación de televisión; 3.900 m; 3 de febrero, 1979, H. Sipman & H. Valencia 10479 (COL). Cauca: Municipio de Puracé, Parque Nacional Natural Puracé, Pilimbalá a Laguna de San Rafael; 3.220 m; 18 de marzo, 2000, B. Moncada & R. Dávila 502 (UDBC). Cundinamarca: Municipio de Bogotá, D.C., a 50 km NE de Bogotá, a lo largo de la carretera Guasca-Gachetá; 3.300 m; 7 de febrero, 1979, H. Sipman & H. Valencia 10638 (COL, U). Parque Nacional Natural Sumapaz, alrededores de la Laguna de Chisacá; 4° 17' N, 74° 12' O; 3.724 m; 15 de agosto, 2010, B. Moncada, et al. 4037, 4137b, 4241 (UDBC). Municipio de Chipaque, vereda Marilandia, vía Santuario; 2.400 m; 8 de septiembre, 2011, B. Moncada 4821 (UDBC). Municipio de Guasca, Parque Nacional Natural Chingaza, Piedras Gordas; 3.200 m; 15 de octubre, 1988, H. Sipman & J. Aguirre 27382b (B, COL). Páramo de Guasca; 3.350 m; 18 de agosto, 2011, B. Moncada 4742, 4742b, 4743, 4745, 4747, 4757 (UDBC); ibid.; R. Lücking 33318, 33327 (F, UDBC). Municipio de La Calera, Parque Nacional Natural Chingaza, Monterredondo; 4° 44' N, 73° 51' O; 3.430 m; 13 de abril, 2011, B. Moncada 4626 (UDBC). Municipio de Neusa, cerro oriental, represa del Neusa; 3.100 m; 3 de agosto, 1975, T. v. d. Hammen & R. Jaramillo-M 3136b (COL). Municipio de San Francisco, vereda Sabaneta, proximidades de la quebrada Cueva Grande; 2.500 m; 17 de julio, 1986, H. Sipman, et al., 23590 (COL). Nariño: Municipio de Pasto, 10 km al N de Pasto, a lo largo de la carretera a Popayán; 2.550 m; 17 de junio, 1986, H. Sipman, R. Velosa, et al., 33618 (B, COL).

Sticta hirsutofuliginosa Moncada & Lücking sp nov.

Index Fungorum IF550807

Differing from *Sticta* aff. *fuliginosa* in the scrobiculate to faveolate thallus with the upper surface pubescent, and the cells of the basal membrane of the cyphellae lacking papillae.

Tipo. COLOMBIA. Cundinamarca: Municipio de Guasca, Páramo de Guasca; 3.350 m; 18 de agosto, 2011, B. Moncada 4734a (UDBC, holotipo; F, CUVV, isotipos). (Figura 4)

Descripción. Fotobionte primario cianobacteria. Pedúnculo ausente. Talo orbicular a irregular, hasta de 10 cm de diámetro, poco ramificado, con 0–2 ramificaciones por 5 cm de radio, ramificación politómica. Lóbulos suborbiculares, horizontales a levemente subpéndulos, imbricados, ondulados, con los ápices redondeados a irregulares, involutos, márgenes enteros a crenados, no engrosados; entrenudos de los lóbulos de 10–30 mm de largo, (5–)8–20(–40) mm de ancho, subcoriáceos, resistentes. Superficie superior escrobiculada a acostillada, de color verde esmeralda cuando fresco, gris verdoso con los bordes más oscuros en el herbario, opaca, con la línea marginal del mismo color; superficie glabra o débilmente pubescente hacia el margen y con abundante tomento como setas esponjosas hacia el centro, sin papilas, sin pruina, con máculas irregulares, blancas. Cilios ausentes. Apotecios no observados. Propágulos vegetativos presentes,

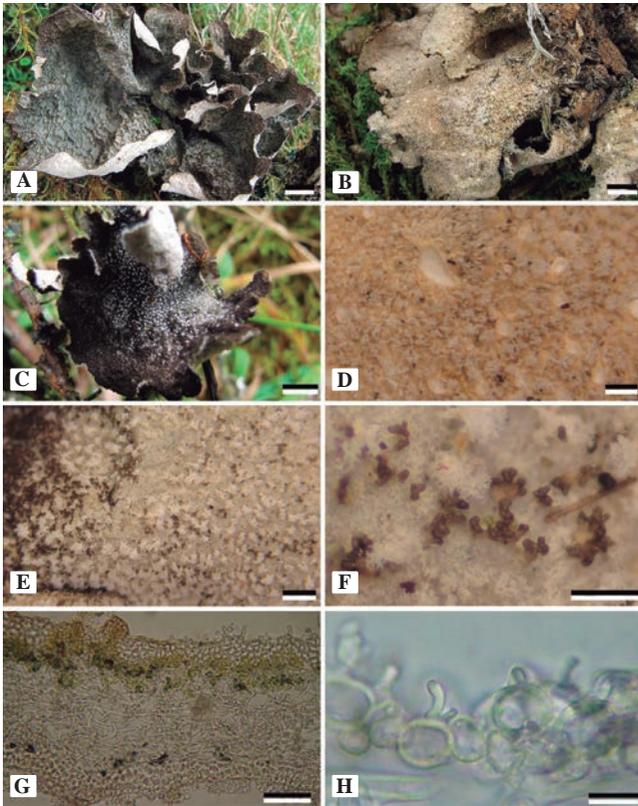


Figura 4. *Sticta hirsutofuliginosa*. A. Vista dorsal del talo en vivo. B. Vista ventral del talo en vivo. C. Detalle del tomento dorsal en vivo. D. Detalle del tomento ventral y de las cifelas. E. Detalle del tomento dorsal. F. Detalle de los isidios laminares. G. Anatomía del talo. H. Cifeloblastos con una papila. Escala: A-C = 1 cm, D = 3 mm, E-F = 1 mm, G = 100 μ m, H = 10 μ m

abundantes, en forma de isidios, principalmente laminares, dispersos, simples a apicalmente ramificados, coraloides, verticales, hasta de 0,5 mm de largo y 0,2 mm de ancho, más oscuros que el talo, brillantes, en sección transversal redondos, cilíndricos; pedúnculo si presente, cilíndrico, sin cifelas. Médula laxa, de color blanco, K– a K+ levemente amarillo pálido, C–, KC+ amarillo pálido, P–. Superficie inferior ondulada, de color blanco-crema. Tomento ventral principal denso hasta el margen, grueso (largo), esponjoso, suave, de color crema. Tomento ventral secundario aracnoide, claro. Rizinas ausentes. Cifelas abundantes, 1–20 por cm^2 hacia el centro del talo y 1–20 por cm^2 hacia el margen, dispersas, irregulares, urceoladas con poro ancho, inmersas a erumpentes, abajo del nivel del tomento, con el margen revoluto de color blanco crema, con tomento; poro de 0,5–3,0 mm de diámetro hacia el centro del talo; membrana basal pubescente, de color blanco, K– a K+ amarillo pálido, C–, KC+ amarillo pálido, P–. Picnidios no observados.

Corteza superior paraplectenquimática, de 25–40 μ m de grosor, homogénea, conformada por 3–5 capas de células, de 3–10 μ m de diámetro, con la pared de 0,6–2,5 μ m de grosor y el lumen redondeado a isodiamétrico de 2,5–7 μ m

de diámetro. Capa de algas de 20–40 μ m de grosor, con las células de 10–13 μ m de diámetro. Médula de 40–75 μ m de grosor, con hifas de 2,5 μ m de ancho, sin cristales. Corteza inferior paraplectenquimática, de 20–25 μ m de grosor, con 2–3 capas de células; células de 3–7,5 μ m de diámetro, con la pared de 1,2–2,5 μ m de grosor. Tomento dorsal principal de 60–420 μ m de largo, en fascículos de 12–20 hifas, hifas ramificadas, apicalmente moniliformes con los ápices libres. Tomento dorsal secundario de 15–25 μ m de largo, solitario, hifas ramificadas, moniliformes con los ápices libres. Tomento ventral principal de 85–430 μ m de largo, en fascículos de 12–20 hifas, hifas ramificadas, apicalmente moniliformes con los ápices libres. Tomento ventral secundario de 15–25 μ m de largo, solitario, hifas ramificadas, moniliformes con los ápices libres. Cavidad de las cifelas de 70–230 μ m de alto; cifeloblastos con una papila.

Etimología. Esta especie recibe su nombre por su semejanza con *Sticta* aff. *fuliginosa*, de la que se diferencia por la superficie hirsuto-tomentosa, márgenes de los lóbulos irregulares y cifelas sin papilas.

Distribución y ecología. Andes de Colombia. Se ha encontrado entre 2.550–4.000 m, en bosques andinos y páramo, en lugares con intensidad lumínica baja, media y alta. Existen registros de las cordilleras Central y Oriental en las zonas de vida andina y de páramo de la región andina colombiana. Crece sobre corteza y roca, generalmente asociado con especies de los géneros *Frullania*, *Metzgeria*, *Lejeunea* y *Plagiochila*.

Discusión. *Sticta hirsutofuliginosa* es una especie con fotobionte cianobacterial, isidios laminares y tomento en la superficie dorsal. Tiene una cierta semejanza morfológica y en ocasiones de hábitat con *S. arachnofuliginosa* Moncada & Lücking (Moncada & Lücking, 2012b), la cual se diferencia por los talos planos a revolutos, fuertemente faveolados y el tomento dorsal pubescente homogéneo que cubre la totalidad del talo, además de los isidios cortos (hasta de 0,2 mm de altura), rara vez ramificados, y las cifelas planas. *Sticta hirsutofuliginosa* se asemeja también a *S. humboldtii* Hook. y sus relativos (Moncada, et al., 2013d), las cuales carecen de isidios y forman apotecios.

Especímenes examinados. COLOMBIA. Boyacá: Municipio de El Cocuy, Parque Nacional Natural El Cocuy, sendero de Cabaña Sisuma rumbo a Pico Pan de Azúcar; 3.800–4.800 m; 20 de abril, 2011, D. Fonseca & F. Martínez 102 (UDBC). Alto de la Cueva; 3.800 m; 21 de abril, 2011, D. Fonseca & F. Martínez 184, 231 (UDBC). Municipio de Villa de Leyva, SFF Iguaque, Caseta de administración a Villa de Leyva; 2.800 m; 29 de octubre, 2002, B. Moncada & R. Dávila 1725 (UDBC). Cundinamarca: Municipio de Bogotá, D.C., sureste del cerro de Monserrate, oriente de Bogotá; 3.150 m; 27 de junio, 1971, M. Nee & S. Mori 4235 (COL). Municipio de Bogotá, D.C., Parque Nacional Natural Sumapaz, alrededores de Laguna de Chisacá; 4° 17'

N, 74° 12' O; 3.730 m; 8 de abril, 2008, *B. Moncada & A. López 2646* (UDBC); *ibid.*; 3.724 m; 15 de agosto, 2010, *B. Moncada, et al. 4032, 4147, 4998* (UDBC). Municipio de Choachí, El Verjón, Parque Ecológico Matarredonda; 4° 34' N, 74° 00' O; 3.220 m; 1 de octubre, 2007, *D. Hernández, et al. 28* (UDBC); *ibid.*; 2.900–3.220 m; 8 de mayo, 2010, *B. Moncada 3206* (UDBC); *ibid.*; 3.220 m; 23 de enero, 2011, *B. Moncada 4606* (UDBC). Municipio de Guasca, Parque Nacional Natural Chingaza, Piedras Gordas; 3.200 m; 15 de octubre, 1988, *H. Sipman & J. Aguirre 27382a* (B, COL). Páramo de Guasca; 3.350 m; 18 de agosto, 2011, *B. Moncada 4730a, 4731, 4734b, 4737* (UDBC); *ibid.*; 3.200 m; 18 de agosto, 2011, *R. Lücking 33309, 34050* (F, UDBC). Municipio de La Calera, Parque Nacional Natural Chingaza, Monterredondo; 4° 44' N, 73° 51' O; 3.430 m; 13 de abril, 2011, *B. Moncada 4623, 4643b* (UDBC). Laguna de Siecha; 4° 44' N, 73° 51' O; 3.456 m; 8 de mayo, 2011, *Y. Orozco & R. Soto 80* (UDBC). Zona de amortiguación del Parque Nacional Natural Chingaza, Vía del ángulo al Rincón del Oso; 3.600 m; 7 de noviembre, 2011, *B. Moncada 4923, 4929, 4941b, 4947, 4951* (UDBC). Nariño: Municipio de Pasto, a 10 km N de Pasto a lo largo de la carretera a Popayán; 2.550 m; 17 de junio, 1986, *H. Sipman, R. Velosa, et al. 33617* (B, COL). Norte de Santander: Municipio de Toledo, Parque Nacional Natural Tamá, sector El Paramito; 2.800 m; 12 de septiembre, 2000, *B. Moncada & R. Dávila 1297, 1330* (UDBC). Tolima: Municipio de Líbano, Valle de Quebrada Blanca, afluente del río Lagunillas; 3.550 m; 26 de agosto, 1985, *H. Sánchez & J. Hernández 904* (COL).

Sticta jaguirreana Moncada & Lücking sp. nov.

Index Fungorum IF550808

Differing from *Sticta phyllidiofuliginosa* in the larger cyphellae and secondary tomentum.

Tipo. COLOMBIA. Cundinamarca: Municipio de Chipaque, vereda Marilandia, vía Santuario; 2.400 m; 8 de septiembre, 2011, *B. Moncada 4804* (UDBC, holotipo; COL, isotipo). (Figura 5)

Descripción. Fotobionte primario cianobacteria. Pedúnculo ausente. Talo orbicular a irregular, hasta 10 cm de diámetro, medianamente ramificado, con 3–5 ramificaciones por 5 cm de radio, ramificación politómica. Lóbulos suborbiculares a flabelados, horizontales, imbricados, planos a involutos, con los ápices redondeados, involutos, márgenes enteros a crenados, no engrosados; entrenudos de los lóbulos de (4–)5–12(–20) mm de largo, (2–)5–15(–20) mm de ancho, papiráceos, frágiles. Superficie superior lisa a levemente escrobiculada, de color verde azulado cuando fresco, gris amarilla verdosa en el herbario, poco brillante, con la línea marginal marrón; superficie glabra a escabrosa, sin papilas, sin pruina, con máculas irregulares diminutas, amarillas. Cilios escasos, simples, beis a marrón dorado, hasta de 0,2 mm de largo. Apotecios no observados. Propágulos vegetativos presentes, abundantes, en forma de filidios, principalmente

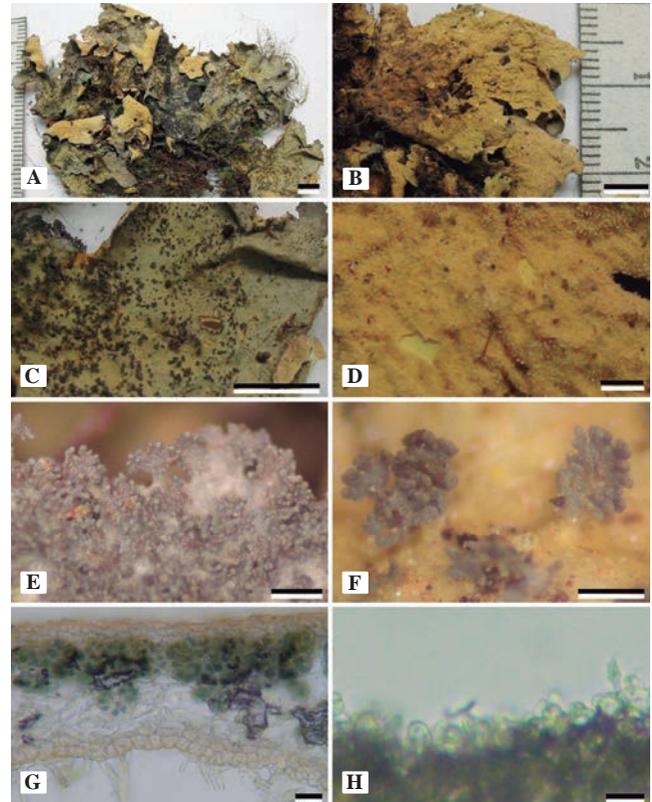


Figura 5. *Sticta jaguirreana*. A. Vista dorsal del talo. B. Vista ventral del talo. C. Detalle de la superficie dorsal. D. Detalle del tomento ventral y de las cifelas. E-F. Detalle de los filidios laminares. G. Anatomía del talo. H. Cifeloblastos con papilas. A-C = 5 mm, D-F = 1 mm, G-H = 20 µm

laminares, dispersos a subagregados, ramificados, palmeados, oblicuos a levemente verticales, hasta de 1 mm de largo y 1,5 mm de ancho, con ramificaciones cilíndricas apicales, radiales, diminutas, de menos de 0,02 mm de ancho, más oscuros que el talo, de color azul grisáceo, opacos, en sección transversal dorsiventrals, escumiformes; pedúnculo si presente, cilíndrico a levemente aplanado, sin cifelas. Médula laxa, de color amarillo, K–, C–, KC–, P–. Superficie inferior faveolada, de color amarillo. Tomento ventral principal denso hasta el margen, delgado (corto), fasciculado a fasciculado-esponjoso, suave, de color crema. Tomento ventral secundario ausente. Rizinas ausentes. Cifelas escasas, 1–10 por cm² hacia el centro del talo y 21–40 por cm² hacia el margen, agregadas, irregulares, planas a cupuliformes, prominentes a sésiles, abajo del nivel del tomento, con el margen indiferenciado de color amarillo, sin tomento u ocasionalmente con tomento; poro de (0,4–)0,5–0,8(–1) mm de diámetro hacia el centro del talo; membrana basal pubescente, de color amarillo, K–, C–, KC–, P–. Picnidios no observados.

Corteza superior paraplectenquímica, de 12–20 µm de grosor, homogénea, conformada por 2–3 capas de células, de 4–12 µm de diámetro, con la pared de 0,6–1,2 µm de

grosor y el lumen redondeado a isodiamétrico de 2,5–10 μm de diámetro. Capa de algas de 35–60 μm de grosor, con las células de 10–18 μm de diámetro. Médula de 40–185 μm de grosor, con hifas de 2,5 μm de ancho, sin cristales. Corteza inferior paraplectenquimática, de 15–18 μm de grosor, con 1–2 capas de células; células de 4–15 μm de diámetro, con la pared de 1,2–2,5 μm de grosor. Tomento ventral principal de 8–115 μm de largo, solitario, hifas simples, septadas con los ápices libres. Cavidad de las cifelas 70–200 μm de alto; cifeloblastos con una papila.

Etimología. Esta especie recibe su nombre en honor del Dr. Jaime Aguirre Ceballos, por sus aportes a la liquenología colombiana.

Distribución y ecología. Andes de Colombia. Se ha encontrado entre 2.400 y 3.000 m, en lugares abiertos y cerrados con diferentes exposiciones solares, en la zona de vida andina de la región andina colombiana, en las cordilleras Central y Occidental, creciendo sobre corteza musgosa, troncos caídos y, más raramente, sobre suelo, generalmente asociada con *Lophocolea*, *Plagiochila*, *Campylopus* y *Leptogium*.

Discusión. *Sticta jaguirreana* es probablemente el cianomorfo de una especie fotosimbiodémica, ya que presenta las características típicas de los cianomorfos de fotosimbiodemas que se han encontrado en Colombia (Moncada, et al., 2013c). Podría llegar a confundirse con *S. phyllidioduliginosa* (ver abajo), de la que se separa por la presencia de tomento secundario y las cifelas grandes con el margen involuto a recto. También puede confundirse con los cianomorfos de *S. phyllidioduliginosa* Moncada & Lücking (Moncada, et al., 2013c), de la cual se diferencia por la superficie lisa a foveolada (punteado-impresa), y del cianomorfo de *S. neopulmonarioides* Moncada & Coca (Moncada, et al., 2013e) por el largo pedúnculo y las filidios mayormente marginales.

Especímenes examinados. COLOMBIA. Boyacá: Municipio de Gachantivá, Laguna Las Coloradas; 2.450 m; 7 de julio, 1999, B. Moncada & R. Dávila 445 (UDBC). Cundinamarca: Municipio de Chipaque, vereda Marilandia, vía Santuario; 2.400 m; 8 de septiembre, 2011, B. Moncada 4804 (UDBC). Municipio de Fómeque, Parque Nacional Natural Chingaza, embalse de Chuza; 3.000 m; 15 de octubre, 1988, H. Sipman & J. Aguirre 27417 (B, COL). Municipio de San Francisco, vereda Sabaneta; 2.500 m; 17 de julio, 1986, H. Sipman, et al. 23603 (B, COL). Quindío: Municipio de Salento, vereda Río Arriba, Finca La Montaña, orillas del río Quindío; 2.800 m; 8 de mayo, 1990, J. Uribe, et al. 1073, 1115 (COL).

Sticta macrofuliginosa Moncada & Lücking sp. nov.

Index Fungorum IF550809

Differing from *Sticta* aff. *fuliginosa* by the larger, scrobiculate-faveolate, usually apotheciate thalli.

Tipo. COLOMBIA. Cundinamarca: Municipio de Bogotá, D.C., Parque Nacional Natural Sumapaz, alrededores de la Laguna de Chisacá; 4° 17' N, 74° 12' O; 3.724 m; 15 de

agosto, 2010, B. Moncada, et al. 4042 (UDBC, holotipo; COL, F, FAUC, isotipos). (Figura 6)

Descripción. Fotobionte primario cianobacteria. Pedúnculo ausente. Talo orbicular a irregular, hasta de 15 cm de diámetro, medianamente ramificado, con 3–5 ramificaciones por 5 cm de radio, ramificación politómica. Lóbulos suborbiculares, horizontales a subpéndulos, imbricados, ondulados a levemente revolutos, con los ápices redondeados a irregulares, revolutos, márgenes enteros a crenados, no engrosados; entrenudos de los lóbulos de 10–20 mm de largo, (8–)15–25(–50) mm de ancho, papiráceos a subcoriáceos, resistentes, maleables. Superficie superior escrobiculada a faveolada, de color verde marrón cuando fresco, marrón claro hacia el centro y marrón oscuro hacia el margen en el herbario, brillante, con la línea marginal del mismo color; superficie glabra, sin papilas, sin pruina, con máculas irregulares, cremas. Cilios ausentes. Apotecios escasos, principalmente laminares, dispersos, subpedicelados, invaginación basal inferior pronunciada, hasta de 2,5 mm de diámetro; disco de color marrón rojizo, brillante; margen entero a tomentoso pubescente hacia la base del apotecio,

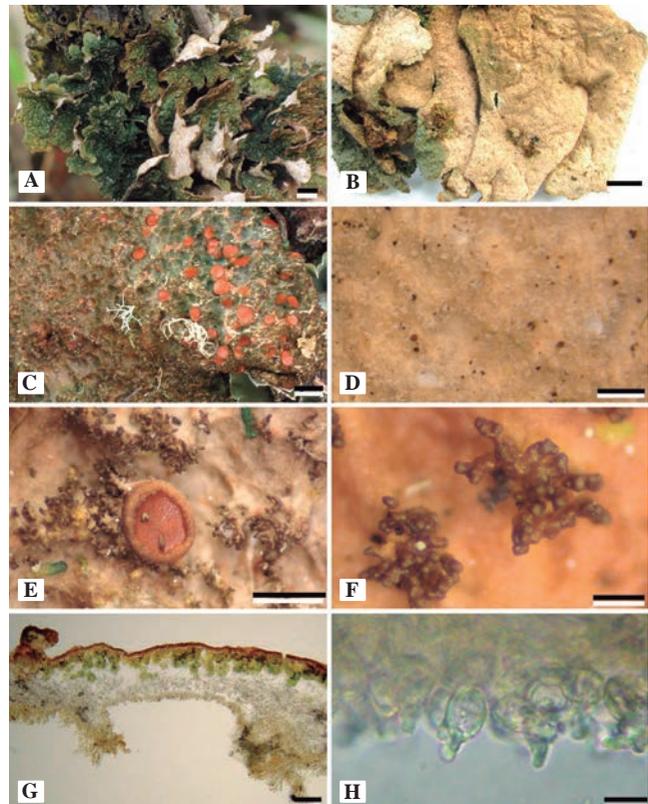


Figura 6. *Sticta macrofuliginosa*. A. Vista dorsal del talo en vivo. B. Vista ventral del talo en seco. C. Detalle de la superficie dorsal que muestra isidios y apotecios laminares. D. Detalle del tomento ventral y de las cifelas. E. Detalle de los isidios laminares y apotecio. F. Detalle de los isidios. G. Detalle de la cifela. H. Cifeloblastos con una papila. Escala: A-B = 1 cm, C = 5 mm, D-E = 2,5 mm, F = 2 mm, G = 100 μm , H = 10 μm

de color crema cuando joven y marrón cuando maduro. Propágulos vegetativos presentes, abundantes, en forma de isidios y lóbulillos (formados de los isidios que se desarrollan en el talo), principalmente laminares (los isidios), mayormente en las costillas de los escrobiculos, mientras que los lobulillos cuando presentes, aparecen marginales, agregados, simples a ramificados, los isidios coraloides, los lóbulillos palmeados, los isidios verticales, los lóbulillos horizontales, los isidios hasta de 0,5 mm de largo, los lóbulos hasta de 1 mm de largo y los isidios de 0,3 mm de ancho, los lóbulillos de 1,5 mm de ancho, más oscuros que el talo, opacos a poco brillantes, en sección transversal los isidios redondos, los lobulillos dorsiventrales, isidios cilíndricos y lobulillos lobuliformes; pedúnculo si presente, cilíndrico, sin cifelas. Médula laxa, de color blanco, K- a K+ levemente amarillo pálido, C-, KC+ amarillo pálido, P-. Superficie inferior ondulada a rugosa, de color crema. Tomento ventral principal denso hasta el margen, grueso (hasta de 0,5 mm de largo), esponjoso, suave, de color crema a beis. Tomento ventral secundario aracnoide, claro. Rizinas escasas, irregularmente dispersas, escurarrosas a anziformes, de color crema, hasta de 1,5 mm de largo. Cifelas escasas, 1–20 por cm² hacia el centro del talo y 21–40 por cm² hacia el margen, dispersas, redondeadas a irregulares, urceoladas con poro ancho a cupuliformes cuando muy abiertas, inmersas a erumpentes, abajo del nivel del tomento, con el margen involuto a recto de color crema, con tomento; poro de (0,2–)0,5–0,7(–1) mm de diámetro hacia el centro del talo; membrana basal pubescente, de color blanco, K+ amarillo, C-, KC-, P-. Picnidios no observados.

Corteza superior paraplectenquimática, de 20–25 µm de grosor, homogénea, conformada por 2–3 capas de células, de 4–11 µm de diámetro, con la pared de 0,6–1,2 µm de grosor y el lumen redondeado a isodiamétrico de 2,5–10 µm de diámetro. Capa de algas de 35–50 µm de grosor, con las células de 10–20 µm de diámetro. Médula de 70–135 µm de grosor, con hifas de 2,5 µm de ancho, sin cristales. Corteza inferior paraplectenquimática, de 20–25 µm de grosor, con 2–4 capas de células; células de 4–12 µm de diámetro, con la pared de 1–1,2 µm de grosor. Tomento dorsal ausente. Tomento ventral principal de 70–240 µm de largo, en fascículos de 12–20 hifas, hifas ramificadas, apicalmente moniliformes con los ápices libres. Tomento ventral secundario de 12–35 µm de largo, solitario, hifas ramificadas, moniliformes con los ápices libres. Cavidad de las cifelas 40–100 µm de alto; cifeloblastos con una papila. Apotecios biatorinos, hasta de 280 µm de alto, sin pedúnculo; excipulo de 85–90 µm de ancho, con tomento. Himenio hasta de 85 µm de alto; epihimenio hasta de 2,5 µm de alto, de color naranja, sin capa gelatinosa. Ascosporas de 18–30 × 7–8 µm, fusiformes, con 1–3 septos.

Etimología. Esta especie recibe su nombre por su semejanza con *Sticta* aff. *fuliginosa*, de la que se diferencia por su gran tamaño y apotecios frecuentemente presentes.

Distribución y ecología. Andes de Colombia. Se ha encontrado entre 3.000–4.400 m, en bosques andinos y de páramo, en lugares con intensidad lumínica media a alta. Se cuenta con registros de su presencia en la vertiente occidental de la cordillera Central y las vertientes oriental y occidental de la cordillera Occidental en las zonas de vida andina a páramo de la región andina colombiana. Crece sobre corteza, generalmente asociada con especies de las hepáticas *Metzgeria* y *Frullania* y el líquen *Heterodermia vulgaris*.

Discusión. *Sticta macrofuliginosa* es una especie con morfotipo semejante a *S. fuliginosa* (Moncada & Lücking, 2012b), con la cual comparte los talos suborbiculares y las isidios laminares; sin embargo, los talos pequeños con papilas y con isidios frágiles de *S. fuliginosa* hacen fácil su reconocimiento. *Sticta gallowayana* (ver arriba) es otra especie con la que se puede confundir *S. macrofuliginosa*, pero los isidios corimbosos, los talos sin filidios o lobulillos y la ausencia de apotecios son importantes para la diferenciación de esta.

Especímenes examinados. COLOMBIA. Boyacá: Municipio de El Cocuy, Parque Nacional Natural El Cocuy, Valle de Las Lagunillas, Cabaña Sisuma; 6° 26' N, 72° 22' O; 3.800 m; 19 de abril, 2011, D. Fonseca & F. Martínez 31a, 47 (UDBC). Alto de la Cueva; 3.800 m; 21 de abril, 2011, D. Fonseca & F. Martínez 198, 235 (UDBC). Caldas: Municipio de Villa María, Nevado del Ruíz, costado noroccidental, cerca al Refugio; 3.500 m; 3 de febrero, 1979, H. Sipman & H. Valencia 10439 (COL,U). Cauca: Municipio de Puracé, costado oriental, cordillera Central. Carretera La Plata a Puracé, 2 km de las termas de San Juan; 3.000 m; 4 de octubre, 1984, J. Aguirre & H. Sipman 5922 (B, COL). Cundinamarca: Municipio de Bogotá, D.C., Parque Nacional Natural Sumapaz; 3.600 m; 8 de marzo, 1980, S. Salamanca, et al. 934 (COL); ibid.; Laguna de Chisacá; 3.660 m; 23 de marzo, 1982, J. Aguirre 2713 (COL). Parque Nacional Natural Sumapaz, Páramo de Chisacá, carretera Usme, Nazareth, hacia la Laguna Grande.; 3.700 m; 4 de septiembre, 1984, J. Aguirre & H. Sipman 5004b (COL). Páramo de Chisacá, carretera a la Laguna Larga; 3.500 m; 15 de julio, 1986, N. Cardona de Hollaender, et al. 40 (CUVC). Parque Nacional Natural Sumapaz, alrededores de la Laguna de Chisacá; 4° 17' N, 74° 12' O; 3.734 m; 8 de abril, 2008, D. Beltrán, et al. 25 (UDBC); ibid.; 3.724 m; 15 de agosto, 2010, B. Moncada, et al. 4042, 4134a, 4137, 4138, 4146 (UDBC); ibid.; 3.600 m; 10 de diciembre, 2010, B. Moncada 5101, 5102, 5107, 5150 (UDBC). Municipio de La Calera, Parque Nacional Natural Chingaza, Monterredondo; 4° 44' N, 73° 51' O, 3.430 m; 13 de abril, 2011, B. Moncada 4625, 4636b (UDBC). Zona de amortiguación del Parque Nacional Natural Chingaza, Vía del ángulo al Rincón del Oso; 3.600 m; 7 de noviembre, 2011, B. Moncada 4942, 4972b (UDBC). Norte de Santander: Municipio de Chitagá, Páramo del Almorzadero; 3.400 m; 12 de mayo, 1979, J. Luteyn & M. Lebrón 7656 (COL). Tolima: Municipio de

Santa Isabel, Valle del Río Totarito, entre el Paso Español y Hacienda La Ermita; 3.650 m; 9 de febrero, 1980, *H. Valencia & T. Boekhout 131a* (COL).

***Sticta minutula* Moncada & Lücking sp. nov.**

Index Fungorum IF550810

Differing from *Sticta hirsutofuliginosa* in the smaller thalli with minutely pubescent surface.

Tipo. COLOMBIA. Cundinamarca: Municipio de Guasca, Páramo de Guasca; 3.350 m; 18 de agosto 2011, *B. Moncada 4753* (UDBD, holotipo; CUCV, F, isotipos). (Figura 7)

Descripción. Fotobionte primario cianobacteria. Pedúnculo ausente. Talo orbicular, hasta de 5 cm de diámetro, poco ramificado, con 0–2 ramificaciones por 5 cm de radio, ramificación politómica. Lóbulos suborbiculares, horizontales a levemente subpéndulos, imbricados, revolutos, con los ápices redondeados, revolutos, márgenes enteros a crenados; entrenudos de los lóbulos de 18–30 mm de largo, (8–)12–30(–40) mm de ancho, coriáceos, frágiles. Superficie superior escrobiculada a faveolada, de color verde oscuro cuando fresco, marrón negruzco en el herbario, poco brillante, con

la línea marginal del mismo color; superficie pubescente a hirsuta, sin papilas, sin pruina, con máculas irregulares, casi imperceptibles, cremas. Cilios ausentes. Apotecios no observados. Isidios abundantes, principalmente laminares, sobre las costillas o en el borde de las escrobiculas o invaginaciones del talo, agregados, ramificados, coraloides, verticales, hasta de 0,2 mm de largo y 0,05 mm de ancho, más oscuros que el talo, de color marrón negruzco, brillantes, en sección transversal redondos, granulares a cilíndricos; pedúnculo si presente, cilíndrico, sin cifelas. Médula laxa, de color blanco, K–, C–, KC–, P–. Superficie inferior ondulada a faveolada en las zonas más viejas, de color crema. Tomento ventral principal escaso en toda la superficie, grueso (largo), esponjoso, suave, de color blanco crema. Tomento ventral secundario aracnoide, claro. Rizinas ausentes. Cifelas escasas, 1–10 por cm² hacia el centro del talo y 21–40 por cm² hacia el margen, dispersas, irregulares, cupuliformes a levemente urceoladas con poro ancho, inmersas, abajo del nivel del tomento, con el margen indiferenciado a levemente involuto de color blanco crema, con tomento; poro de 0,3–1,5 mm de diámetro hacia el centro del talo; membrana basal pubescente, de color blanco, K+ amarillo pálido a amarillo, C–, KC+ amarillo pálido, P–. Picnidios no observados.

Corteza superior paraplectenquimática, de 30–40 µm de grosor, homogénea, conformada por 3–5 capas de células, de 4–10 µm de diámetro, con la pared de 1,2–2,5 µm de grosor y el lumen redondeado a isodiamétrico de 2,5–7,5 µm de diámetro. Capa de algas de 30–70 µm de grosor, con las células de 12–20 µm de diámetro. Médula de 120–200 µm de grosor, con hifas de 2,5 µm de ancho, sin cristales. Corteza inferior paraplectenquimática, de 20–35 µm de grosor, con 2–3 capas de células; células de 4–10 µm de diámetro, con la pared de 1,2–2,5 µm de grosor. Tomento dorsal principal de 25–50 µm de largo, en fascículos de 6 hifas, hifas simples, septadas con los ápices libres. Tomento dorsal secundario de 10–25 µm de largo, solitario, hifas ramificadas, moniliformes con los ápices libres. Tomento ventral principal de 80–3200 µm de largo, en fascículos de 12–20 hifas, hifas ramificadas, apicalmente moniliformes con los ápices libres. Tomento ventral secundario de 15–35 µm de largo, solitario, hifas ramificadas, moniliformes con los ápices libres. Cavidad de las cifelas de 200–1100 µm de alto; cifeloblastos con numerosas papilas.

Etimología. Esta especie recibe este nombre por su tamaño generalmente pequeño.

Distribución y ecología. Andes de Colombia. Se ha encontrado desde 1.750 a 3.500 m, en las zonas de vida subandina a páramo de la región andina colombiana, en las cordilleras Oriental y Occidental. Crece sobre corteza y generalmente está asociado con *Frullania* y *Plagiochila*.

Discusión. *Sticta minutula* forma parte del grupo morfológicamente semejante a *S. aff. fuliginosa*, en el que se incluye también por la presencia de papilas en los cifeloblastos

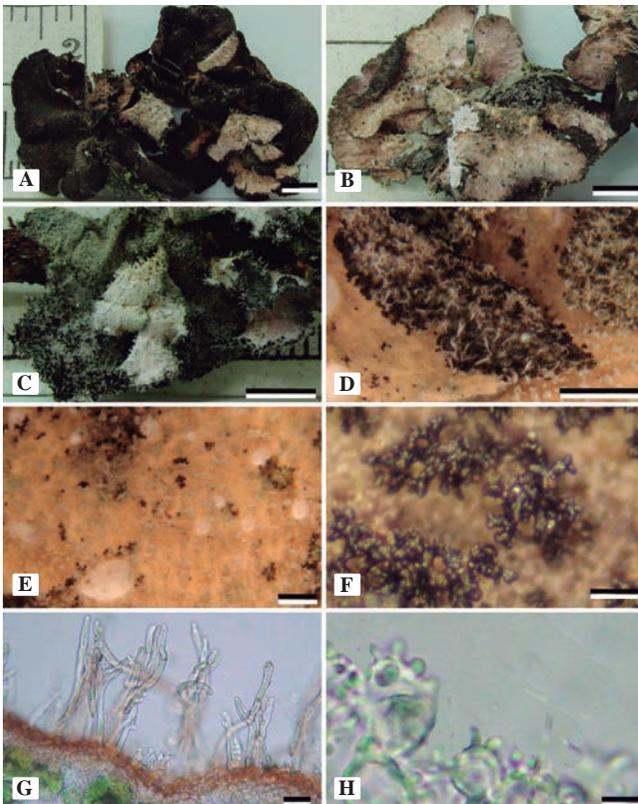


Figura 7. *Sticta minutula*. A. Vista dorsal del talo. B. Vista ventral del talo. C. Detalle de la superficie ventral. D. Detalle del tomento dorsal. E. Detalle del tomento ventral y de las cifelas. F. Detalle de los isidios laminares. G. Detalle del tomento dorsal. H. Cifeloblastos con papilas. Escala: A = 1 cm, B-D = 5 mm, E = 1 mm, F = 0,1 mm, G = 10 µm, H = 5 µm

(Moncada & Lücking, 2012b). Se podría confundir con *S. hirsutofuliginosa* (ver arriba), *S. arachnofuliginosa* (Moncada & Lücking, 2012b) y *S. ciliata*. De la primera se diferencia por la superficie dorsal débilmente pubescente, en ocasiones glabra en zonas cercanas al margen y con abundantes setas esponjosas hacia el centro del talo. De *S. arachnofuliginosa* se distingue por el tomento pubescente homogéneo y cifelas planas y de *S. ciliata*, por el talo frágil con la superficie pubescente aracnoidea y diminutas papilas.

Especímenes examinados. COLOMBIA. Cundinamarca: Municipio de Guasca, Páramo de Guasca; 3.350 m; 18 de agosto, 2011, *B. Moncada* 4729, 4732, 4738, 4753, 4755 (UDBC). Municipio de La Calera, Páramo de Palacio, Hacienda La Siberia; 3.500 m; 5 de enero, 1960, *L. E. Mora* 906a (COL). Parque Nacional Natural Chingaza, Monterredondo; 4° 44' N, 73° 51' O; 3.430 m; 13 de abril, 2011, *B. Moncada* 4639 (UDBC). Nariño: Municipio de Piedranca, La Planada, San Isidro, sur de Ricaurte (carretera Pasto a Tumaco); 1.750 m; 2 de junio, 1986, *H. Sipman*, *R. Velosa*, et al. 32845 (B, COL). Norte de Santander: Municipio de Toledo, Parque Nacional Natural Tamá, sector Orocué, alrededores de la caseta de administración; 2.690 m; 12 de septiembre, 2000, *B. Moncada* & *R. Dávila* 1221 (UDBC).

***Sticta phyllidiofuliginosa* Moncada & Lücking sp. nov.**

Index Fungorum IF550811

Differing from *Sticta* aff. *fuliginosa* in the large, appanate to phyllidiate isidia.

Tipo. COLOMBIA. Cundinamarca: Municipio de Bogotá, D.C., alrededores de la Laguna de Chisacá; 4° 17' N, 74° 12' O; 3.724 m; 15 de agosto, 2010, *B. Moncada*, et al. 4051 (UDBC, holotipo). (Figura 8)

Descripción. Fotobionte primario cianobacteria. Pedúnculo ausente. Talo orbicular a irregular, hasta de 10 cm de diámetro, poco ramificado, con 0–2 ramificaciones por 5 cm de radio, ramificación politómica. Lóbulos suborbiculares, horizontales a subpéndulos, imbricados, ondulados, con los ápices redondeados a irregulares, involutos, márgenes enteros a crenados, no engrosados; entrenudos de los lóbulos de 10–20 mm de largo, (10–)12–15(–22) mm de ancho, subcoriáceos, resistentes. Superficie superior escrobiculada a faveolada, de color verde marrón cuando fresco, gris marrón en el herbario, opaca, con la línea marginal del mismo color; superficie glabra, sin papilas, sin pruina, con máculas irregulares, cremas. Cilios ausentes. Apotecios no observados. Propágulos vegetativos presentes, abundantes, en forma de filidios, principalmente laminares, dispersos a subagregados, simples a ramificados, espatulados a coraloides, verticales a levemente oblicuos, hasta de 1 mm de largo y 0,5 mm de ancho, de color igual al talo, opacos a poco brillantes, en sección transversal dorsiventrales, espatulados; pedúnculo si presente cilíndrico a levemente aplanado en isidios viejos, sin cifelas. Médula laxa, de

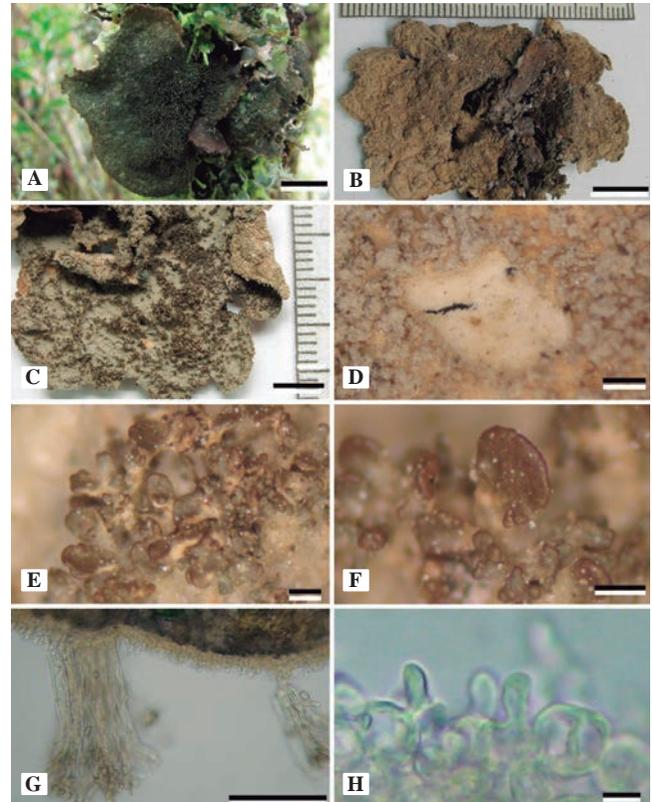


Figura 8. *Sticta phyllidiofuliginosa*. A. Vista dorsal del talo en vivo. B. Vista ventral del talo en seco. C. Detalle de la superficie dorsal que muestra filidios laminares. D. Detalle del tomento ventral y de la cifela. E-F. Detalles de los filidios. G. Detalle del tomento ventral primario y del secundario. H. Cifeloblastos con una papila. Escala: A-B = 1 cm, C-D = 5 mm, E-F = 0,5 mm, G = 100 μ m, H = 10 μ m

color blanco, K– a K+ levemente amarillo pálido, C–, KC+ amarillo pálido, P–. Superficie inferior ondulada a rugosa, de color blanco amarillento. Tomento ventral principal denso hasta el margen, grueso, más delgado hacia el margen, esponjoso, suave, de color crema. Tomento ventral secundario pubescente, claro. Rizinas escasas, irregularmente dispersas, fasciculadas, de color crema a marrón, hasta de 1 mm de largo. Cifelas escasas, 1–20 por cm^2 hacia el centro del talo y 21–40 por cm^2 hacia el margen, dispersas, redondeadas a irregulares, urceoladas con poro ancho a cupuliformes cuando muy abiertas, inmersas a erumpentes, abajo del nivel del tomento, con el margen involuto a recto de color crema, sin tomento u ocasionalmente con tomento; poro de (0,3–) 0,7–1(–2) mm de diámetro hacia el centro del talo; membrana basal pubescente, de color blanco, K–, C–, KC–, P–. Picnidios no observados.

Corteza superior paraplectenquímica, de 15–30 μ m de grosor, homogénea, conformada por 2–3 capas de células, de 4–10 μ m de diámetro, con la pared de 1,2–2,5 μ m de grosor y el lumen redondeado a isodiamétrico de 1,2–2,5 μ m de diámetro. Capa de algas de 35–65 μ m de grosor, con

las células de 10–15 μm de diámetro. Médula de 75–200 μm de grosor, con hifas de 2,5 μm de ancho, sin cristales. Corteza inferior paraplectenquimática, de 12–18 μm de grosor, con 1–3 capas de células; células de 4–14 μm de diámetro, con la pared de 1,2–2,5 μm de grosor. Tomento dorsal secundario de 5–20 μm de largo, solitario, hifas ramificadas, moniliformes con los ápices libres. Tomento ventral principal de 137–165 μm de largo, en fascículos de 12–20 hifas, hifas ramificadas, septadas con los ápices libres. Tomento ventral secundario de 3–12 μm de largo, solitario, hifas ramificadas, moniliformes con los ápices libres. Cavidad de las cifelas de 95–110 μm de alto; cifeloblastos con una papila.

Etimología. Esta especie debe su nombre a su semejanza con *Sticta fuliginosa*, de la cual se distingue por los amplios talos semicoriáceos y la formación de filidios.

Distribución y ecología. Andes de Colombia. Se ha encontrado entre 2.400–3.975 m, en bosques andinos y de páramo, en lugares con intensidad lumínica media a alta. Se cuenta con registros de su presencia en la vertiente occidental de las cordilleras Central y Oriental, en las zonas de vida andina a páramo de la región andina colombiana. Crece sobre corteza, hoja y suelo, generalmente asociada con especies de *Radula* y *Plagiochila* y algunas especies de la familia Lejeuneaceae, además de líquenes del género *Leptogium*.

Discusión. Esta especie pertenece al morfotipo de *S. fuliginosa* pero se distingue por formar isidios aplanados a filidios que en ocasiones se desarrollan como individuos nuevos sobre el talo. Su talo es bastante más grande que los de *S. fuliginosa* y se puede comparar con las especies *S. arachnofuliginosa* (Moncada & Lüicking, 2012b) cuya superficie dorsal es tomentosa y con isidios cilíndricos, simples a ramificados, y *S. globulifuliginosa* (ver arriba) por sus isidios globulares.

Especímenes examinados. COLOMBIA. Boyacá: Municipio de El Cocuy, Parque Nacional Natural El Cocuy, Valle de las Lagunillas, Cabaña Sisuma; 6° 26' N, 72° 22' O; 3.800 m; 19 de abril, 2011, D. Fonseca & F. Martínez 86 (UDBC). Cundinamarca: Municipio de Bogotá, D.C., Páramo de Cruz Verde, carretera Bogotá-Choachí Km. 16; 3.390 m; 26 de mayo, 1972, A. M. Cleef & T. Duncan 3171 (COL, U). Parque Nacional Natural Sumapaz, Páramo de Chisacá, Valle del Río Santa Rosa; 3.400 m; 4 de septiembre, 1984, J. Aguirre & H. Sipman 5072 (B, COL). Alrededores de la Laguna de Chisacá; 4° 17' N, 74° 12' O; 3.724 m; 15 de agosto, 2010, B. Moncada, et al. 4051, 4052, 4129 (UDBC). Municipio de Facatativá, Valle del Río Dulce, a 10 km NO de Facatativá; 2.600 m; 1 de febrero, 1979, H. Sipman, et al. 10350 (COL, U). Risaralda: Municipio de Pereira, Parque Nacional Natural Los Nevados, Laguna de Otún, margen occidental; 3.975 m; 16 de enero, 1980, T. Boekhout 19 (B, COL).

***Sticta plumbeociliata* Moncada & Lüicking sp. nov.**

Index Fungorum IF550812

Differing from *Sticta cometiella* in the absence of a secondary lower tomentum and white cilia.

Tipo. COLOMBIA. Cundinamarca: Municipio de Chipaque, vereda Marilandia, vía Santuario; 2.400 m; 8 de septiembre, 2011, B. Moncada 4820 (UDBC, holotipo). (Figura 9)

Descripción. Fotobionte primario cianobacteria. Pedúnculo ausente. Talo orbicular a suborbicular, hasta de 10 cm de diámetro, medianamente ramificado, con 3–5 ramificaciones por 5 cm de radio, ramificación politómica. Lóbulos suborbiculares, horizontales a ascendentes, imbricados, planos a levemente involutos, con los ápices redondeados, involutos, márgenes enteros a levemente crenados, no engrosados; entrenudos de los lóbulos de 6–8 mm de largo, (5–)7–13(–20) mm de ancho, papiráceos, frágiles. Superficie superior lisa a levemente escrobiculada a foveolada (punteado-impresa), de color gris verdoso cuando fresco, gris azul a marrón grisáceos en el herbario, brillante, con la línea marginal marrón; superficie glabra, sin papilas, sin pruina, con máculas irregulares diminutas, blancas. Cilios escasos a abundantes, simples a fasciculados, blancos, hasta de 0,5 mm de largo. Apotecios no observados. Propágulos vegetativos presentes, escasos a abundantes, en forma de isidios, principalmente laminares, dispersos, ramificados desde la base, coraloides, verticales, hasta de 0,3 mm de largo y 0,05 mm de ancho, más pálidos que el talo, de color gris pálido, opacos,

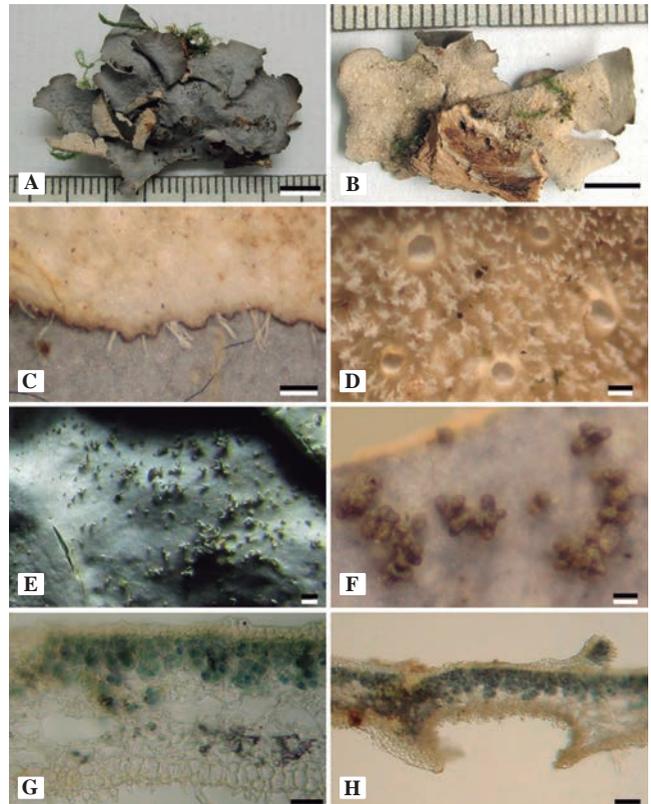


Figura 9. *Sticta plumbeociliata*. A. Vista dorsal del talo. B. Vista ventral del talo. C. Detalle de los cilios blancos. D. Detalle de las cifelas y del tomento ventral. E-F. Detalle de los isidios laminares. G. Anatomía del talo. H. Detalle de la cifela. Escala: A-B = 5 mm, C-E = 0,5 mm, F = 0,1 mm, G-H = 100 μm

en sección transversal redondos, cilíndricos con los ápices engrosados, no globulares; pedúnculo si presente, cilíndrico a levemente aplanado en isidios viejos, sin cifelas. Médula laxa, de color blanco, K– a K+ levemente amarillo pálido, C–, KC+ amarillo pálido, P–. Superficie inferior lisa a levemente ondulada, de color blanco con una franja marginal de color marrón claro. Tomento ventral principal denso, ausente hacia el margen, grueso, más delgado hacia el margen, esponjoso, suave, de color blanco a beis hacia el centro. Tomento ventral secundario pubescente, claro. Rizinas ausentes. Cifelas abundantes, 41–60 por cm² hacia el centro del talo y 61–100 por cm² hacia el margen, dispersas, redondeadas, urceoladas con poro ancho, erumpentes a prominentes, abajo del nivel del tomento, con el margen involuto a levemente erecto de color blanco, sin tomento; poro de (0,25–)0,5–0,7(–1) mm de diámetro hacia el centro del talo; membrana basal pubescente, de color blanco, K+ amarillo pálido, C–, KC+ amarillo pálido, P–. Picnidios no observados.

Corteza superior paraplectenquimática, de 15–35 µm de grosor, homogénea, conformada por 2–3 capas de células, de 3–10 µm de diámetro, con la pared de 0,6–2,5 µm de grosor y el lumen redondeado a isodiamétrico de 2,5–7 µm de diámetro. Capa de algas de 30–45 µm de grosor, con las células de 7,5–12 µm de diámetro. Médula de 35–50 µm de grosor, con hifas de 2,5 µm de ancho, sin cristales. Corteza inferior paraplectenquimática, de 17–20 µm de grosor, con 1–2 capas de células; células de 6–14 µm de diámetro, con la pared de 0,6–1,2 µm de grosor. Tomento ventral principal de 80–280 µm de largo, en fascículos mayores de 20 hifas, hifas ramificadas, septadas con los ápices entrecruzados. Tomento ventral secundario de 5–25 µm de largo, solitario, hifas simples, septadas con los ápices libres. Cavidad de las cifelas de 80–110 µm de alto; cifeloblastos sin papilas.

Etimología. Esta especie debe su nombre al color azul grisáceo de la superficie dorsal y los cilios blancos.

Distribución y ecología. Andes de Colombia. Se ha encontrado entre 1.750–3.430 m, en bosques andinos intervenidos, en lugares con intensidad lumínica baja a media. Se cuenta con registros de su presencia en las cordilleras Central y Oriental en las zonas de vida subandina y andina de la región andina colombiana. Crece sobre la corteza de árboles y arbustos en el sotobosque, generalmente asociada con especies de los géneros *Microlejeunea*, *Hypnum*, *Frullania* y *Pterobryum*.

Discusión. Esta especie con talos azul-grisáceos, fotobionte cianobacterial, isidios laminares y cilios blancos prominentes, se podría confundir en campo con algunas especies con las cuales comparte semejanzas morfológicas como *Sticta cometiella*. Esta última se diferencia por el color de los cilios y la presencia de un tomento secundario. También comparte semejanza morfológica con *S. isidioimpressula* (**Moncada, et al.**, en preparación), la cual se diferencia por la superficie punteado-impresa y los isidios aplanados mezclados con isidios cilíndricos.

Especímenes examinados. COLOMBIA. Antioquia: Municipio de Santa Rosa de Osos, carretera a San José de la Montaña, a dos horas de Medellín; 2.400 m; 10 de junio, 1998, *Ma. I. Lopera* 92 (COL). Cauca: Municipio de Popayán, Los Robles, Campus de la Fundación Universitaria, 15 Km hacia Timbío; 3.315 m; 20–21 de junio, 1986, *H. Sipman, R. Velosa, et al.* 33738 (B, COL). Municipio de Puracé, costado oriental, carretera La Plata-Puracé, 2 km al este de los termales de San Juan; 3.430 m; 4 de octubre, 1984, *J. Aguirre & H. Sipman* 5923 (B, COL). Municipio de Silvia, camino entre Piendamó y Silvia, NE de Popayán; 2.130 m; 22 de junio, 1986, *H. Sipman, R. Velosa, et al.* 33777 (B, COL). Cundinamarca: Municipio de Chipaque, vereda Marilandia, vía Santuario; 2.400 m; 8 de Septiembre, 2011, *B. Moncada* 4784, 4820, 4841 (UDBC). Municipio de Facatativá, Valle del Río Dulce, a 10 km NO de Facatativá; 2.600 m; 1 de febrero, 1979, *H. Sipman, et al.* 10349 (COL, U). Municipio de Fómeque, Parque Nacional Natural Chingaza, embalse de Chuza; 2.600 m; 15 de octubre, 1988, *H. Sipman & J. Aguirre* 27413 (B, COL). Municipio de La Calera, Parque Nacional Natural Chingaza, Monterredondo; 4° 44' N, 73° 51' O; 2.600 m; 13 de abril, 2011, *B. Moncada* 4640 (UDBC). Municipio de San Francisco, vereda Sabaneta, proximidades de la quebrada Cueva Grande; 2.400 m; 17 de julio, 1986, *H. Sipman, et al.* 23599b (B, COL); *ibid.*; 2.500 m; 17 de julio, 1986, *H. Sipman, et al.* 23602 (B, COL). Magdalena: Municipio de Santa Marta, Sierra Nevada de Santa Marta, costado suroriental, hoyo del Río Donachuí, Cancuruá; 3.000 m; 10–11 de octubre, 1959, *J. Cuatrecasas y R. Romero* 24728 (COL). Risaralda: Municipio de Pereira, SFF Otún Quimbaya, vereda La Suiza, alrededores del centro de visitantes; 2.130 m; 4 de septiembre, 2003, *B. Moncada & R. Dávila* 2071 (UDBC). Municipio de Santa Rosa de Cabal, 300 m al E de los termales de Santa Rosa; 2.000 m; 27 de septiembre, 1985, *J. Wolf* 151 (B, COL); *ibid.*; 1.900 m; 16 de octubre, 1985, *J. Wolf* 221 (COL). Santander: Municipio de Charalá, Virolín, Cañaverales, cerca a la Finca Santa Helena; 3.400 m; 25 de octubre, 1988, *H. Sipman & J. Aguirre* 27619 (B, COL). Cañaverales, cerca de Entrerríos; 1.750 m; 25 de octubre, 1998, *H. Sipman & J. Aguirre* 27643 (B, COL). Tolima: Municipio de Ibagué, cuenca del Río Combeima, Finca El Silencio; 2.500 m; 23 de junio, 1985, *J. Hernández, et al.* 3116 (COL, US). Las Juntas, El Silencio; 2.500 m; 28 de junio, 2002, *D. Moreno & P. Hincapié* 135b (COL).

Clave para las especies del morfotipo *fuliginosa* presentes en Colombia

- 1a Talo con isidios cilíndricos a levemente aplanados uniformemente coloreados 2
- 1b Talo con filidios dorsiventrales, superficie ventral generalmente blanca 16
- 2a Isidios arbusculares, pedúnculo de los isidios con cifelas; cifeloblastos con numerosas papilas 3

- 2b Isidios simples a ramificados, no arbusculares, si pedúnculos presentes, éstos sin cifelas; cifeloblastos variables 4
- 3a Superficie dorsal pubescente-escabrosa; isidios hasta de 1 mm de altura, cilíndricos; pedúnculos de los arbusculos sin tomento; cifelas hasta de 3,5 mm de diámetro **S. arbuscula**
- 3b Superficie dorsal tomentosa-aracnoidea; isidios hasta de 2 mm de alto, redondeados a levemente espatulados; pedúnculo de los arbusculos con tomento; cifelas no mayores a 2 mm de diámetro **S. arbusculotomentosa**
- 4a Superficie dorsal total o parcialmente pubescente, hirsuta o tomentosa 5
- 4b Superficie dorsal glabra 8
- 5a Talos pequeños, hasta de 5 cm de diámetro, revolutos; cifeloblastos con abundantes papilas 6
- 5b Talos medianos a grandes hasta de 15 cm de diámetro, rara vez involutos; cifeloblastos sin papilas o si presentes, con 1–4 papilas 7
- 6a Superficie pubescente aracnoidea, con papilas diminutas; cilios presentes (aunque escasos) **S. ciliata**
- 6b Superficie pubescente con tricomas hirsutos muy conspicuos, sin papilas; cilios ausentes **S. minutula**
- 7a Talos fuertemente faveolados, planos a revolutos; superficie dorsal tomentosa pubescente, isidios simples a levemente ramificados, hasta de 0,2 mm de longitud; cifelas planas **S. arachnofuliginosa**
- 7b Talos escrobiculados a ondulados; superficie dorsal débilmente pubescente a glabra hacia el margen y con abundantes setas esponjosas hacia el centro del talo; isidios simples a coraloides, hasta 0,5 mm de longitud; cifelas urceoladas con poro ancho **S. hirsutofuliginosa**
- 8a Cilios escasos a abundantes 9
- 8b Cilios ausentes 12
- 9a Cilios negro-marrón, hasta de 1 mm de longitud; tomento secundario ausente **S. cometiella**
- 9b Cilios blanco a marrón, hasta de 0,5 mm de longitud; tomento secundario presente. 10
- 10a Isidios globulares a cilíndricos con los ápices globulares, simples a apicalmente ramificados, brillantes; talos marrón oscuro en ejemplares de herbario; cifeloblastos con una papila **S. globulifuliginosa**
- 10b Isidios cilíndricos con los ápices no globulares, ramificados desde la base, opacos; talos grisáceos en ejemplares de herbario; cifeloblastos sin papilas 11
- 11a Cifelas rosadas, K+ rojo borgoña; talos subcoriáceos **S. roseocyphellata**
- 11b Cifelas blancas, K+ amarillo; talos papiráceos a subcoriáceos **S. plumbeociliata**
- 12a Talos grandes, hasta de 15 cm, con isidios que se desarrollan en el talo generando lobulillos, especialmente hacia el margen; apotecios siempre presentes; cifeloblastos con una papila **S. macrofuliginosa**
- 12b Talos pequeños a medianos, no mayores de 10 cm, con isidios que no se desarrollan en el talo; sin lobulillos; apotecios no observados; cifeloblastos variables 13
- 13a Isidios corimbosos (“brocoliformes”) 14
- 13b Isidios simples, cilíndricos hinchados (como salchichas) a coraloides, nunca corimbosos 15
- 14a Talos medianos hasta de 10 cm de diámetro, gris verdoso, marrón hacia el margen; isidios altos, hasta de 2 mm, opacos; médula K– tomento secundario ausente; cifeloblastos sin papilas **S. gallowayana**
- 14b Talos pequeños hasta de 5 cm de diámetro, marrón oscuro homogéneo; isidios pequeños, hasta de 0,8 mm de altura, brillantes; médula K+ amarillo naranja; tomento secundario aracnoide; cifeloblastos con una papila. **S. viviana**
- 15a Isidios frágiles, alargados, bifurcados o cilíndricos hinchados (con forma de salchicha); superficie dorsal gris plomo, con papilas abundantes; superficie ventral blanca; cifeloblastos con una papila **S. aff. fuliginosa**
- 15b Isidios robustos, globulares o cilíndricos, raras veces aplanados, superficie dorsal gris verdoso a marrón, papilas ausentes; superficie ventral amarillenta o crema; cifeloblastos sin papilas. **S. maculofuliginosa**
- 16a Talos palmeados, pedúnculo indistinto a largo de 1 cm, propágulos de 2-3 mm de longitud. Médula K+ rosa a borgoña pálido. 17
- 16b Talos orbiculares, pedúnculo ausente, propágulos hasta de 1 mm de longitud. Médula K– a levemente amarilla 18
- 17a Cilios abundantes, negros; cifelas con poro de 0,25 a 2,5 mm; tomento denso, escaso hacia el margen, cifelas con poro de 0,25 a 2,5 mm **S. macrothallina** (cianomorfo)
- 17b Cilios ausentes, cifelas con poro de 0,6 a 1,7mm, tomento escaso, ausente hacia el margen **S. neopulmonarioides** (cianomorfo)
- 18a Médula y máculas de color blanco; cilios ausentes; tomento ventral secundario presente, pubescente; cifelas urceoladas con poro ancho, hasta de 2 mm de diámetro, margen de la cifela involuto a recto **S. phyllidiofuliginosa**

18b Médula y máculas de color amarillo; cilios escasos; tomento ventral secundario ausente, cífelas planas, hasta de 1 mm de diámetro, margen de la cífela indiferenciado *S. jaguirreana*

Agradecimientos

Este estudio se llevó a cabo en el marco del proyecto *Neotropical Epiphytic Microlichens – An Innovative Inventory of a Highly Diverse yet Little Known Group of Symbiotic Organisms* de la **National Science Foundation de Estados Unidos (DEB 715660 The Field Museum; PI R. Lücking)**. Expresamos especial agradecimiento al programa Research Grants in Plant Systematics Call for 2013 de **The International Association for Plant Taxonomy-IAPT**, por el apoyo en la realización del proyecto *How many species of Sticta are there?* Igualmente, **agradecemos a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas** por el apoyo en el Herbario Forestal Gilberto Emilio Mahecha Vega – Sección Criptógamas, así como a los curadores de los herbarios citados en este estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Acharius, E.** (1803). Methodus qua omnes detectos lichenes ad genera redigere tentavit. Estocolmo.
- Aguirre-C., J.** (2008). Catálogo de los líquenes de Colombia. (401–547) en: Rangel-Ch., J. O. (Ed.) Colombia Diversidad Biótica VI: Riqueza y Diversidad de los Musgos y Líquenes en Colombia. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Aptroot, A., Sparrius, L. B., Lai, M. J.** (2002). New Taiwan macrolichens. *Mycotaxon*. **84**: 281-292.
- Büdel, B., Meyer, A., Salazar, N., Zellner, H., Zotz, G., Lange, O. L.** (2000). Macrolichens of montane rain forests in Panama, Province Chiriqui. *The Lichenologist*. **32**: 539-551.
- Farkas, E.** (2003). Contributions to the lichen flora of East Africa *Pseudocyphellaria* and *Sticta*. *Acta Academiae Paedagogicae Sectio Biologiae*. **24**: 235-255.
- Galloway, D. J.** (1994). Studies on the lichen genus *Sticta* (Schreber) Ach. I. Southern South American species. *The Lichenologist*. **26**: 223-282.
- Galloway, D. J.** (1997). Studies on the lichen genus *Sticta* (Schreber) Ach. IV. New Zealand species. *The Lichenologist*. **29**: 105-168.
- Galloway, D. J.** (1998a). Studies on the lichen genus *Sticta* (Schreber) Ach. V. Australian species. *Tropical Bryology*. **15**: 117-160.
- Galloway, D. J.** (1998b). Edvard Vainio and the family *Lobariaceae*, with special reference to the taxonomic history of *Sticta*. En: Marcelli, M.P. & Ahti, T. (Eds.). *Recollecting Edvard August Vainio*. (61-84). São Paulo, Brazil: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, Estado de São Paulo.
- Galloway, D. J.** (2001). *Sticta*. Flora of Australia. Volume 58a, Lichens. **3**: 78-97.
- Galloway, D. J.** (2007). Flora of New Zealand Lichens (2nd ed.). Lincoln. Manaaki Whenua Press.
- Gyelnik, V.K.** (1931). De Stictaceis nonnullis. In *Repertorium specierum novarum regni vegetabilis*. **29**: 292-300
- Hue, A.M.** (1901). Tribus XXII Sticteae. Lichens Extra Europaei, a pluribus collectoribus ad museum parisiense missi. *Nouv. Archiv. Du Museum, Ser. 4, vol. III* p. 22-102
- Joshi, M. & Awasthi, D. D.** (1982). The lichen family *Stictaceae* in India and Nepal. *Biological Memoirs*. **7**: 165-190.
- Lumbsch, H.T.** (2002) Analysis of phenolic products in lichens for identification and taxonomy. In: Kranner I, Beckett RP, Varma AK (Ed). *Protocols in Lichenology. Culturing, Biochemistry, Ecophysiology and Use in Biomonitoring* (281–295). Springer, Berlin & Heidelberg.
- Luteyn, J. L.** (1999). Páramos: A checklist of plant diversity, geographical distribution, and botanical literature. New York. The New York Botanical Garden Press.
- Mackay, J. T.** (1836). Flora Hibernica. Curry. Dublin.
- McDonald, T., Miadlikowska, J., Lutzoni, F.** (2003). The lichen genus *Sticta* in the Great Smoky Mountains: A phylogenetic study of morphological, chemical, and molecular data. *The Bryologist*. **106**: 61-79.
- Moncada B.** (2012). El género *Sticta* en Colombia. Taxonomía, Ecogeografía e Importancia. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Moncada, B., Aguirre, J., Lücking, R.** (2014). Ecogeografía del género *Sticta* (Ascomycota liquenizados: Lobariaceae) en Colombia. *Revista de Biología Tropical*. **62**: 266-281.
- Moncada, B., Coca, L. F., Lücking, R.** (2013c). Neotropical members of *Sticta* (lichenized Ascomycota: Lobariaceae) forming photosymbiodemes, with the description of seven new species. *The Bryologist*. **116** (2): 169-200.
- Moncada, B. & Lücking R.** (2012b). Ten new species of *Sticta* and counting: Colombia as a hot spot for unrecognized diversification in a conspicuous macrolichen genus. *Phytotaxa*. **74**: 1-29.
- Moncada, B., Lücking, R., Betancourt, L.** (2013a). Phylogeny of the Lobariaceae (lichenized Ascomycota: Peltigerales) with a reappraisal of the genus *Lobariella*. *The Lichenologist*. **45**: 203-263.
- Moncada, B., Lücking, R., Coca, L. F.** (2013d). Six new apotheciate species of *Sticta* (lichenized Ascomycota: Lobariaceae) from the Colombian Andes. *The Lichenologist*. **45**: 635-656.
- Moncada, B., Lücking, R., Suárez, A.** (2013b). Molecular phylogeny of the genus *Sticta* (lichenized Ascomycota: Lobariaceae) in Colombia. *Fungal Diversity*. **64** (1): 205-231.
- Orange, A., James, P.W., White, F.J.** (2001) *Microchemical Methods for the Identification of Lichens*. British Lichen Society, London.
- Purvis, W.** (2000). Lichens. The Natural History Museum. London, Life Series.

- Sipman, H. J. M., Aguirre-C., J., Rangel-Ch., J. O.** (2000). Líquenes. En: Rangel-Ch. (Ed.) Colombia Diversidad Biótica III: La Región de Vida Paramuna. Bogotá: Edit. Unilibros, Universidad Nacional de Colombia.
- Sipman, H. J. M., Hekking, W., Aguirre-C., J.** (2008). Checklist of lichenized and lichenicolous fungi from Colombia. Biblioteca José Jerónimo Triana No. 20. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Stizenberger, E.** (1895). Die Grübchenflechten (*Sticta*) und ihre geographische Verbreitung. *Flora*. **81**: 88-150.
- Suárez, A. & Lüicking, R.** (2013) *Sticta viviana* (lichenized Ascomycota: Peltigerales: Lobariaceae), a new species from Colombian páramos. *The Lichenologist*. **45**: 153-157.

- Swinscow, T. D. V. & Krog, H.** (1988). Macrolichens of East Africa. London. British Museum (Natural History).
- Takahashi, K., Wang, L.-S., Tsubota, H., Deguchi, H.** (2006). Photosymbiodemes *Sticta wrightii* and *Dendriscoaulon* sp. (lichenized Ascomycota) from Yunnan, China. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory*. **100**: 783-796.
- Tønsberg, T. & Goward, T.** (2001). *Sticta oroborealis* sp. nov. and other Pacific North American lichens forming dendriscoauloid cyanotypes. *The Bryologist*. **104**: 12-23.
- Vainio, E. A. & Liebmann, F. M.** (1926). Lichenes mexicani a FM Liebmann annis 1841-1843 collecti, in Museo hauniensi asservati. H. Hagerup's Boghandel. *Dansk Botanisk Arkiv*. **4** (11): 1-25.

Caracterización de la entomofauna acuática en cuatro quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó, Colombia

Zuleyma Mosquera-Murillo*, Karen E. Córdoba-Aragón

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

Resumen

Se estudió la entomofauna acuática de cuatro quebradas de la cuenca del río San Juan en el departamento del Chocó (Colombia). Entre febrero y julio de 2007 se recolectaron 2.377 especímenes distribuidos en nueve órdenes, 35 familias y 52 géneros. El orden Ephemeroptera fue el más representativo en términos de abundancia (61,09 %) y de riqueza (11 géneros), seguido de Coleoptera (13,38 %), con 12 géneros. El índice de diversidad de Shannon-Weaver, de 2,95 bits/ind, así como la riqueza total de géneros (52) encontrada en las quebradas, demuestran su gran diversidad, con diferencias significativas entre ellas, pero no en cuanto a los meses de muestreo. De acuerdo con el índice de Jaccard, basado en la presencia de diferentes géneros identificados, se observó que las quebradas Profundo y Colorado presentaron mucha similitud (0,65), mientras que el mayor valor de disimilitud lo presentó la quebrada San Francisco (0,48). Los parámetros físicos y químicos estaban dentro de los rangos normales y presentaron poca variación, lo que indica que las quebradas tienen buenas condiciones ecológicas para el establecimiento de una comunidad acuática diversa.

Palabras clave: entomofauna acuática, San Juan, Chocó.

Characterization of aquatic entomologic fauna in four streams of San Juan river (Chocó - Colombia)

Abstract

The aquatic entomofauna of four streams of the San Juan river in the department of Chocó (Colombia) was studied. Between February and July 2007, 2,377 specimens belonging to nine orders, 35 families and 52 genera were collected. The order Ephemeroptera was the most representative in terms of abundance (61.09%) and biological richness (11 genera), followed by the order Coleoptera (13.38%). A Shannon-Weaver diversity index of 2.95 and the total number of genera found in the streams showed their high diversity; we found significant differences between them, but not between sampling months. According to the Jaccard index based on the presence of different identified genera, we observed that the Profundo and Colorado streams had high similarity (0.65), while the highest value of dissimilarity was found in the San Francisco stream (0.48). The physical and chemical parameters were within normal ranges and showed little variation, indicating that the streams have good ecological conditions for the establishment of a diverse aquatic community.

Key words: Aquatic entomofauna, San Juan, Chocó, Colombia.

Introducción

El objetivo principal del estudio ecológico de los sistemas lóticos es entender los mecanismos y procesos responsables de las diferencias y similitudes entre las comunidades y su relación con las características fisicoquímicas del agua donde se desarrollan (Machado & Roldán, 1981). Entre las comunidades que habitan estos sistemas se encuentran los macroinvertebrados acuáticos, que dan cuenta de gran parte de su diversidad biológica y con frecuencia son el principal componente animal de los sistemas lóticos (Esteves, 1988).

Los macroinvertebrados acuáticos, y en general los insectos, juegan un papel importante en todos los procesos ecológicos de los sistemas acuáticos, son un enlace importante para la

transferencia de energía a diversos niveles tróficos de las cadenas alimentarias acuáticas (Malmqvist, *et al.*, 2004), aceleran los procesos de descomposición de detritos y contribuyen al reciclaje de nutrientes (Wotton & Malmqvist, 2001; Hanson, *et al.*, 2010); además, consumen gran cantidad de algas y otros microorganismos asociados con el perifiton en los ríos o con el plancton en los lagos y, muchas veces, este consumo aumenta la productividad primaria, ya que se elimina el tejido poco productivo y se mineralizan los nutrientes (Wallace & Webster, 1996; Allan & Castillo, 2007).

*Correspondencia:

Zuleyma Mosquera-Murillo, zuleymamosquera@gmail.com

Recibido: 20 de noviembre de 2014

Aceptado: 2 de marzo de 2015

Los cambios ambientales tienen gran influencia en la distribución, abundancia y riqueza de las comunidades de insectos acuáticos en los cuerpos de agua (Hawkins, *et al.*, 1982, Omoto, *et al.*, 2000, Shieh *et al.*, 2000, Ocón, *et al.*, 2004), las cuales actúan como testigos biológicos del nivel de deterioro ambiental de las corrientes superficiales, ya que reflejan las condiciones y los cambios ecológicos que ocurren en el sistema (Alba-Tercedor, 1996).

Entre los cambios que se pueden detectar con los insectos acuáticos están las alteraciones del hábitat y los cambios de temperatura, sustrato y concentración de desechos domésticos e industriales en función del tiempo de ocurrencia e intensidad del evento (Rosenberg, *et al.*, 1993a). Estas características posibilitan su uso como herramientas para la evaluación espacio-temporal de los cambios en la calidad del agua de cuerpos de agua superficiales mediante el seguimiento biológico (Rosenberg, *et al.*, 1993b).

Los siguientes son algunos de los trabajos que brindan aportes valiosos al conocimiento de los insectos acuáticos en Colombia: Zamora (2002), Posada & Roldán (2003), Muñoz (2004), Guevara, *et al.*, (2004, 2005, 2007), Molano, *et al.*, (2005), Romero, *et al.*, (2006), Latorre, *et al.*, (2006), Rojas, *et al.*, (2006), Reinoso, *et al.*, (2007, 2008), Vásquez & Reinoso (2012), Vásquez, *et al.*, (2014), Forero, *et al.*, (2013, 2014), Zúñiga, *et al.*, (2014), Parra, *et al.*, (2014). Específicamente en el Chocó, los estudios publicados se han desarrollado en la cuenca del río Atrato (Rivas, *et al.*, 2003; Torres, *et al.*, 2006; Asprilla, *et al.*, 2006; Mosquera, *et al.*, 2006; Casas, *et al.*, 2006, Córdoba, *et al.*, 2007, Salas, *et al.*, 2011), pero no hay información sobre la cuenca del río San Juan. En el presente estudio se caracterizó la comunidad de insectos acuáticos de cuatro quebradas pertenecientes a la cuenca del río San Juan, todas con características de primer orden, como una contribución al conocimiento de la diversidad de los macroinvertebrados acuáticos de la región.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se llevó cabo en cuatro quebradas pertenecientes a la cuenca del río San Juan. Este río, ubicado entre los 5° 16' 10" de latitud norte y los 76° 73' 10" de longitud oeste, es uno de los más importantes del Chocó; cubre un área total de 15.000 km² y tiene una longitud de 750 km (Bedoya, *et al.*, 2009). Se encuentra a una altura de 75 msnm, con temperaturas de entre 27 y 29 °C y una precipitación anual promedio que alcanza valores medios de alrededor de 10.000 mm/año (Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico - IIAP, 2013).

En el área del San Juan predominan las zonas de vida de bosque pluvial tropical (bp-T) y bosque muy húmedo tropical (bmh-T) (Holdridge, 1996). Las quebradas estudiadas presentaban aguas transparentes y un sustrato compuesto de piedras, arena y hojarasca en descomposición, con caudal

de entre 0,067 y 3,76 m³ seg⁻¹, y una amplia cobertura vegetal en sus márgenes como resultado de la escasa influencia antrópica en la zona.

Muestreo y análisis

Se hicieron cinco salidas de campo entre febrero y julio de 2007, durante las cuales se seleccionó un tramo representativo de 100 metros en cada una de las quebradas para evaluar las condiciones fisicoquímicas y recolectar muestras de insectos acuáticos. En cada quebrada se midieron *in situ* el oxígeno disuelto (mg/l⁻¹), el pH (unidades de pH), la temperatura del agua (°C), la conductividad eléctrica (μS/cm) y los sólidos totales disueltos (mg/l⁻¹) con ayuda de un equipo digital mutiparámetros (HACH); la alcalinidad total (mg/l⁻¹ CaCO₃) se midió en el Laboratorio de Limnología de la Universidad Tecnológica del Chocó siguiendo las recomendaciones de los *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association - APHA, 1992).

La recolección de los insectos acuáticos se hizo con diferentes métodos de captura de acuerdo al sustrato presente: una red D-net para la vegetación marginal y pinzas entomológicas para los organismos presentes en piedras, troncos y hojarasca. Se hizo el mismo esfuerzo de muestreo en cada uno de los sustratos presentes (30 minutos). Los organismos se fijaron en alcohol al 70 % en frascos previamente rotulados y luego se trasladaron al Laboratorio de Limnología de la Universidad Tecnológica del Chocó para su determinación taxonómica con ayuda de un estereoscopio y claves especializadas para cada uno de los taxones (Merritt & Cummins, 1996; Fernández & Domínguez, 2001; Posada & Roldán, 2003; Domínguez & Fernández, 2009; Springer, *et al.*, 2010).

Para describir la comunidad de macroinvertebrados en las diferentes quebradas, se emplearon los parámetros biológicos de diversidad biológica de Shannon - Wiener (H'), la dominancia de Simpson (D) y la riqueza total (programa Past, versión 1.57, Hammer, *et al.*, 2001); sus diferencias espaciales (quebradas) y temporales (muestreos) se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA), previa revisión de las condiciones de normalidad y homocedasticidad. Se empleó el índice de Jaccard para comparar el grado de similitud entre las quebradas. Para estos análisis se empleó el programa Minitab, versión 15.

Resultados y discusión

Aspectos físicos y químicos

La tabla 1 resume los valores de las variables físicas y químicas de las cuatro quebradas estudiadas. El oxígeno disuelto se mantuvo por encima de los 5 mg/l⁻¹ y no superó los 9 mg/l⁻¹, valores que favorecen una alta densidad biológica y el desarrollo de la entomofauna acuática (Guerrero & Manjares, 2003). El pH se mantuvo dentro del rango de la neutralidad, lo cual es propio de ecosistemas oligotróficos (Roldán, 1992), e indican una estabilidad alta del medio

Tabla 1. Valores promedio de algunas variables físicas y químicas medidas en cuatro cuerpos de agua de la cuenca del San Juan, Chocó - Colombia

Variables / Quebradas	Profundo P1	Profundo P2	Colorado	Buena Vida	San Francisco	CV
Oxígeno disuelto (mg/l)	6,21	5,4	5,01	5,48	5,98	18,17
pH (unidades de pH)	7,2	7,7	7,01	7,88	7,02	7,28
Temperatura del agua (°C)	26,18	26,51	26,52	25,53	25,85	2,44
Conductividad eléctrica (μS/cm)	29,75	33,25	20,07	33,4	40,7	28,11
Sólidos totales disueltos (mg/l)	14,83	16,62	10	16,68	20,35	28,2
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	7,67	15,7	10,4	12,18	18,18	37,56

acuático. La temperatura del agua no superó los 27 °C en ninguno de los cuerpos de agua estudiados, manteniéndose dentro del rango registrado para la zona tropical, con valores entre 25 y 30 °C (Asprilla, *et al.*, 1998). La conductividad eléctrica, al igual que la alcalinidad y los sólidos totales disueltos, presentaron promedios dentro de los rangos citados por Roldán (1992) para ecosistemas acuáticos de tierras bajas, es decir, entre 30 y 60 μS/cm para el caso de la conductividad y menores de 100 mg/l⁻¹ para la alcalinidad. Se presentaron pocas variaciones entre los cuerpos de agua en cuanto a las variables medidas, a excepción de la alcalinidad, con un coeficiente de variación de 37,56 %.

Entomofauna acuática

Se recolectaron 2.377 especímenes (correspondientes todos a estados inmaduros de los insectos), los cuales se agruparon en nueve órdenes, 35 familias y 52 géneros (Tabla 2). Estos datos son muy significativos para el país, puesto que son los primeros reportes de insectos acuáticos de la cuenca del río San Juan en el Chocó. El orden Ephemeroptera presentó la mayor densidad de individuos, con 1.452 (61,09 %), siendo uno de los de mayor riqueza biológica, con 11 géneros (Figura 1), hallazgo que coincide con otras investigaciones llevadas a cabo en el país (Arango, *et al.*, 2008; Vásquez-Ramos & Reinoso, 2012; Forero-Céspedes, *et al.*, 2014), en las que se resalta la abundancia de este orden de insectos acuáticos.

Las ninfas del orden Ephemeroptera constituyen una parte importante de las cadenas alimenticias en ríos y arroyos como alimento para otros organismos acuáticos, procesadores de materia orgánica y herbívoros, además, son elementos importantes en la transferencia de energía dentro del sistema acuático y están presentes en casi todos los tipos de cuerpos de agua, aunque con mayor abundancia y diversidad en ríos y arroyos de fondos rocosos (Flowers & De la Rosa, 2010). El sustrato rocoso y pedregoso es dominante en las quebradas del río San Juan, lo cual contribuye a la abundancia de este orden.

El mayor número de individuos y de familias (29) se registró en la quebrada Profundo, P1 (655), siendo la Leptophlebiidae la más representativa, seguida por Baetidae. Estas dos

familias son las de mayor distribución y diversidad en Suramérica y registran el mayor número de géneros y especies en Colombia (Zúñiga, *et al.*, 2004). A nivel de géneros, *Thraulodes* fue el más representativo en los cuerpos de agua estudiados, lo que puede atribuirse a las condiciones ecológicas reinantes en ellos, caracterizadas por altos valores de oxígeno disuelto, pH neutro, baja conductividad y pocos sólidos, pues las ninfas de este género son muy sensibles a su variación. El género *Thraulodes* es el más común dentro de la familia Leptophlebiidae, habita en todo tipo de ríos, en arroyos, en agua con baja carga orgánica y en un amplio rango de altitudes (Zúñiga, *et al.*, 2004; Domínguez, *et al.*, 2006), y prefiere el sustrato pedregoso (Zúñiga, *et al.*, 2004). Se destaca la presencia del género *Hydrosmilodon* en la cuenca del río San Juan, el cual fue reportado por primera vez para Colombia en la cuenca del Atrato por Casas, *et al.*, (2006).

El orden Coleoptera (13,38 %) fue el segundo más importante en el estudio, con ocho familias, entre las que Elmidae y Psephenidae fueron las más abundantes, y se encontraron asociadas a una variedad de sustratos naturales sumergidos en las quebradas estudiadas (piedras, hojarasca, raíces de plantas acuáticas, vegetación ribereña, fondos arenosos, etc.). La mayoría de las familias de este orden presentan especies que viven en ambientes lóticos y que forman parte de las comunidades bentónicas, donde no alcanzan grandes densidades (Fernández & Domínguez, 2001); sin embargo, presentan una gran diversidad, gracias a que ocupan un amplio espectro de hábitats acuáticos y semiacuáticos, incluidas áreas ripícolas, ecosistemas de agua fría, de corriente rápida, salobres y áreas estancadas de estuarios y ciénagas (Richoux, 1994; Merrit & Cummins, 1996), como lo corroboran los 12 géneros que se reportan para este orden en la presente investigación.

La familia Elmidae ha sido reportada como abundante en otras investigaciones a nivel nacional (Mosquera, *et al.*, 2002; Caupaz-Flórez, *et al.*, 2006; Arias, *et al.*, 2007; Zúñiga, *et al.*, 2013). Los miembros de esta familia viven en aguas corrientes con alto contenido de oxígeno, destacándose como los más comunes y numerosos de los

Tabla 2. Abundancia de la entomofauna acuática en cuatro quebradas de la cuenca del río San Juan, Chocó - Colombia

Taxón/Quebrada	Profundo		Buena Vida	San Francisco	Colorado	Total	%	
	Punto 1	Punto 2						
Ephemeroptera								
Leptophlebiidae	<i>Farrodes</i>	23	2	144	0	4	173	7,28
	<i>Thraulodes</i>	147	174	136	83	194	734	30,88
	<i>Hydrosmilodon</i>	21	0	0	0	3	24	1,01
	<i>Terpides</i>	22	13	1	15	2	53	2,23
Baetidae	<i>Cloeodes</i>	11	13	4	1	9	38	1,60
	<i>Americabaetis</i>	38	31	24	14	44	151	6,35
	<i>Camelobaetidius</i>	33	15	1	1	37	87	3,66
	<i>Baetodes</i>	38	9	9	0	2	58	2,44
Leptohyphidae	<i>Haplohyphes</i>	2	2	0	0	10	14	0,59
	<i>Leptohyphes</i>	44	29	4	4	23	104	4,38
	<i>Tricorythodes</i>	10	4	0	1	1	16	0,67
Plecoptera								
Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	27	36	32	5	63	163	6,86
Trichoptera								
Leptoceridae	<i>Nectosyche</i>	3	2	1	0	9	15	0,63
Hydropsychidae	<i>Smicridea</i>	34	8	32	18	23	115	4,84
Phylopotamidae	<i>Chimarra</i>	2	1	0	7	28	38	1,60
Glossosomatidae	<i>Culoptila</i>	2	2	3	9	2	18	0,76
Hydrobiosidae	<i>Atopsyche</i>	3	1	0	0	1	5	0,21
Helicopsychidae	<i>Helicopsyche</i>	2	0	1	0	0	3	0,13
Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i>	1	1	0	1	0	3	0,13
Odontoceridae	<i>Marilia</i>	1	2	0	0	0	3	0,13
Hydroptilidae	<i>Ochrotrichia</i>	1	0	0	0	0	1	0,04
Odonata								
Calopterygidae	<i>Hetaerina</i>	5	1	8	1	1	16	0,67
	<i>Macrothemis</i>	3	1	0	0	0	4	0,17
Libellulidae	<i>Brechmorhoga</i>	4	1	1	0	0	6	0,25
	<i>Dythemis</i>	4	2	0	0	0	6	0,25
Cordulidae	<i>Neocordulia</i>	0	0	0	0	1	1	0,04
Polythoridae	<i>Polythore</i>	0	0	0	0	1	1	0,04
Platystictidae	<i>Palaemnema</i>	7	3	5	0	8	23	0,97
Megapodagrionidae	<i>Heteragrion</i>	6	3	6	0	0	15	0,63
Gomphidae	<i>Agriogomphus</i>	0	0	0	2	0	2	0,08
Perilestidae	<i>Perissolestes</i>	0	0	0	3	0	3	0,13
Coenagrionidae	<i>Argia</i>	2	1	0	2	2	7	0,29
Coleoptera								
Gyrinidae	<i>Andogirus</i>	1	0	0	0	0	1	0,04
Ptilodactilidae	<i>Anchytarsus</i>	2	1	7	3	15	28	1,18

Elmidae	<i>Heterelmis</i>	36	3	6	0	20	65	2,73
	<i>Cylloepus</i>	16	10	19	1	0	46	1,94
	<i>Phanocerus</i>	0	0	4	0	1	5	0,21
	<i>Macrelmis</i>	14	2	10	0	5	31	1,30
Psephenidae	<i>Disersus</i>	0	0	0	0	1	1	0,04
	<i>Psephenus</i>	31	18	37	4	47	137	5,76
Gyrinidae	<i>Dineurus</i>	0	0	1	0	0	1	0,04
Curculionidae	<i>Listronotus</i>	0	0	1	0	0	1	0,04
Staphylinidae	<i>Stenus</i>	0	0	1	0	0	1	0,04
Hidraenidae	<i>Hidraena</i>	1	0	0	0	0	1	0,04
Hemiptera								
Naucoridae	<i>Criphocricos</i>	5	0	12	0	3	20	0,84
	<i>Ambrysus</i>	1	1	0	0	0	2	0,08
Diptera								
Simuliidae	<i>Simulium</i>	7	8	1	0	15	31	1,30
Tipulidae	<i>Hexatoma</i>	1	0	1	2	1	5	0,21
Chironomidae	<i>Ablabezmyia</i>	9	1	1	2	4	17	0,72
	<i>Chironomus</i>	5	0	0	0	0	5	0,21
Lepidoptera								
Crambidae	<i>Petrophila</i>	9	13	0	2	11	35	1,47
Neuroptera								
Coridalidae	<i>Corydalus</i>	21	9	3	0	11	44	1,85
No. de individuos		655	423	516	181	602	2377	100,00

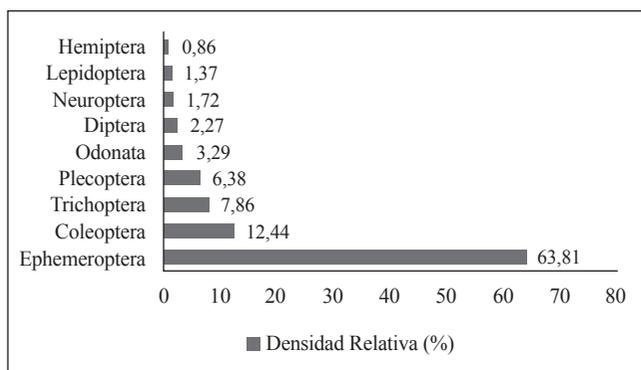


Figura 1. Abundancia relativa de macroinvertebrados acuáticos encontrados en los sistemas estudiados

Byrrhoidea acuáticos (Archangelsky, *et al.*, 2009); los Psephenidae, por su parte, son importantes como indicadores de la calidad del agua y la estabilidad ambiental (Fernández & Domínguez, 2001).

El orden Trichoptera representó el 8,46 % de los insectos recolectados (201 individuos), con nueve géneros y nueve familias de las 13 reportadas para Colombia por Muñoz

(2004), equivalentes al 20 y 69,23 %, respectivamente, lo que constituye un aporte muy significativo al conocimiento de la diversidad regional y nacional de este orden. Hydropsychidae fue la familia más representativa con 115 individuos (57,21 %), lo que coincide con otras investigaciones realizadas en el departamento del Chocó (Bejarano, *et al.*, 2006; Mosquera & Bejarano, 2006), y en el país (Guevara, *et al.*, 2005; Rivera-Usme, *et al.*, 2008; Vásquez-Ramos, *et al.*, 2010; Zúñiga, *et al.*, 2013). Los tricópteros viven en aguas corrientes, limpias y oxigenadas, debajo de piedras, troncos y material vegetal; algunas especies habitan en aguas quietas y remansos de ríos y quebradas y son buenas indicadoras de aguas oligotróficas (Domínguez & Fernández, 2009).

El orden Plecoptera (6,86 %) se encontró en todos los ecosistemas estudiados, con un total de 163 individuos del género *Anacroneuria* (Tabla 2). De acuerdo con Zúñiga (2010), este es el género que exhibe la mayor diversidad, abundancia y distribución en los diferentes departamentos y regiones naturales del país, y en el Chocó, su presencia ha sido reportada en diversos cuerpos de agua de la cuenca del río Atrato por Torres, *et al.*, (2006), Asprilla, *et al.*, (2006), Mosquera, *et al.*, (2006) y Salas, *et al.*, (2011), donde sobresale por su abundancia y sensibilidad a la

contaminación. Estos insectos se encuentran generalmente en aguas con corriente rápida, altos niveles de oxígeno, altos porcentajes de sustratos gruesos en el lecho y presencia de hojarasca (Tamaris-Turizo, *et al.*, 2007; Zúñiga, 2010), y se consideran excelentes bioindicadores de la calidad del agua (Fernández & Domínguez, 2001).

El orden Odonata (3,53 %) estuvo representado por 11 géneros y por nueve de las 14 familias reportadas para el país por Álvarez-Arango, *et al.*, (2006), lo que evidencia la gran diversidad de este grupo en la zona, a pesar de su baja densidad. Al respecto, Zúñiga, *et al.*, (2013), señalan en su estudio de quebradas andinas que la vegetación marginal, los sustratos finos y las corrientes lentas son condiciones que favorecen el desarrollo de este grupo de organismos. Las ninfas habitan en diversos hábitats acuáticos y, como depredadores que son, juegan un papel importante en la dinámica de población de sus presas (Lombardo, 1997; Hammond, *et al.*, 2007), constituyen, así, un eslabón importante en la cadena trófica de agua dulce. La familia más abundante del orden es Platystictidae, con el género *Palaemnema*, que habita quebradas y ríos que corren por bosques, e incluso por áreas con poca vegetación riparia, donde las ninfas se pueden encontrar bajo rocas en el fondo y en lugares de corriente rápida (Ramírez, 2010).

El orden Diptera presentó poca abundancia en las quebradas estudiadas (2,44 %), representado solo por tres familias, entre las que sobresalió Simuliidae como la más abundante (Tabla 2). La poca representatividad que registra este orden contrasta con las investigaciones hechas en el suroccidente colombiano (Chará, *et al.*, 2007, 2009, 2011; Giraldo, *et al.*, 2011) y en quebradas andinas del país (Zuñiga, *et al.*, 2013), en las que es dominante. Esto puede explicarse por el grado de conservación de las quebradas estudiadas, teniendo en cuenta que la abundancia de dípteros se asocia con aguas contaminadas (Abril, *et al.*, 2004). Los simúlidos, por su parte, son propios de aguas oligotróficas, limpias y bien oxigenadas (Rivera, *et al.*, 2008; Domínguez & Fernández, 2009), y su distribución está influenciada por factores hidráulicos, por el tamaño y la forma del sustrato y la disponibilidad de alimento (Adler, *et al.*, 2004).

Los órdenes Neuroptera (1,85 %) y Lepidoptera (1,47 %) fueron los menos abundantes en este estudio y estuvieron representados por las familias Corydalidae y Crambidae, respectivamente. Ambas familias se caracterizan por habitar aguas torrentosas, bien oxigenadas y poco profundas (Roldán, 1996; Roldán, 2003; Domínguez & Fernández, 2009). Su poca abundancia puede ser el resultado de la poca distribución que presentaron en la zona de estudio, pues solo se encontraron en tres de las quebradas estudiadas. En general, Lepidoptera y Neuroptera tienden a ser grupos minoritarios entre los insectos acuáticos según las investigaciones realizadas en otras zonas del país (Arango, *et al.*, 2008; Rivera-Usme, *et al.*, 2008; Walteros-Rodríguez & Paiba-Alzate, 2010; Zuñiga, *et al.*, 2013).

El orden Hemiptera (0,93%) registró una familia, la Naucoridae, con los géneros *Criphocricos* y *Ambrysus*. Los miembros de esta familia habitan principalmente en arroyos y ríos pedregosos, entre las rocas del fondo, y son predadores voraces de otros insectos acuáticos (Mazzucconi, *et al.*, 2009). La poca representatividad de este orden contrasta con otras investigaciones como la de Padilla-Gil (2013), en la que se encontró una amplia distribución de este grupo de insectos en el país. En general, los hemípteros muestran preferencias particulares en relación con el microhábitat, como lo son la presencia mayoritaria de macrófitas en el lecho del cauce y el predominio de corrientes lentas, que se relacionan más con ambientes lénticos que con cuerpos de agua corriente (Álvarez & Roldán, 1983; Mazzucconi, *et al.*, 2009), lo que explica su poca abundancia en la zona, al tratarse de quebradas pequeñas, con poco caudal y muy torrentosas, que son características de la cuenca del río San Juan.

Índices ecológicos

El índice de diversidad de Shannon-Weiner en la cuenca del río San Juan fue alto ($H' = 2,95$) durante todo el estudio, ya que se considera que valores de H' de 2,70 o más corresponden a un alto grado de diversidad (Margalef, 1998). El valor promedio para este índice fue de 2,03 bits/individuo, siendo la quebrada Profundo, P1, la de mayor diversidad (Tabla 3); hubo diferencias significativas entre las quebradas ($p = 0,011$), pero no entre los meses de muestreo ($p = 0,548$). La riqueza total fluctuó entre 3 y 30 taxones, con diferencias significativas entre las quebradas ($p = 0,007$), pero no entre los meses de muestreo ($p = 0,550$). La mayor diversidad y riqueza total observadas en la quebrada Profundo, P1 (Tabla 3), puede atribuirse a la mayor cantidad de hábitats que presentaba dicha quebrada y a la presencia de una mayor cobertura vegetal, factores importantes para la distribución de los macroinvertebrados acuáticos. Al respecto, Cardenas, *et al.*, (2007) sostienen que una buena protección de ribera mejora el hábitat, ya que contribuye a tener una mejor calidad de agua, una mayor integridad del cauce y un mejor hábitat físico, lo que incrementa la diversidad y la riqueza de insectos acuáticos bentónicos en las quebradas (Guerrero-Bolaño, *et al.*, 2003; Chara, *et al.*, 2007).

Tabla 3. Índices ecológicos de las cuatro quebradas estudiadas

Quebradas/índices	Diversidad de Shannon-Wiener	Dominancia de Simpson	Riqueza Total
Profundo P1	3,06	0,92	44
Profundo P2	2,39	0,80	35
Buena Vida	2,31	0,83	31
San Francisco	2,09	0,75	22
Colorado	2,61	0,86	35

El índice de dominancia de Simpson presentó valores relativamente altos en todas las quebradas, con un promedio de 0,77 bits/individuo. La quebrada Profundo, P1, sobresalió con el mayor valor para este índice (Tabla 3). No se observaron diferencias significativas entre los meses de muestreo ($p=0,359$) ni entre las quebradas ($p=0,092$). Los valores altos observados para este índice podrían atribuirse a la gran densidad de algunos géneros como *Thraulodes*, *Farrodes* (Ephemeroptera) y *Anacroneria* (Plecoptera), correspondiente al 45 % de los individuos recolectados, y a su presencia en todas las quebradas estudiadas. Estos géneros presentan un amplio rango de distribución en el Neotrópico (Domínguez, 1999; Domínguez, *et al.*, 2006; Zuñiga, 2010; Zuñiga, *et al.*, 2014) y exhiben una alta sensibilidad a la contaminación y a la degradación del ecosistema acuático (Ribera, *et al.*, 2002), por lo que su abundancia demuestra que los sistemas estudiados presentan un alto grado de conservación.

Las quebradas Profundo y Colorado registraron mayor similitud según el índice de Jaccard (0,65). En las dos había familias que son muy generalistas y que presentan amplios rangos de distribución (Tabla 2); además, ambas presentaban un cauce amplio, vegetación marginal, velocidad de la corriente moderada, una combinación de sustrato pedregoso y arenoso, y gran cantidad de hojarasca, lo cual favorece la presencia de una gran diversidad de insectos acuáticos. De igual manera, sus condiciones fisicoquímicas presentaron similitudes (Tabla 1). La quebrada San Francisco presentó el mayor valor de disimilitud (0,48), posiblemente porque esta se encontraba bastante apartada de las restantes y sus características físicas mostraban marcadas diferencias, como un cauce más angosto y poco profundo, así como una velocidad de corriente más baja.

Con base en los resultados de este estudio preliminar, se puede concluir que las quebradas estudiadas en la cuenca del río San Juan (Chocó) presentan una comunidad de insectos acuáticos muy diversa y compleja, lo que se asocia con sistemas que no han sido alterados, o muy poco, por actividades antropogénicas, y cuya estructura parece estar determinada por la naturaleza del sustrato, la velocidad de la corriente y la cobertura boscosa. Es necesario seguir adelantando estudios en sistemas acuáticos de la zona del San Juan que permitan entender mejor la dinámica ecológica de los insectos acuáticos y sirvan de base para evaluar el estado ecológico de la cuenca, teniendo en cuenta la presión a la que actualmente está sometida como resultado de la minería y la explotación maderera.

Agradecimientos

Las autoras agradecen la financiación de la Universidad Tecnológica del Chocó, así como al programa de Jóvenes Investigadores de Colciencias-2007 y al Laboratorio de Limnología de la Universidad Tecnológica del Chocó, por su apoyo en el desarrollo exitoso del presente trabajo.

Agradecemos, igualmente, a la comunidad del corregimiento de Profundo (Tadó-Chocó), por toda su colaboración durante la fase de campo.

Conflicto de intereses

Las autoras declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Abril, R.G., Posada, J.A., Parra, S.L.N., Velásquez, C.A., Riss, W., Ospina, T.R.** 2004. Los macroinvertebrados acuáticos del páramo de Frontino (Antioquia, Colombia): estudio preliminar. En: Resúmenes XXXI Congreso Sociedad Colombiana de Entomología, SOCOLEN, Bogotá. 75 p.
- Adler, P.H., Currie D.C., Wood, D.M.** 2004. The black flies (Simuliidae) of North America. Cornell University Press, Ithaca, NY. 941 p.
- Alba-Tercedor, J.** 1996. Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. Departamento de Biología Animal y Ecología, Universidad de Granada. IV Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA), Almería, 1996, Vol. II: 203-213.
- Allan, J.D. & Castillo, M.M.** 2007. Stream Ecology. Structure and Function of Running Waters. 2a ed. Springer. Dordrecht, Holanda. 436 p.
- Álvarez, L.F. & Roldán, G.** 1983. Estudio del orden Hemiptera (Heteroptera) en el departamento de Antioquia en diferentes pisos altitudinales. Actualidades Biológicas, **12** (14): 31-46.
- Álvarez-Arango, L.F., Arango-Jaramillo, M.C., Roldán-Pérez, G.** 2006. Diversidad de los macroinvertebrados dulce acuícolas en Colombia. En: Colombia, Diversa por Naturaleza. Informe Nacional sobre el Avance en el Conocimiento y la Información de la Biodiversidad. Tomo II 1998-2004. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Bogotá, D. C. 394 p.
- APHA-AWWA-WPCF.** 1992. Métodos normatizados para el análisis de agua potables y residuales. Traducción del Standard Methods. Díaz de Santos, S. A. (Ed.). Barcelona (España). 385 p.
- Arango, M.C., Álvarez, L.F., Arango, G.A., Torres, O.E., Monsalve, A.** 2008. Calidad del agua de las quebradas La Cristalina y La Risaralda, San Luis, Antioquia. Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia **9**: 121-141.
- Archangelsky, M., Manzo, V., Michat, M., Torres, P.L.M.** 2009. Coleóptera. En: Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología. En: Domínguez, E. & Fernández, H. R. (Eds.). Fundación Miguel Lillo, Tucumán. 411-468 p.
- Arias-Díaz, D., Reinoso-Flórez, G., Guevara-Cardona, G.G., Villa-Navarro, F.A.** 2007. Distribución espacial y temporal de los coleópteros acuáticos en la cuenca del río Coello (Tolima, Colombia). *Caldasia* **29** (1): 177-194.
- Asprilla, S., Ramírez, J.J., Roldán, G.** 1998. Caracterización limnológica preliminar de la ciénaga de Jotaudó (Chocó, Colombia). *Actualidades Biológicas* **20** (69): 87-107.
- Asprilla, S., Mosquera-Murillo, Z., Rivas, M.** 2006. Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad ecológica del agua en la parte media del río Cabí (Quibdó

- Chocó). Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas **18**: 43-50.
- Bedoya, G., Cediell, F., Restrepo-Correa, I., Cuartas, C., Montenegro, G., Marín-Cerón, M.I.** 2009. Aportes al conocimiento de la evolución geológica de las cuencas Atrato y San Juan dentro del arco Panamá-Chocó. Boletín de Geología **31** (2): 61-81.
- Bejarano, D., Palacios, E.D., Mosquera-Murillo, Z.** 2006. Evaluación de la calidad del agua por medio de la comunidad de trichópteros (Insecta) durante los periodos de aguas altas y bajas en la quebrada La Francisca, Quibdó - Chocó - Colombia. Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó **25**: 59 - 64.
- Cárdenas, A.Y., Bismark, R., López, M., Woo, A., Ramírez, E., Ibrahim, M.** 2007. Biodiversidad de macroinvertebrados acuáticos y la calidad del agua en la subcuenca de los ríos Bul Bul y Paiwas, Matiguás, Nicaragua. Encuentro **77**: 83-93.
- Casas, L., Córdoba, K.E., Asprilla, S., Mosquera-Murillo, Z.** 2006. Composición y distribución del orden Ephemeroptera en los ríos Tutunendó y Catugadó, Quibdó-Chocó (Colombia). Libro de la Asociación Colombiana de Limnología **1**: 92-97.
- Caupaz-Flórez, F., Reinoso, G., Guevara, G., Villa, F.A.** 2006. Diversidad y distribución de la familia Elmidae (Insecta: Coleoptera) en la cuenca del río Prado (Tolima, Colombia). Asociación Colombiana de Limnología -Neolimnos **1**: 106-116.
- Chará, J., Pedraza, G., Giraldo, L., Hincapié, D.** 2007. Efecto de los corredores ribereños sobre el estado de quebradas en la zona ganadera del río La Vieja, Colombia. Agroforestería en las Américas **45**: 72-78.
- Chará-Serna, A.M., Zúñiga, M. del C., Chará, J.** 2009. Diversidad de Chironomidae (Insecta: Diptera) asociados a hojarasca en quebradas de la cuenca del río Otún (Risaralda, Colombia). En: Resúmenes del XXXVI Congreso de la Sociedad Colombiana de Entomología. Medellín.
- Chará, J., Giraldo, L.P., Zúñiga, M. del C., Chará-Serna, A.M., Pedraza, G.X.** 2011. Cambios en el ambiente acuático asociados a la restauración del corredor ribereño en una quebrada afectada por ganadería en la cuenca del río La Vieja, Colombia. (564-572 p). En: O. Vargas-Ríos & S.P. Reyes (Eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiana de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Santafé de Bogotá.
- Córdoba, K.E., Casas, L., Mosquera-Murillo, Z., Asprilla, S.** 2007. Composición y variación temporal del orden Ephemeroptera (Insecta) en los ríos Tutunendó y Catugadó, Quibdó (Chocó - Colombia). Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas **19**: 34-41.
- Domínguez, E.** 1999. Systematic cladistic and biogeography of the American genus *Farrodes* (Ephemeroptera, Leptophlebiidae, Atalophlebiinae). Zoological Journal of the Linnean Society of London **126**: 155-189.
- Domínguez, E., Molineri, C., Pescador, M.I., Hubbard, M.D., Nieto, C.** 2006. Ephemeroptera of South América. In: Aquatic Biodiversity en Latin América (ABLA). Adis, J., Arias, J. R., Rueda-Delgado, G. & Wantzen, K. M. (Eds). Vol. 2. Pensoft, Sofia-Moscow.
- Domínguez, E. & Fernández, H.R.** 2009 (Eds). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología. Primera Edición. Fundación Miguel Lillo. San Miguel de Tucumán, Argentina. 656 p.
- Esteves, F. A.** 1988. Fundamentos de Limnología. Editorial Interciencias. FINEP. Río de Janeiro, Brasil. 574 p.
- Fernández, H. & Domínguez, E.** 2001. Guía para la determinación de los artrópodos bentónicos sudamericanos. Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Naturales - Instituto Miguel Lillo. 282 p.
- Flowers R. W. & De La Rosa, C.** 2010. *Ephemeroptera*. En: Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica I. Springer, M., Ramírez, A. & Hanson, P. (Eds). Rev. Biol. Trop. **58** (Suppl. 4): 63-93.
- Forero-Céspedes, A.M. & Reinoso-Flórez, G.** 2013. Estudio de la familia Baetidae (Ephemeroptera: Insecta) en una cuenca con influencia de la urbanización y agricultura: río Alvarado- Tolima. Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas **25**: 12-21.
- Forero-Céspedes, A. M., Gutiérrez, C., Reinoso-Flórez, G.** 2014 nuevos registros de Baetidae (Ephemeroptera: Insecta) para Colombia y el departamento del Tolima. Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas **26**: 59-67.
- Giraldo, L.P., Chará, J., Zúñiga, M. del C., Pedraza, G.X., Chará-Serna, A.M.** 2011. Efectos de los corredores ribereños sobre características bióticas y abióticas de quebradas ganaderas en la cuenca del río La Vieja, Colombia. (pp. 583-591). En: O. Vargas-Ríos & S.P. Reyes (Eds.). La restauración ecológica en la práctica: Memorias I Congreso Colombiana de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. Santafé de Bogotá.
- Guerrero-Bolaño, F., Manjarrez-Hernández, A., Núñez-Padilla, N.** 2003. Los macroinvertebrados bentónicos de Pozo Azul (cuenca del Río Gaira, Colombia) y su relación con la calidad del agua. Acta Biológica Colombiana **8** (2): 43 - 55.
- Guevara, G.** 2004. Análisis faunístico del orden Trichoptera en su estado larval en la cuenca del río Coello departamento del Tolima. Trabajo de grado (MSc.). Universidad del Tolima, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Ibagué.
- Guevara-Cardona, G., Reinoso-Flórez, G., Villa-Navarro, F.** 2005. Estudio del orden Trichoptera en su estado larval en la cuenca del río Coello, departamento del Tolima. Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas **17**: 59-70.
- Guevara, G., Reinoso, G., Villa, F.** 2007. Caddisfly larvae (Insecta: Trichoptera) of the Coello River Basin in Tolima (Colombia): Spatial and temporal patterns and bioecological aspects. Págs. 8-12 en: J. Bueno-Soria, R. Barba-Álvarez and B. Armitage (Eds), Proceedings of the XIIth International Symposium on Trichoptera. The Caddis Press. Columbus, Ohio.
- Hammer, O. Dat Harper, D.A.T., Ryan, P.D.** 2001. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. Palaeontologia Electronica 4. Disponible en: http://palaeoelectronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.

- Hammond, J.I., Luttbeg, B., Sih, A.** 2007. Predator and prey space use: Dragonflies and tadpoles in an interactive game. *Ecology* **88**: 1525-1535.
- Hanson, P., Springer, M., Ramírez, A.** 2010. Introducción a los grupos de macroinvertebrados acuáticos. En: Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica I. Springer, M., Ramírez, A. & Hanson, P. (Eds). *Rev. Biol. Trop.* **58** (Suppl. 4): 3-37.
- Hawkins, C.P., Murphy, M.M., Anderson, N.H.** 1982. Effects of canopy, substrate composition, and gradient on the structure of macroinvertebrate communities in Cascade Range streams of Oregon. *Ecology* **63**: 1840-1856.
- Holdridge, R.L.** 1996. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José de Costa Rica.
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico - IIAP.** 2013. Proyecto Plan estratégico de la macro cuenca del Pacífico Colombiano. Quibdó-Chocó. Informe Final. 487 p.
- Latorre, I., Montaña, M., Rincón, M.** 2006. Comunidad de insectos acuáticos del río Dulce (Villeta, Cundinamarca). *Rev UDCA. Actual. Divulg. Cient* **9** (1): 151-161.
- Lombardo, P.** 1997. Predation by *Enallagma* nymphs (Odonata, Zygoptera) under different conditions of spatial heterogeneity. *Hydrobiologia* **356**: 1-9.
- Machado, T. & Roldán, G.** 1981. Estudio de las características fisicoquímicas y biológicas del río Anori y sus principales afluentes. *Rev. Actual. Biol.* **10** (35): 3-19.
- Malmqvist, B., Adler, P.H., Kuusela, K., Merritt, R.W., Wootton, R.S.** 2004. Black flies in the boreal biome, key organisms in both terrestrial and aquatic environments: A review. *Ecoscience* **11**: 187-200.
- Margalef, R.** 1998. Ecología. Novena edición. Ediciones Omega. Barcelona, España. 951 p.
- Mazzucconi, S.A., López R.M., Bachmann, A.O.** 2009. Hemiptera- Heteroptera: Gerromorpha y Nepomorpha. En: Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y Biología. Domínguez, E. & Fernández, H. R. (Eds). Primera edición. Fundación Miguel Lillo. San Miguel de Tucumán, Argentina. 168-231 p.
- Merritt, R.W. & Cummins, K.W.** 1996. An introduction to the aquatic insects of North America. Third edition. Dubuque: Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa. 862 p.
- Molano, F. & Camacho, D.L.** 2005. Especies de Gerridae (Heteroptera: Gerromorpha) del departamento del Quindío. En: Riqueza Biótica Quindiana. Armenia, Quindío. Agudelo, C. (Ed). Ed. OPTIGRAF. (Colombia). 370-376 p.
- Mosquera, S., Zúñiga, M. del C., Guevara, G.** 2002. Diversidad y distribución de coleópteros acuáticos y semiacuáticos con énfasis en la familia Elmidae en el suroccidente colombiano. En: Resúmenes V Seminario Colombiano de Limnología y I Reunión Internacional de Limnología del alto Amazonas. Leticia, Colombia.
- Mosquera, Z. & Bejarano, D.** 2006. Estudio del orden Trichoptera (Insecta) en dos ecosistemas lóticos del municipio de Quibdó, Chocó-Colombia. Pág. 14 en: F. Villa, C. Rivera, G. Reinoso & M. Núñez (Eds), Resúmenes del VII Seminario Colombiano de Limnología y I Reunión Internacional sobre Ríos y Humedales Neotropicales. Asociación Colombiana de Limnología, Ibagué.
- Mosquera, Z., Bejarano, D., Asprilla, S.** 2006. Estudio del orden Trichoptera (Insecta) en dos ecosistemas lóticos del municipio de Quibdó, Chocó - Colombia. Libro de la Asociación Colombiana de Limnología **1**: 85-91.
- Muñoz, F.** 2004. El orden Trichoptera (Insecta) en Colombia: II inmaduros y adultos, consideraciones generales. En: Fernández, F., Andrade, M. G. & Amat, G. (Eds.). Insectos de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. Santafé de Bogotá, Colombia **3**: 319-349.
- Ocón, C.S. & Rodríguez, A.** 2004. Presence and abundance of Ephemeroptera and other sensitive macroinvertebrates in relation with habitat conditions in pampean streams (Buenos Aires, Argentina). *Arch. Hydrobiol* **159**: 473-487.
- Ometo, J.P., Matinelli, L.A., Ballester, M.B., Gessner, A., Krusche, A.V., Victoria, R.L., Williams, M.** 2000. Effects of land use water chemistry and macroinvertebrate in two streams of the Piracicaba river basin, south-east Brazil. *Freshwater Biol* **44**: 327-337.
- Padilla-Gil, D.N. & Arcos, O.** 2011. Hemiptera acuáticos asociados a los estuarios de la Costa Pacífica Colombiana. *Revista Colombiana de Entomología* **37** (1): 350-353.
- Parra-Trujillo Y.T., Padilla Gil, D.N., Reinoso-Flórez, G.** 2014. Diversidad y distribución de *Rhagovelia* (Hemiptera, Veliidae) del departamento del Tolima. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* **26**: 82-88.
- Posada, G.J. & Roldán, G.** 2003. Clave ilustrada y diversidad de las larvas de *Trichoptera* en el noroccidente de Colombia. *Caldasia* **25** (1): 169-192.
- Ramírez, A.** 2010. Odonata. En: Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica. Springer, M., Ramírez, A. & Hanson, P. (Eds.) *Revista Biología Tropical* **58** (Supl 4): 97-136.
- Reinoso, G., Villa, F., Esquivel, H., García, J., Vejarano, M.** 2007. Biodiversidad faunística y florística de la cuenca del río Totaré - Biodiversidad regional fase III. Informe final. Universidad del Tolima. Ibagué.
- Reinoso, G., Guevara, G., Vejarano, M., García, J., Villa, F.** 2008. Áreas de interés para la conservación en la cuenca del río Prado (Tolima, Colombia): macroinvertebrados y calidad de agua como factores clave. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* **20**: 102-116.
- Ribera, I., Hogan, J.E., Vogler, A.P.** 2002. Phylogeny of hydrophilid water beetles inferred from 18S rRNA sequences. *Molecular Phylogenetics and Evolution* **23**: 43-62.
- Richoux, P.** 1994. Theoretical habitat templates, species traits, and species richness: Aquatic Coleoptera in the Upper Rhone River and its floodplain. *Freshwater Biology* **31**: 377-395.
- Rivas, M., Mosquera, Z., Asprilla, S.** 2003. Calidad ecológica de las aguas de la parte media del río Cabí (Quibdó-Chocó) utilizando los macroinvertebrados como indicadores. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó* **19**: 59-63.

- Rivera-Usme, J.J., Camacho-Pinzón, D.L., Botero-Botero, A.** 2008. Estructura numérica de la entomofauna acuática en ocho quebradas del departamento del Quindío-Colombia. *Acta biol. Colomb.* **13** (2): 133 – 146.
- Rojas, M.R., Molano, F., Morales, I.T.** 2006. Contribución al conocimiento de los chinches semiacuáticos (Hemiptera: Gerridae) en ambientes lóticos y lénticos del departamento de Risaralda. *Revista Investigaciones Universidad del Quindío* **16**: 37-47.
- Roldán, G.A.** 1992. Fundamentos de limnología neotropical. Medellín (Antioquia): Universidad de Antioquia. 592 p.
- Roldán, G.A.** 1996. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. FEN-Colombia, COLCIENCIAS-Universidad de Antioquia, Medellín. 234 p.
- Roldán, G.A.** 2003. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: uso del método BMWP/Col. Editorial Universidad de Antioquia. Primera edición. 170 p.
- Romero, B.I., Pérez, S.M., Rincón, M.H.** 2006. Ephemeroptera del Parque Nacional Natural “Cueva de los Guácharos”, Huila, Colombia. *Rev UDCA Actual. Divulg. Cient.* **9** (1): 141-149.
- Rosenberg, D.M. & Resh, V.H.** 1993a. Introduction to freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates, p. 1-9. En: D.M. Rosenberg, V.H. Resh (Eds.). *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. Chapman & Hall, Nueva York, EEUU.
- Rosenberg, D.M. & Resh, V.** 1993b. Rapid assessment approaches to biomonitoring using benthic macroinvertebrates, p. 195-233. En: V. Resh, H.K. Jackson (Eds.). *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. Chapman & Hall, Londres, Inglaterra.
- Salas, Y., Geovo, S., Asprilla, S.** 2011. Caracterización de las comunidades perifíticas y de macroinvertebrados acuáticos presentes en el río Pacurita, corregimiento de Pacurita, Quibdó-Chocó-Colombia. *Revista Biodiversidad Neotropical* **2**: 98-104.
- Shieh, S.H. & Yang, P.S.** 2000. Community structure and functional organization of aquatic insects in an agricultural mountain stream of Taiwan: 1985-1986 and 1995-1996. *Zool. Stud.* **39**: 191-202.
- Springer, M., Ramírez, A., Hanson, P.** 2010. Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica I. *Rev. Biol. Trop.* **58** (Suppl. 4): 97-136.
- Tamaris-Turizo, C., Turizo-Correa, R., Zúñiga, M.C.** 2007. Distribución espacio-temporal y hábitos alimentarios de ninfas de *Anacroneria* (Insecta: Plecoptera: Perlidae) en el río Gaira (Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia). *Caldasia* **29** (2): 375-385.
- Torres, Y., Roldan, G., Asprilla, S., Rivas, T.** 2006. Estudio preliminar de algunos aspectos ambientales y ecológicos de las comunidades de peces y macroinvertebrados acuáticos en el río Tutunendó, Chocó-Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **30** (114): 67-76.
- Vásquez-Ramos, J.M., Ramírez-Díaz, F., Reinoso-Flórez, G.** 2010. Distribución espacial y temporal de los tricópteros inmaduros en la cuenca del río Totaré (Tolima-Colombia). *Caldasia* **32** (1): 129-148.
- Vásquez-Ramos, J.M. & Reinoso, G.** 2012. Estructura de la fauna béntica en corrientes de los Andes colombianos. *Revista Colombiana de Entomología* **38** (2): 351-358.
- Vásquez-Ramos, J.M., Guevara-Cardona, G., Reinoso-Flórez, G.** 2014. Factores ambientales asociados con la preferencia de hábitat de larvas de tricópteros en cuencas con bosque seco tropical (Tolima, Colombia). *Revista de Biología Tropical* **62** (2): 21-40.
- Wallace, I.B. & Webster, J.R.** 1996. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* **17**: 567-594.
- Walteros-Rodríguez, J.M. & Paiba-Alzate, J.E.** 2010. Estudio preliminar de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en la reserva forestal torre cuatro. *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat* **14** (1): 137 - 149.
- Wotton, R.S. & Malmqvist, B.** 2001. Feces in aquatic ecosystems. *Bioscience* **51**: 537-544.
- Zamora, G.H.** 2002. Análisis biogeográfico de los macroinvertebrados acuáticos epicontinentales en el departamento del Cauca, Colombia. *Rev Asoc Col Cienc.* **14** (1): 37-51.
- Zúñiga, M.C., Molineri, C., Domínguez, E.** 2004. Orden Ephemeroptera (Insecta) de Colombia En: *Insectos de Colombia*. Fernández, F., Andrade, M. G. & Amat, G. (Eds.). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. Santafé de Bogotá, Colombia. **3**: 17- 42.
- Zúñiga, M.C.** 2010. Diversidad, distribución y ecología del orden Plecoptera (Insecta) en Colombia, con énfasis en *Anacroneria* (Perlidae). *Momentos de Ciencia* **7**: 101-112.
- Zúñiga, M. del C., Chará, J.C., Giraldo, L.P., Chará-Serna, A.M., Pedraza, G.X.** 2013. Composición de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en pequeñas quebradas de la región andina colombiana, con énfasis en la entomofauna. *Dugesiana* **20** (2): 263-277.
- Zúñiga M.C., Cardona, W., Molineri, C., Mendivil, J., Cultid, C., Chará, A.M. & Giraldo, A.** 2014. Entomofauna Acuática del Parque Nacional Natural Gorgona, Pacífico colombiano, con énfasis en Ephemeroptera y Plecoptera. *Rev. Biol. Trop.* **62** (Suppl. 1): 221-241.

Comportamiento diario y estacional de las estructuras óptica y térmica en un embalse tropical colombiano

John J. Ramírez R.

Grupo de Limnología Básica y Experimental y Biología y Taxonomía Marina,
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Colombia

Resumen

Esta investigación se preguntó sobre la variación temporal en las escalas diaria y estacional (anual) de las estructuras óptica y térmica en la presa del embalse de La Fe. Se preveía que la estructura óptica tendría poca variación tanto en la escala diaria como en la anual. En cuanto a la estructura térmica, la hipótesis era que tendría una mayor variación en la escala diaria que en la estacional. Con el propósito de corroborar estas presunciones, se realizaron diez muestreos nictémeros en la columna de agua de la presa a intervalos de cuatro horas durante diez meses (diciembre de 2002 a noviembre de 2003). Las variables evaluadas fueron: temperatura del aire y del agua, velocidad y dirección del viento, profundidad Secchi, profundidad de mezcla, color aparente y turbidez, al igual que los perfiles de temperatura, luz, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, CO₂ total y pH. La forma óptica presentó diferencias levemente significativas en la escala diaria y no significativas en la estacional. Por razones como la intensidad del color, el cinturón litoral de *Egeria densa*, las floraciones de algas, los aportes alóctonos y el patrón atelomíctico del sistema, dicha forma puede ajustarse al tipo GA. Dado que el viento no incidió lo suficiente para desestabilizar la columna de agua, esta se mantuvo estratificada a lo largo del tiempo de muestreo, mezclándose solo en los primeros metros como se espera en un embalse atelomíctico en el que la mezcla se debe principalmente a fuerzas convectivas. En consecuencia, la temperatura del fondo varió muy poco, el perfil de pH tendió a disminuir, y la conductividad eléctrica y el CO₂ total, a aumentar.

Palabras clave: represa tropical, estructuras y óptica térmica, dinámica diaria y estacional.

Daily and seasonal behavior of optical and thermal structures in a Colombian tropical reservoir (La Fe reservoir)

Abstract

The objective of this research was to find out about the temporal variation of optical and thermal structures in La Fe dam both in daily and seasonal scales. Our hypothesis on the optical structure was that there would be little variation in both time scales. As for the thermal structure, we predicted that it would vary more on a daily basis than in the seasonal scale. In order to corroborate these assumptions, we took ten nictemeral samples in the water column of the dam at four hour intervals during 10 months (December 2002 to November 2003). We evaluated the following variables: air and water temperature, wind direction and speed, Secchi depth, mixing depth, apparent color and turbidity, and profiles of electrical conductivity, dissolved oxygen, total CO₂ and pH. The optical shape presented slightly significant differences on the daily scale and non-significant differences in the seasonal scale. Given its intense color, littoral belt of *Egeria densa*, algal blooms, allochthonous inputs, and the atelomictic pattern of the system, its shape may be considered as being a GA type. As the wind didn't work long enough to destabilize the water column, it remained stratified all along the sampling period and mixture was present only in the first few meters as can be expected in an atelomictic reservoir in which the mixture is mainly due to convective forces. Consequently, bottom temperature varied very little, the pH profile tended to decrease, and the electrical conductivity and total CO₂ to increase.

Key words: Tropical dam, optical and thermal structures, diurnal and seasonal dynamics.

Introducción

Los ritmos diarios o nictémeros se asocian a ritmos endógenos de respuesta que no sólo se relacionan con conductas periódicas vitales, sino también con el efecto de la oscilación en la mayoría de los factores externos como luz, la radiación y la temperatura, en el ciclo día-noche (Margalef, 1974). La duración del día y de la noche es función de la latitud y del

momento del año. En las zonas templadas dicha variación es alta, en las ecuatoriales (0 a 10° de latitud norte y sur) y en las tropicales (10 a 23° de latitud norte y sur) existe

Correspondencia:

John Jairo Ramírez R., johnra77@gmail.com

Recibido: 27 de noviembre de 2014

Aceptado: 15 de marzo de 2015

una mayor constancia en la duración del día y la noche y, puesto que la longitud del día varía muy poco (22 minutos entre el día más largo y el más corto del año y 2,4 °C entre el día más cálido y el más frío en el valle del río Magdalena), no es común referirse a fotoperiodo. Sin embargo, diversos estudios comparativos entre la variación diaria y la mensual han llevado a concluir que en las zonas de latitudes bajas la variación nictémera en estas escalas es muy superior a la que se observa en la escala anual, considerándose por ello que los ecosistemas lacustres en estas zonas están dominados por un ciclo de 24 horas más que por uno estacional (**Ganf & Horne, 1975**).

Como sistema termodinámico abierto, un lago natural o artificial posee entre otros atributos los siguientes: 1) una forma óptica originada en el flujo neto de cuantos producto del balance entre el ingreso de energía electromagnética sin transporte de materia y las pérdidas en dicho balance ocasionadas por la reflexión, la refracción, la absorción, la dispersión y la extinción, y 2) una forma térmica causada por el balance entre las fuerzas viscosas estabilizadoras originadas en los flujos de calor (mediante los afluentes y la radiación solar) y su pérdida (a través de los efluentes, la convección y la mezcla). En este tipo de sistemas la estabilidad se alcanza cuando las tasas de cambio entre componentes y la velocidad a la que mudan se retardan para hacer frente a cualquier intento externo de modificación de las estructuras o formas logradas. Uno de los mecanismos utilizados para conservar esta condición y evitar la inestabilidad es la tendencia a realzar las fronteras con el fin de disipar los efectos de la entropía del entorno (**Margalef, 1980; 1993**). Una de estas vías es el ‘acomodo’ estructural, tanto óptico como térmico, que se produce frente a las variaciones diarias en la entrada de energía electromagnética. Esta adecuación estructural es equivalente a la incorporación de orden, neguentropía o entropía negativa, representado por la presencia de zonas o límites determinados, como el límite de la zona fótica y la termoclina. La presencia de estos límites, surgidos en el seno mismo del sistema, permite que se mantenga estable y a un nivel bajo de desorden (poca entropía), incorporando continuamente orden desde su medio (alrededores), es decir que, al igual que cualquier objeto material, presentará una estructura mudable, una ‘forma’, que le agregará propiedades particulares y concretas (**Margalef, 1993**).

Las investigaciones sobre variación diaria y estacional de la estructura térmica en sistemas lacustres embalsados de Colombia son relativamente pocas (**Villegas, 2004; Vergara, 2005; Fernández, 2006; Ramos, 2007; Marín, 2008; Román, 2011; Franco-Velásquez, 2011; Román, et al., 2013**, entre otros pocos). Otras publicaciones, la mayoría de ellas basadas en investigaciones ecológicas y biológicas tradicionales, son, entre otras muchas, las de **Ramírez & Díaz (1995a 1995b)**, **Urrego & Ramírez (2000)**, **Ríos (2005)**, **Montoya-Moreno (2008)** y **Montoya-Moreno & Aguirre (2009)**. Ocurre otro tanto con la

variación a escalas diaria y anual de la estructura óptica. El estudio de la conducta de este tipo de estructura en los medios acuáticos es objeto de la óptica hidrológica. Según **Kirk (2011)**, si se quiere establecer la conducta óptica de un sistema acuático, es necesario medir el grado en que el agua absorbe y dispersa. Los procesos de absorción y dispersión de la luz a cualquier longitud de onda se especifican en términos de las propiedades ópticas inherentes (coeficientes de absorción y dispersión); la suma de los dos constituye la atenuación de la luz en el agua, expresada a través del coeficiente de atenuación vertical para irradiancia descendente ($K_d(\text{PAR})$, según **Kirk, 2011**), que es una expresión cuantitativa de la disminución de una cantidad radiométrica específica con la profundidad.

Así, en esta investigación se buscó responder a la siguiente pregunta: ¿cómo se da la variación temporal diaria y anual de las estructuras óptica y térmica en la columna de agua de la presa del embalse La Fe? Para la estructura óptica se previó que debido a la morfometría del sistema, a los tiempos de retención relativamente altos, al cinturón de macrófitas que en buena parte retiene los sedimentos que ingresan por los afluentes, al poco sombreado de las algas en razón del tamaño relativamente grande de los organismos fitoplanctónicos dominantes, a las condiciones edáficas de la zona donde se ubica el cuerpo de agua, y al tratamiento previo al que son sometidas las aguas del municipio de El Retiro, la estructura óptica es poco variable tanto en la escala diaria como en la anual. Respecto a la estructura térmica se planteó la hipótesis de que si en la zona tropical las variaciones diarias de temperatura son mucho más pronunciadas que las anuales, entonces las estructuras térmicas varían más en esa escala que en la estacional.

Métodos

Descripción del área

El embalse de La Fe (Figura 1) fue llenado en 1973 y está a cargo de las Empresas Públicas de Medellín. Sus características principales se presentan en la tabla 1. Es el resultado de dos fases de construcción: la primera, formada por una pequeña presa de gravedad finalizada en 1967, se denominó “proyecto embalse ‘Los Salados’”; la segunda, producto de una ampliación en 1974, dio origen al actual embalse de La Fe. La antigua presa divide horizontalmente el sistema en dos cuencos: norte y sur. En el cuenco norte (área: 0,68 km², D_m : 7,0 m, $D_{máx}$: 18,2 m), se encuentran la torre de captación y el vertedero y en él tributan los principales afluentes naturales (Palmas y Espíritu Santo); es un sitio de poca profundidad debido a la alta deposición de sedimentos provenientes de los afluentes, a la barrera que genera la antigua presa de Los Salados y a la aducción de la captación que reduce el transporte de sedimentos de los afluentes (**Román, 2011; Román, et al., 2013**). En su nacimiento, la microcuenca de Las Palmas tiene cultivos de papa y pastos destinados al ganado lechero, en los cuales

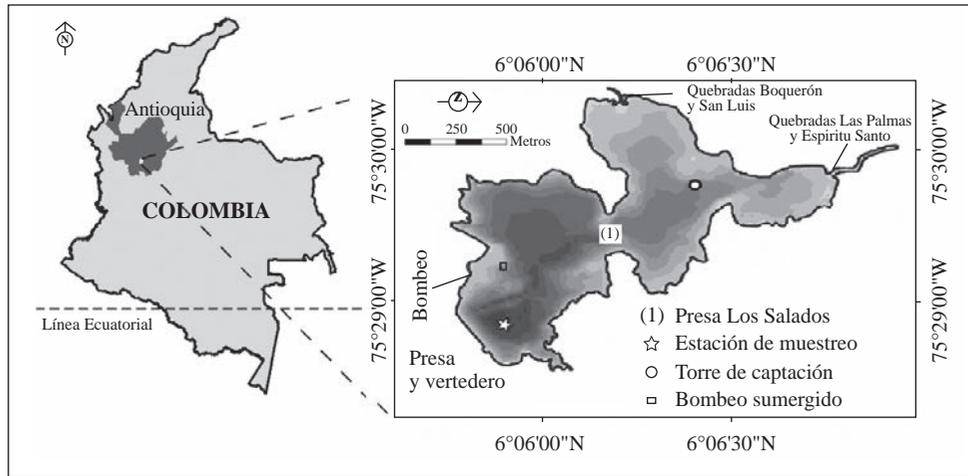


Figura 1. Embalse de La Fe. Mapa orientado de la represa con la ubicación de la estación de muestreo (modificado de Román, 2011)

Tabla 1. Valores de los principales parámetros morfométricos del embalse de La Fe (Hernani & Ramírez, 2002)

Característica	Valor
Altitud (cota máxima)	2155,0 m
Localización	75° 30' 15" O y 06° 06' 50" N
Caudal medio extraído	8,0 m ³ /s
Tiempo de retención	18,0-29,0 días
Área superficial	143,0 a 173,0 km ²
Volumen	14,0 a 15,0 mm ³
Perímetro	8,0 km
Profundidad media	9,9 m
Profundidad máxima	27,0 m
Índice de desarrollo de la línea costera (F)	2,2
Índice de desarrollo de volumen (D _v)	1,1
Profundidad relativa (D _r)	2,1 %

se aplican fertilizantes y plaguicidas; se presenta, además, contaminación por aguas residuales provenientes de las viviendas y zonas de comercio localizadas a corta distancia de las fuentes de agua, las cuales no se someten a tratamiento pues se carece de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Alrededor de la quebrada Espíritu Santo predominan los potreros y las fincas de recreo.

En el cuenco sur (área: 0,65 km², D_m: 14,7 m, D_{máx}: = 27,0 m), se ubica la presa del embalse que recibe las aguas del bombeo del río Pantanillo ((3000 l/s) las cuales son tratadas previamente mediante un sistema de lodos activados en la planta de tratamiento localizada en el municipio de El Retiro. El embalse se utiliza primordialmente como acueducto, pero una de sus secciones está destinada a la recreación (Parque Los Salados), y ocasionalmente se utiliza para la generación hidroeléctrica (Román, 2011; Roman, et al., 2013).

Muestras

Se realizaron 10 muestreos nictémeros (diciembre de 2002 a noviembre de 2003) en la presa del embalse a intervalos de cuatro horas, comenzando siempre a las 6h00 y terminando a la misma hora del día siguiente.

La temperatura del aire se midió con un termómetro de mercurio (escala Celsius). La velocidad del viento (m/s) se cuantificó con un anemómetro y su dirección con una veleta de tela, una brújula y una rosa de los vientos. Los datos de dirección se convirtieron a grados sexagesimales.

Para evaluar la estructura óptica se consideró el coeficiente de atenuación vertical para irradiancia descendente (K_d(PAR), en m⁻¹), entendido como la tasa de pérdida de luz con la profundidad, el cual se obtuvo a partir de los perfiles de luz, los cambios de la transparencia, la profundidad de la zona fótica, el color aparente y la turbidez. Los perfiles de luz (μE/cm²/s) se midieron cada 50 cm con un cuantómetro Licor provisto de un sensor esférico. La transparencia se midió con un disco de Secchi de 0,20 cm de diámetro y bandas blancas y negras alternadas. A partir de dicha medición se multiplicó por 3,0 para estimar la profundidad de la zona fótica. El color aparente se evaluó con un medidor Hach, y la turbidez (NTU) con un turbidímetro de la misma marca.

El perfil térmico se estableció con un termistor YSI cada 50 cm hasta los 10 m y de allí en adelante cada metro hasta el fondo de la columna de agua. En las mismas profundidades y usando el mismo equipo, se midió la concentración de oxígeno disuelto.

Se seleccionaron los siguientes criterios de evaluación de la estructura o forma térmica: 1) la tasa de cambio de la estructura térmica con la profundidad (TD_{temp} en °C/m), y 2) la tasa de cambio de la resistencia térmica relativa (RTR) a la mezcla (TD_{RTR} en m⁻¹). La primera se resumió usando la pendiente de la curva obtenida mediante un análisis de regresión lineal simple [T° = f(profundidad)]. Para obtener

la segunda, se utilizó la diferencia entre la RTR del fondo y la de la superficie dividida por la respectiva diferencia de profundidad (**Padisák, et al.**, 2003). Los valores de la RTR se obtuvieron con el método sugerido por **Hutchinson** (1957) y **Cole** (1983). Al igual que la temperatura, la tasa de pérdida de oxígeno disuelto (TDO_2 en $mgO_2/l/m$) se cuantificó mediante una regresión lineal simple $\{[O_2] = f(\text{profundidad})\}$.

Las variables correlativas que permitieron evaluar la estabilidad de la forma térmica fueron la conductividad eléctrica (conductímetro WTW), el CO_2 total (**McKereth, et al.**, 1978) y el pH (medidor de WTW). Los perfiles de estas variables se establecieron extrayendo muestras de agua de siete profundidades en la columna de agua con una botella Schindler ($V = 5$ l). Dado que la profundidad de la columna de agua varía de acuerdo a la operación del embalse, dichas profundidades no fueron fijas.

Para estimar el intercambio calórico entre el aire y el agua (convección), se usó la diferencia entre la temperatura del aire, T_a , y la temperatura del agua en la superficie, T_s ; dicha diferencia toma valores positivos si $T_a > T_s$; de cero cuando $T_a = T_s$, o negativos cuando $T_a < T_s$. Si el valor negativo es considerable, se generan corrientes convectivas que pueden erosionar la termoclina.

La profundidad de la capa mezclada se definió según la propuesta de **Lewis** (1987) como aquella porción del perfil térmico que presenta una temperatura uniforme cerca de la salida del sol, antes de la incorporación diaria de calor.

La profundidad relativa (D_r) se calculó según lo propuesto por **Hutchinson** (1957) y **Cole** (1983).

En la figura 2 se presentan algunos ejemplos de los perfiles ópticos. Las figuras de los perfiles de los ciclos diarios de temperatura (Figura 3) tienen una línea punteada cuyo objetivo es mostrar el grado de inclinación del metalimnio a lo largo del tiempo de muestreo.

Tratamiento estadístico

Para el análisis descriptivo se usó la media aritmética como medida de tendencia central. Para evaluar la dispersión absoluta y la relativa se utilizaron la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (CV). Las isotermas se elaboraron usando el programa Surfer, versión 7.0.

Con la finalidad de develar si existían diferencias significativas en las escalas diaria y estacional (meses y horas) para los valores de las pendientes obtenidas para K_d , TD_{temp} y TD_{RTR} , los datos se sometieron a un análisis de varianza (Anova) de dos vías con el paquete Statgraphics, versión 3.0. Antes del Anova, se examinaron los supuestos requeridos para dicho análisis (normalidad, aleatoriedad y homocedasticidad).

Resultados

La temperatura de la superficie del agua presentó una leve variación entre muestreos (media = $20,8$ °C, $V_{min} = 18,7$ °C, $V_{max} = 24,2$ °C, CV = 5,5 %, n = 70). Esta variable no mostró

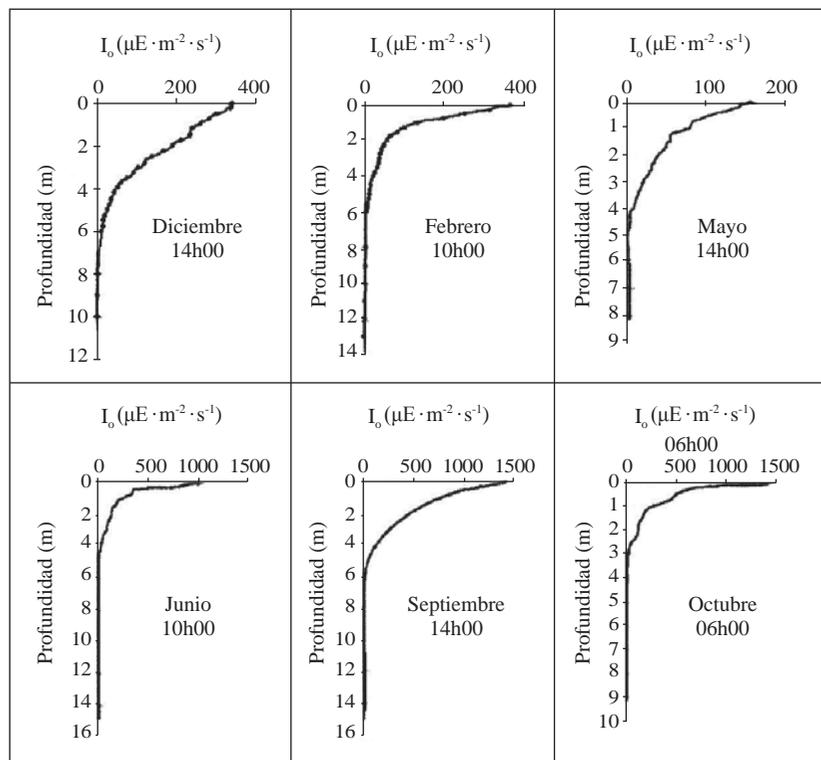


Figura 2. Embalse de La Fe. Ejemplos del comportamiento típico de los perfiles ópticos

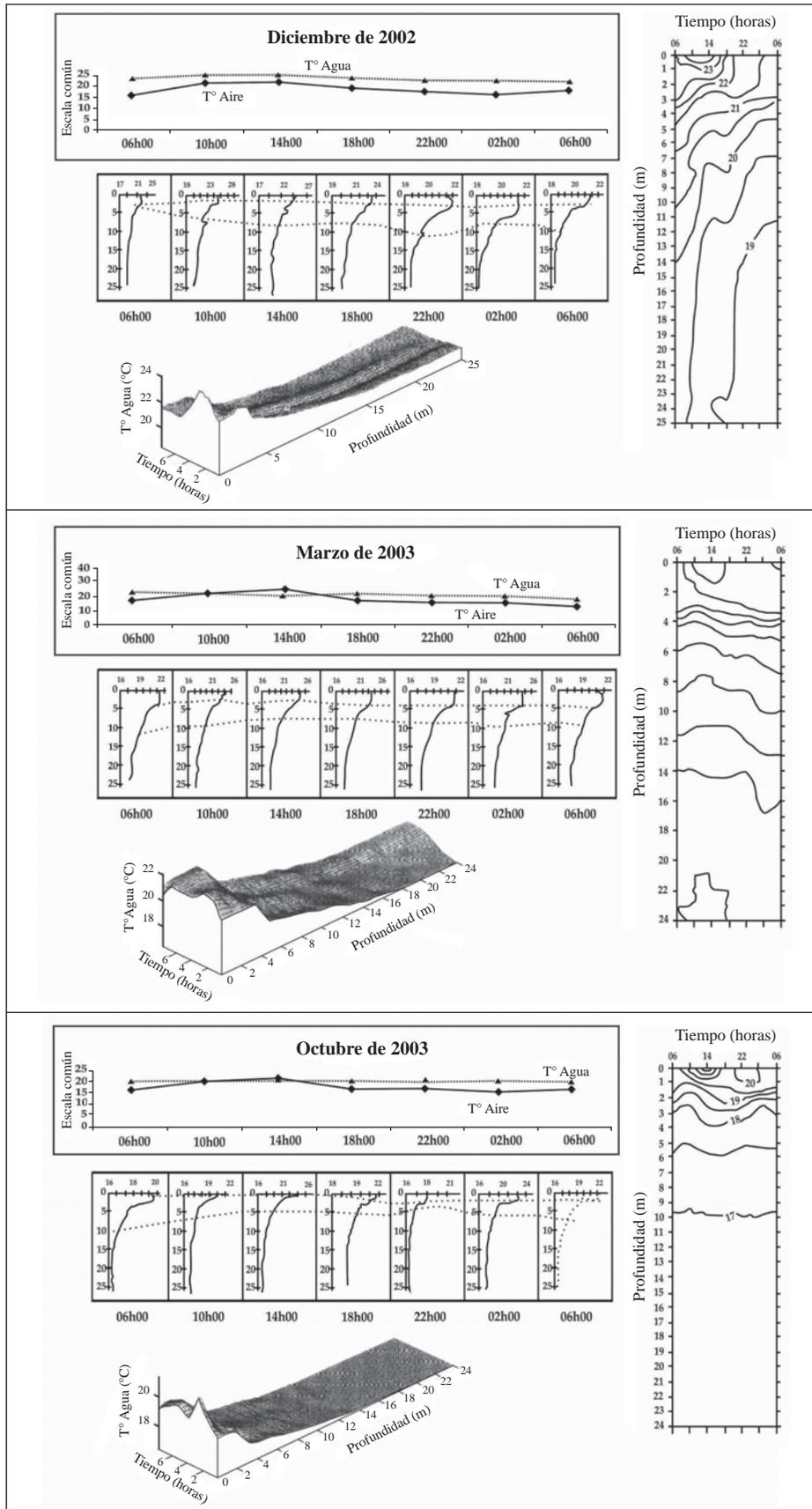


Figura 3. Embalse de La Fe. Ejemplos de los perfiles verticales diarios de temperatura

una tendencia significativa en la escala temporal diaria ($\alpha = 0,1056$); en la escala mensual, la tendencia fue altamente significativa y propensa a la disminución hacia los meses finales del muestreo ($\alpha = 0,0000$, $r = -0,67$, $EE = 0,85$).

Entre horas la diferencia entre T_a y T_s fue altamente significativa ($\alpha = 0,0001$) y tendió a disminuir durante las horas nocturnas ($r = -0,46$; $EE = 2,4$); entre meses, dicha diferencia no fue significativa ($\alpha = 0,5831$).

La velocidad del viento en el sitio de muestreo osciló entre 1,13 (agosto) y 2,97 m/s (junio), con un valor medio de 1,86 y una variación general no muy pronunciada ($CV = 20,8\%$). Su dirección media predominante fue bastante uniforme ($CV = 10,4\%$) y se mantuvo en el sentido del eje longitudinal del lago la mayor parte del tiempo (NNO-SSE), variando principalmente en diciembre de 2003 y agosto de 2004. Vale la pena anotar que el sitio de muestreo se encontraba hacia el sur.

La tendencia temporal diurna del logaritmo de la velocidad del viento fue levemente significativa ($\alpha = 0,0302$) y con una propensión muy leve a disminuir durante las horas nocturnas ($r = -0,26$, $EE = 0,77$).

El viento no influyó significativamente en las variaciones de la temperatura del agua en la superficie ($\alpha = 0,678$), pero sí mostró relación directa con el resultado de la diferencia $T_a - T_s$ ($\alpha = 0,0000$, $r = 0,48$, $E.E = 2,3$).

El coeficiente de atenuación vertical para irradiancia descendente [$K_d(\text{PAR})$], utilizado para evaluar la estructura óptica, mostró una media de $0,19 \text{ m}^{-1}$, un rango de $0,23 \text{ m}^{-1}$ y una leve tendencia significativa tanto en la escala diaria ($\alpha = 0,0312$) como en la anual ($\alpha = 0,0459$). El inverso de la transparencia (horas: $\alpha = 0,5923$, meses: $\alpha = 0,2704$), no arrojó tendencias significativas en ninguna de las dos escalas temporales investigadas. Igual sucedió con el primer criterio de evaluación de la forma térmica (TD_{temp}) (horas: $\alpha = 0,2980$; meses de muestreo: $\alpha = 0,6425$), el cual osciló entre $0,5$ y $7,6 \text{ }^\circ\text{C/m}$ para un valor medio de $4,2 \text{ }^\circ\text{C/m}$. El segundo criterio de evaluación de la forma térmica (TD_{RTR}) presentó una leve tendencia significativa en la variación temporal diaria ($\alpha = 0,0359$), mas no en la estacional ($\alpha = 0,1986$), oscilando entre $-0,02 \text{ m}^{-1}$ y $-0,25 \text{ m}^{-1}$ (media: $-0,29 \text{ m}^{-1}$). El promedio de la transparencia fue de $2,7 \text{ m}$ y su rango de $2,1 \text{ m}$; su variabilidad en las escalas mensual y estacional no fue significativa (Tablas 2, 3 y 4).

La figura 2 presenta algunos ejemplos de variación de la estructura óptica del embalse; puede observarse que la luz penetró hasta una profundidad que osciló entre los 4 y 6 metros, lo que implica una zona iluminada equivalente a un porcentaje entre el 16 y el 24 % de la columna de agua en la presa del embalse.

Algunos ejemplos significativos de la forma general de la curva de estratificación térmica (Figura 3) muestran que fue bastante similar a una curva exponencial monotónica

Tabla 2. Significancia estadística (α) de la variación espacial y temporal de las tasas de cambio de la temperatura con la profundidad, la transparencia (Dsd), la estabilidad y el coeficiente de atenuación vertical para irradiancia descendente [$K_d(\text{PAR})$].

Variable dependiente	Factor	α
Tasa de cambio de la estructura óptica ($K_d(\text{PAR})$ en $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$)	Horas	0,0312*
	Meses	0,0459 ns
1/Dsd	Horas	0,5223 ns
	Meses	0,2704 ns
Tasa de cambio de la estructura térmica (TD_{temp} , $^\circ\text{C}/\text{m}$)	Horas	0,2980 ns
	Meses	0,6425 ns
Tasa de disminución de la RTR (estabilidad) (TD_{RTR} , m^{-1})	Horas	0,0359 *
	Meses	0,1986 ns

* Significativo con $\alpha < 0,05$; ns = no significativo ($\alpha > 0,05$).

Tabla 3. Valores de la media aritmética para las tasas de cambio de la estructura óptica (K_d) \pm una desviación estándar, de la estructura térmica (TD_{temp}) y de la estabilidad (TD_{RTR}). El valor de n para estos cálculos es de 10, equivalente al número de muestreos nictémeros efectuados. Los valores negativos indican que la variable disminuyó hacia el fondo en cada muestreo.

Tiempo	$K_d(\text{PAR})$ (m^{-1})	TD_{temp} ($^\circ\text{C}/\text{m}$)	TD_{RTR} (m^{-1})
Diciembre	- 0,19 \pm 0,04	- 7,6	- 5,1
Febrero	- 0,18 \pm 0,0	- 2,3	- 5,7
Marzo	- 0,17 \pm 0,06	- 4,4	- 4,1
Abril	- 0,20 \pm 0,09	- 2,6	- 4,6
Mayo	- 0,21 \pm 0,06	- 5,1	- 4,8
Junio	- 0,22 \pm 0,04	- 4,2	- 4,6
Agosto	- 0,02 \pm 0,04	- 4,4	- 3,5
Septiembre	- 0,21 \pm 0,03	- 5,2	- 3,9
Octubre	- 0,25 \pm 0,11	- 0,5	- 5,1
Noviembre	- 0,25 \pm 0,09	- 5,8	- 0,1
Media \pm S	- 0,19 \pm 0,06	- 4,2	- 4,2

negativa. Generalmente, en las horas nocturnas se originó una pequeña zona de isoterma. La inclinación de la termoclinea fue leve y durante todo el tiempo la mezcla estuvo restringida a la parte superficial del sitio de muestreo; por ello, la profundidad de la capa mezclada varió relativamente poco: entre 1,1 m en noviembre y 4,0 m en marzo, con un valor medio de 2,7 m y un CV de 36,1 %. La tendencia general fue hacia la disminución en los últimos meses de muestreo.

La profundidad de la capa mezclada respondió en un 69 % a la dirección del viento ($\alpha = 0,0027$, $r = 0,83$). La velocidad del viento solo explicó el 1,1 % del comportamiento de dicha capa ($\alpha > 0,05$). La relación entre T_a y T_s y la profundidad de la zona de mezcla no fue significativa ($\alpha = 0,3520$).

Tabla 4. Valores de la media aritmética en el eje gravedad-luz para la transparencia (D_{sd}), la conductividad eléctrica (C.E.), el pH, la tasa de cambio del oxígeno disuelto (TDO₂) y el CO₂ total (CO₂ T). El valor de n para estos cálculos es de 10, equivalente al número de muestreos nictémeros efectuados, excepto para la conductividad eléctrica (n = 8). Los valores negativos de TDO₂ indican que la variable disminuyó hacia el fondo en cada muestreo.

Tiempo	Dsd (m)	C. E. ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH (Unidades de pH)	TD ₀₂ ($\text{mgO}_2\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)	CO ₂ T ($\text{mgCO}_2\cdot\text{l}^{-1}$)
Diciembre	2,0	42,6	6,09	- 0,19	35,2
Febrero	3,1	40,7	6,01	- 0,16	63,0
Marzo	2,7	44,5	6,25	- 0,16	58,2
Abril	2,3	41,9	6,33	- 0,16	76,2
Mayo	3,2	41,5	6,37	- 0,15	37,01
Junio	2,2	38,7	6,01	- 0,19	55,2
Agosto	4,1	36,8	6,24	- 0,15	40,9
Septiembre	3,2	47,7	6,37	- 0,15	33,0
Octubre	2,0	*	6,37	- 0,12	45,4
Noviembre	2,3	*	6,33	- 0,22	40,9
Media	2,7	41,8	6,2	- 0,20	48,5
CV (%)	25,1	8,0	2,4	16,7	29,1

Por su parte, la variación de la temperatura del fondo (media = 17,5 °C, V_{\min} = 16,1 °C, V_{\max} = 19,6 °C, CV = 5,1 %, n = 70) fue levemente inferior que la de la superficie. La diferencia entre T_a y T_s (media = - 3,5 °C, V_{\min} = - 9,7 °C, V_{\max} = 3,7 °C, CV = 76,3 %, n = 70) presentó una gran variación. La variación horaria de la temperatura del fondo tampoco presentó tendencia significativa (α = 0,6097), pero la tendencia anual sí fue altamente significativa (α = 0,0000, r = - 0,83, EE = 0,49), y al igual que la T_s , disminuyó hacia el final del muestreo.

Los valores medios de conductividad eléctrica fueron relativamente bajos, los del pH levemente ácidos, y altos los de CO₂ total en los muestreos nictémeros efectuados durante los meses del estudio. Los valores de los estadísticos de dispersión absoluta del pH y la tasa de cambio del oxígeno fueron también bajos; los de la transparencia, la conductividad y el CO₂ total fueron en general altos (Tabla 4). Las figuras 4 y 5 ilustran el patrón general de cambio vertical para estas variables, el cual correspondió a disminuciones rápidas de oxígeno hasta la hipoxia y la anoxia completa en algunos muestreos a profundidades entre los 12 y 16 m, y a disminuciones de pH y aumentos de conductividad eléctrica y CO₂ total hacia el fondo del cuerpo de agua.

Por último, la figura 6 muestra un modelo gráfico del comportamiento general del embalse.

Discusión

Estructura óptica

Respecto a la forma óptica del embalse, podemos decir inicialmente que el valor del parámetro morfométrico D_r mencionado anteriormente predijo un embalse con transparencia alta, atenuación lumínica baja y zona fótica

relativamente grande y poco variable. Según **Straškaba, et al.** (1993), los tiempos de retención prolongados aumentan las tasas de sedimentación y la profundidad de la zona fótica, así como la duración de los flujos superficiales, en tanto que la de los de fondo se reduce, por lo que predominan los flujos intermedios, todo lo cual se ajusta plenamente a lo encontrado en esta investigación.

El cinturón de macrófitas que rodea el embalse también es un factor que puede contribuir al incremento de la transparencia y la profundidad óptica, pues retiene los aportes de sedimentos que entran por los afluentes. Además, se considera que en los embalses la zona pelágica generalmente, presenta mayor tiempo de residencia que las demás zonas, por lo que se espera un incremento de la tasa de sedimentación del material particulado y, consecuentemente, de la transparencia. La investigación de **Vargas & Ramírez** (2002) demostró que no había diferencia entre las tasas de sedimentación de las zonas media y de presa en este embalse, lo que permite pensar que el embalse de La Fe posee una gran zona limnética que se extiende hasta la zona media.

Dado que los organismos de la comunidad de fitoplanctón registrados en otras investigaciones son bastante grandes (*Botryococcus braunii*, *Staurastrum* spp, *Microcystis aeruginosa*, *Woronochinia naegeliana*, *Peridinium* c.f. *gatumense*, *Ceratium furcoides*), el sombreado proporcionado por las algas no se considera un factor que afecte plausiblemente la penetración de luz.

Ramírez, et al., (2001) plantean que a medida que se incrementa la altura a la que se encuentra un cuerpo de agua, las condiciones edáficas varían y ocurre un menor arrastre de sedimentos y otros materiales; se espera, entonces, que en los lagos y embalses situados a mayor altura y con

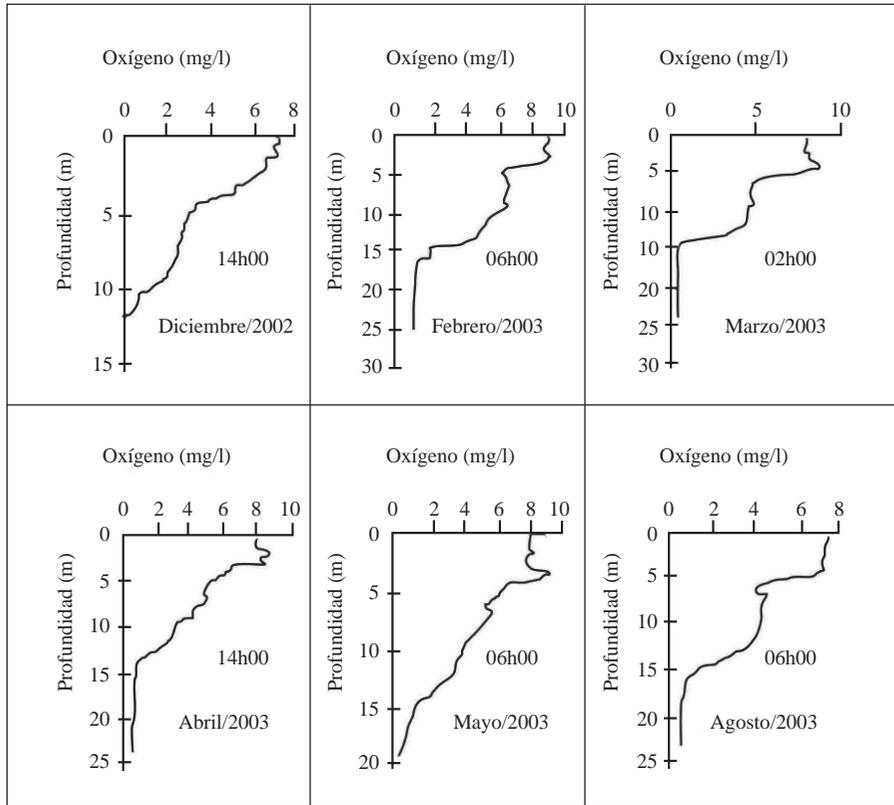


Figura 4. Embalse de La Fe. Ejemplos de la conducta del oxígeno en el eje gravedad-luz

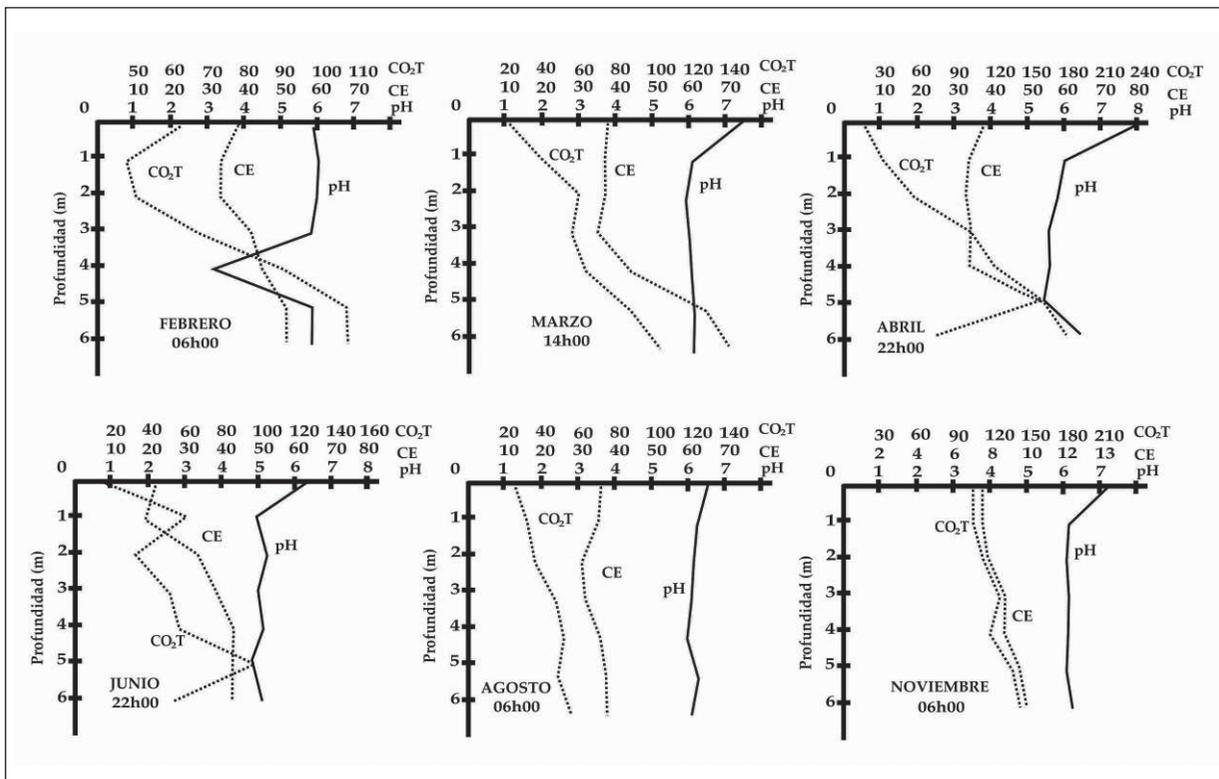


Figura 5. Embalse de La Fe. Ejemplos del comportamiento general de los perfiles de conductividad eléctrica (C.E.), pH y CO₂ total

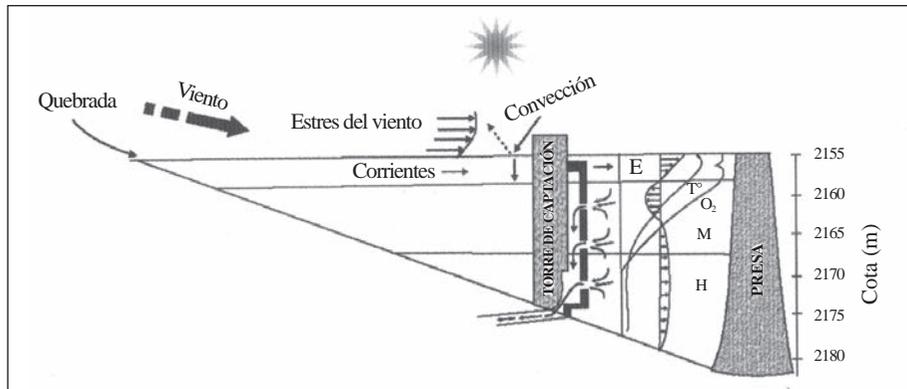


Figura 6. Modelo gráfico general del comportamiento de la columna de agua en el embalse

buena protección vegetal, la transparencia y la penetración de luz sean mayores. El embalse de La Fe se ubica a una altura de 2.100 m, con una protección vegetal adecuada a su alrededor. Al igual que los embalses de San Lorenzo y El Peñol, se encuentra en la zona conocida como “batolito antioqueño”, la cual, según **Espinal** (1985), se deriva de cenizas volcánicas y rocas ígneas que ceden poco material por lixiviación, a pesar de que la pluviosidad de la zona sea alta (entre 2.000 y 4.000 mm/año para la zona de vida del embalse) y se presenten pendientes considerables.

Debe considerarse, además, que el tratamiento previo de las aguas del río Pantanillo en la planta localizada en el municipio de El Retiro antes de ser bombeadas a la represa de La Fe, disminuye considerablemente el aporte de material particulado que pueda interferir en la penetración de luz en la presa del embalse (**Ramírez**, 1999).

Los datos referentes a la profundidad fótica muestran que la luz en este cuerpo de agua penetra mucho más allá de la profundidad límite del epilimnio. Lo anterior tiene, al menos en teoría, profundas implicaciones para el fitoplancton, dado que cuando la zona de mezcla es inferior a la zona fótica, el fitoplancton está sometido a niveles altos de irradiaciones medias de luz y a una alta densidad del flujo de fotones en escalas temporales cortas (minutos, horas y días), y no experimenta en estas escalas ni saturaciones de luz por debajo de los niveles normales, ni periodos de oscuridad, ni alternancias día/noche, ni modificaciones sustanciales en el ambiente subacuático de la fotosíntesis dentro de cada ciclo de mezcla. Sin embargo, esta situación, aparentemente favorable, podría llegar a superar la capacidad homeostática de las células algales frente a la variabilidad ambiental de corto plazo, afectando la producción primaria neta al incrementarse las tasas respiratorias.

Aunque existió una baja variabilidad de la forma óptica (desviación estándar entre 0,0 y 0,11) en la escala diaria, esta fue levemente significativa ($a = 0,0312$), lo cual indica que es relativamente inestable en la escala diaria mas no en las escalas mensual y anual; por ello, los perfiles verticales de

atenuación que se muestran en la figura 2 son muy similares entre meses y a lo largo del año, como se espera que ocurra en la zona tropical (**Ganf & Horne**, 1975; **Schiemer & Boland**, 1996; **Margalef**, 1983) (Tabla 3).

Clasificación óptica

Desde el punto de vista óptico, las aguas del embalse pueden clasificarse inicialmente como pertenecientes al tipo GA en el sistema de **Kirk** (2011), en las cuales el *gilvin* absorbe más que la fracción particulada y la turbidez es relativamente baja (turbidez media: 10,6 NTU, $n = 284$, en esta investigación). Las razones que permiten colegir lo anterior se fundan en que en La Fe: 1) el color (media: 51,6; $n = 284$, en esta investigación) es relativamente alto e indicador de aguas con una contribución sustancial de sustancias amarillas (material orgánico disuelto coloreado [*colored dissolved organic matter* – CDOM] o *gilvin*), que se originan cuando el tejido vegetal se descompone en el suelo del área de captación o en el agua; 2) el cinturón litoral de *E. densa* ya mencionado, que conjuntamente con las floraciones de diversos organismos de fitoplancton como *Botryococcus braunii*, *Staurastrum* spp., *Woronochinia naegeliana*, *Cuspidothrix* sp. y *Ceratium furcoides*, conforman aportes autóctonos de material orgánico; 3) el área de captación, con fuentes de material vegetal alóctono en descomposición provenientes de los cultivos de flores, potreros y plantaciones forestales de pino y ciprés, y 4) los afluentes, que contribuyen también con materia orgánica alóctona proveniente de las descargas de aguas residuales domésticas.

Estructura térmica

En los lagos de regiones templadas, la zona de mezcla presenta un espesor bastante constante, perturbado únicamente por el avance de la estación fría, que disminuye la temperatura y aumenta la densidad de las capas superiores, produciendo como resultado la erosión de la termoclina y el consiguiente aumento de la zona de mezcla. Con respecto a los lagos tropicales y ecuatoriales se ha dicho que este mecanismo no es tan claro, y que el espesor de la zona de mezcla es muy variable (**Beadle**, 1974; **Lewis**, 1987); en concordancia con

esta última proposición, el grueso de dicha zona presentó efectivamente una variación relativamente alta ($CV = 36,1\%$), que no se explica por la variación en la velocidad del viento ni por las fuerzas convectivas (diferencia $T_a - T_s$), pero sí por la dirección del viento (en un 69%).

Según varios autores (**Talling**, 1963; **Beadle**, 1974; **Cole**, 1983; **Lewis**, 1983a; **Lehmusluoto, et al.**, 1999; **Umaña, et al.**, 1999; **León-López, et al.**, 2012), los lagos ecuatoriales y tropicales presentan pequeñas diferencias verticales de temperatura, suficientes, sin embargo, para generar una estratificación estable. **Álvarez-Cobelas** (1992) propone que un gradiente térmico de $0,3\text{ }^\circ\text{C}$ es suficiente para el desarrollo de una estructura térmica estable.

En general, la profundidad de la mezcla del epilimnio está en función de la velocidad y la frecuencia media del viento y del *fetch*. Se considera que un estrés de viento con una velocidad mayor de $3,5\text{ m/s}$ produce un flujo de energía cinética que genera energía cinética turbulenta, la cual distribuye el flujo neto de calor a través de la capa mezclada hasta cuando disminuye la velocidad y alcanza el equilibrio. Salvo en el mes de junio, la velocidad del viento no alcanzó dichos valores en la presa del embalse de La Fe, por lo que estas fuerzas no fueron lo suficientemente eficaces para mezclar el agua y erosionar la termoclina, la cual se localizó muy cerca a la superficie. Por lo tanto, no hay un epilimnio claramente definido y el gradiente térmico comienza directamente en la superficie.

Como consecuencia de lo anterior, el patrón de forma térmica resultante se caracterizó por no variar significativamente ni en la escala diaria ni en la mensual, pero sí por presentar periodos de mezcla irregulares e incompletos, poco variables y causados, sobre todo, por las corrientes de convección que se repiten a diario, las lluvias fuertes, o los afluentes. **Román, et al.**, (2013) plantean que el aumento del caudal natural de los afluentes durante las épocas de lluvia y la ausencia del bombeo en estos periodos disminuyen el gradiente térmico debido a la incursión de dichos afluentes hacia el cuenco sur, y a que, probablemente, el agua del fondo es reemplazada por las aguas frías producto de las crecientes, favoreciendo así la mezcla vertical. La pluma de agua originada en el bombeo es para estos autores la responsable de esos cambios verticales en la columna de agua.

Por ello, y en concordancia con lo planteado por **Hutchinson & Löffler** (1956), **Lewis** (1973, 1983b) y **Tundisi & Matsumura-Tundisi** (2008), en el embalse de La Fe la mezcla es incompleta y los periodos de circulación tienden a ser inusuales, irregulares y de corta duración. Datos provenientes de lagos tropicales muestran que la mezcla causada únicamente por la convección es probablemente superficial (**Lewis**, 1987). **Lewis** (1973) denominó a este patrón atelomixis (*atelos* = incompleto, *mixis* = mezcla), y lo describió como el calentamiento térmico diurno y el enfriamiento nocturno, lo cual produce variaciones diurnas

de temperatura que pueden exceder las estacionales (anuales). Tales variaciones térmicas y de densidad ocurren en toda la columna de agua, no solamente en el epilimnio, cuando las estratificaciones son estables con termoclinas primarias bien establecidas. En ese caso, la atelomixis se denomina parcial y puede considerarse un fenómeno común en lagos tropicales (**Talling & Lemoalle**, 1998; **Barbosa & Padisák**, 2002). Este es un fenómeno de importancia fundamental en la reorganización vertical de la estructura térmica y la densidad de los lagos y sus interacciones con la distribución vertical del fitoplancton y los nutrientes (**Tundisi & Matsumura-Tundisi**, 2008).

Ruttner (1953) plantea que de 15 lagos indonesios estudiados por él y **Thienemann** en 1830, la mayoría estaba estratificado y su estabilidad se relacionaba con el área y la profundidad: lagos con un área menor de 2 km^2 eran más estables térmicamente, aquellos con un área aproximada de 100 km^2 mostraban menor estabilidad; los lagos con un área de más de 1.000 km^2 casi no presentaban estabilidad. Dado que el embalse de La Fe tiene un área de $1,43\text{ km}^2$, se ajustaría al primer tipo de lagos considerados por **Ruttner**, es decir, un lago térmicamente estable.

Kling (1988) define la profundidad de mezcla como la razón entre la profundidad máxima y el área, lo que en el embalse de La Fe da un resultado de $1,96\text{ m}$ y permite prever que en cualquier sitio del embalse la profundidad del epilimnio no sea considerable. El valor medio hallado para la zona de mezcla fue de $2,7\text{ m}$ ($10,8\%$ de la columna total de 25 m), el cual, en términos generales, se ajusta a la previsión. Además, los perfiles térmicos establecidos en seis estaciones de muestreo durante el mismo periodo de este estudio, indican que efectivamente el patrón incompleto de la atelomixis se presenta en todo el embalse.

Otro predictor teórico de la posibilidad de mezcla de un cuerpo de agua es la profundidad relativa (Dr). Según este parámetro morfométrico, los cuerpos de agua con un área superficial grande y poca profundidad tienen tendencia a mezclarse, mientras que los lagos y embalses pequeños y profundos tienen valores altos de Dr y se mezclan poco. El valor de este parámetro morfométrico en el embalse es de $2,07\%$, que se considera relativamente alto, lo que significa que solo un $2,1\%$ de la profundidad del cuerpo de agua se presenta mezclado, bien sea por fuerzas convectivas o mecánicas (**Hernani & Ramírez**, 2002). Aunque el valor medio de la zona de mezcla no corresponde al 2% predicho, en términos generales sí muestra la poca mezcla presente.

Como ya se mencionó, la dirección dominante del viento fue hacia la zona de presa, localizada hacia el SSE. No obstante, debido a que la estación de muestreo se sitúa en un área donde la influencia del viento queda confinada a ella, no alcanza a desarrollar el trabajo suficiente para vencer las fuerzas viscosas que se oponen a la mezcla profunda.

Otro factor que dificulta la mezcla total de la columna de agua es la protección que ejercen la vegetación, las montañas y las construcciones alrededor de la represa, que evitan la acción directa del viento. Los valores medios de la fuerza eólica oscilaron entre brisa leve y vientos suaves en la escala de Beaufort, influencia ésta muy pequeña para vencer las fuerzas viscosas. La circulación y la mezcla quedan así restringidas al epilimnio, tal como ocurre en otros embalses tropicales (**Tundisi, et al.**, 1981; **Tundisi & Matsumura-Tundisi**, 1984; **Infante & Infante**, 1994; **Soto & López**, 1996; **González, et al.**, 2002; **Tundisi & Matsumura-Tundisi**, 2008).

Como puede verse, existen suficientes evidencias para rechazar la hipótesis de **Villamizar** (1984) de que este cuerpo de agua, una vez en funcionamiento, no presentaría estratificación térmica estable.

La influencia significativa de la diferencia entre T_s y T_a se debe, según **Lewis** (1987, 1996), a la mayor pérdida nocturna de calor en latitudes bajas, ya que cuando la temperatura es alta una determinada pérdida de calor desde el agua ocasiona mayores cambios de densidad. Para **Imberger** (1985), una interacción entre aire y agua inestable puede causar un intercambio de hasta el 100 % en la transferencia de calor y masa durante episodios de viento leve (< 2 m/s), cuando predomina la mezcla convectiva en la capa fronteriza.

González, et al., (2004), **Straškaba, et al.** (1999) y **Henry** (1999) plantean que los embalses con tiempos de residencia mayores a 200 días pueden desarrollar estratificación térmica estable. Sin embargo, el embalse de La Fe, con un tiempo de residencia mucho menor, de aproximadamente 28 días, desarrolla —según se ha descrito en párrafos anteriores— una estratificación estable.

Por presentar perfiles térmicos heterogéneos con diferencias de 5° y 6°C entre superficie y fondo (por lo que pueden esperarse planos horizontales de densidad constante durante periodos de vientos débiles y de disminución en las entradas o salidas), así como un hipolimnio anóxico, aumentos de CO_2 total y conductividad eléctrica hacia el fondo y disminuciones de pH en esta misma profundidad, el embalse de La Fe se ajusta a lo que **Tundisi & Matsumura-Tundisi** (1984; 2008) denominan embalses con estratificación permanente. Según estos autores, estos sistemas ocurren en ríos con valles profundos y cuando la salida de agua para las turbinas se encuentra a profundidades intermedias entre la superficie y el fondo de la represa (Figura 6).

La anoxia de fondo hallada se debió fundamentalmente al patrón térmico encontrado, que aísla el hipolimnio de la inyección de oxígeno ocasionada por la mezcla en una columna holomíctica. Además, un embalse con un período de retención hidráulica largo tiene una mayor probabilidad de presentar una estratificación que lo lleve a un estado de anoxia permanente en el fondo que uno con un tiempo de retención menor. Fuera de eso, las temperaturas de fondo

de los embalses y lagos tropicales y ecuatoriales son altas ($> 20^\circ\text{C}$ en promedio), en comparación con los de zona templada (15°C en promedio, aproximadamente); por lo tanto, en concordancia con la regla de **Vant'Hoff**, y debido al consumo de oxígeno 4 a 9 veces más rápido, estos cuerpos de agua presentan una tendencia normal a la anoxia de fondo. Como consecuencia del mayor consumo de oxígeno, el CO_2 y otros solutos se liberan más rápidamente y la materia orgánica sedimentada se mineraliza a mayor velocidad (**Ruttner**, 1953; **Esteves**, 1998; **Schiemer & Boland**, 1996; **Lewis**, 2000 **Tundisi & Matsumura-Tundisi**, 2008).

Las altas temperaturas de la superficie ($> 28^\circ\text{C}$) son un rasgo tropical permanente de muchos lagos y embalses suramericanos, africanos y asiáticos (**Talling**, 1965; **Beadle**, 1974; **Eccles**, 1974; **Beeton**, 1991; **Frempong**, 1995; **Roldán & Ruiz**, 2001). Debido a las altas temperaturas de estas aguas, la descomposición progresa rápidamente, de tal forma que en un período corto pueden tener lugar profundos cambios químicos en el hipolimnio, haciéndolo inhabitable para peces y otros organismos aeróbicos.

Según **Thornton** (1990), los embalses con valores bajos de *fetch*, profundidad moderada (aproximadamente 20 m), estratificación leve a fuerte y operados para liberación de aguas cálidas pueden desarrollar una zona anóxica cerca de la presa, la cual puede extenderse verticalmente en la columna de agua y también en sentido horizontal en las demás zonas. Los resultados registrados hasta ahora muestran que estas condiciones se cumplen en el embalse de La Fe y conforman una explicación alternativa para la anoxia hipolimnética que se presenta.

Así pues, el sistema del embalse de La Fe se mantiene estacionario y a un nivel bajo de desorden (poca entropía), lo que se explica por la disipación del calor desde la superficie y a su poca distribución en el sistema debido a la ausencia de eventos de mezcla profundos producto del patrón atelomíctico. De ahí las diferencias no significativas de la tasa de cambio de la temperatura en las escalas diaria ($a = 0,2980$) y mensual ($a = 0,6425$) y levemente significativas de la TD_{RTR} en la escala diaria ($a = 0,0359$) (Tabla 3).

Dado que desde las dos compuertas superiores se libera agua en forma regular y continua en un flujo lento, la mayoría del agua que pasa por ellas proviene del metalimnio, por lo que en cierta medida se incrementa el tiempo de residencia del agua hipolimnética y con ello la anoxia en esta zona. Para **Román, et al.**, (2013), es probable que las zonas profundas en el cuenco sur se mantengan muy quietas en temporadas de estiaje y permanezcan allí por largos periodos. Además, según **Cole & Hannan** (1990), **Straškaba, et al.**, (1999) y **Tundisi & Matsumura-Tundisi** (2008), los embalses con salidas superficiales, y en algunos casos aquellos con salida intermedia, incrementan el tiempo de residencia de las aguas hipolimnéticas, lo que aumenta los procesos oxidativos causando una mayor desoxigenación en esta zona (Figura 6).

Conclusiones

Con respecto a la estructura óptica, puede concluirse que la previsión formulada se aceptó parcialmente, pues dicha estructura varió significativamente en la escala diaria pero no en la estacional. Por sus características, el embalse de La Fe puede pertenecer ópticamente al tipo GA de **Kirk**. Futuros estudios que profundicen más en este tema permitirán dilucidar con mayor claridad el tipo de forma óptica al que se ajusta este cuerpo de agua.

La previsión de la investigación en cuanto a la forma térmica no se aceptó, a pesar de las leves diferencias significativas de la tasa de cambio de la estabilidad en la escala diaria; por lo tanto, la pregunta inicial acerca de cómo es la variación temporal diaria y anual del patrón de forma térmico se puede responder aseverando que en el sitio de muestreo dicho patrón no mostró cambios significativos en las dos escalas temporales evaluadas (diaria y estacional).

El patrón de mezcla hallado corresponde a una atelomixis parcial, con un epilimnio poco definido. Debido al prolongado aislamiento de las capas inferiores por las densas capas superiores, el cuerpo de agua presentó un hipolimnio anóxico y bastante extenso (aproximadamente entre el 80 y el 98 % de la columna de agua de 25 metros en la presa) durante todo el tiempo del muestreo, lo que permite pensar que ni los afluentes ni el bombeo de agua desempeñan un papel importante en la reaireación del embalse ni en su mezcla. Las temperaturas hipolimnéticas permanecieron relativamente constantes, los eventos de mezcla se limitaron a los primeros metros y fueron mayores en el periodo nocturno, el pH disminuyó hacia el fondo, y la conductividad y el CO₂ total se incrementaron hacia esta profundidad.

Agradecimientos

El autor agradece al Comité de Investigaciones (CODI) de la Universidad de Antioquia por la financiación del proyecto inicial de "Caracterización limnológica del embalse La Fe, Antioquia, Colombia", así como a los operarios del embalse y al ingeniero Darlín Tobón.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de interés.

Bibliografía

- Álvarez-Cobelas, M.** (1992). Temperature and heat in a hyperthermic, gravel pit lake. *Arch. Hydrobiol.* **125**: 279-294.
- Barbosa, F.A.R & Padisák, J.** (1992). The forgotten lake stratification pattern: Atelomixis, and its ecological importance. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie.* **28**: 1385-1395.
- Beadle, L.C.** (1974). The inland waters of tropical Africa. An introduction to tropical limnology. London: Longman.
- Beeton, A.M.** (1991). Limnology of the Nam Ngum reservoir, Laos. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie.* **24**: 1436-1444.

- Cole, G.A.** (1983). Textbook of Limnology. (3^{ra} Ed). Saint Louis: The Mosby Co.
- Cole, T.M. & Hannan, H.H.** (1990). Dissolved oxygen dynamics. En K. W. Thornton, Kimmel, L. & Payne, F.E. (Eds.). *Reservoir Limnology: Ecological perspectives.* New York: Wiley. p. 71-107.
- Eccles, D.H.** (1974). An outline of the physical limnology of Lake Malawi (Lake Nyasa). *Limnology and Oceanography.* **19**: 730-742.
- Esteves, F.A.** (1998). Fundamentos de limnología. Río de Janeiro: Interciencia/Finep.
- Fernández, J.** (2006). Modelamiento de la Estructura Térmica en el Sistema Hidroeléctrico de los Embalses Porce II - Porce III (Tesis). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Franco-Velásquez, J.D.** (2011). Modelación de la estructura térmica de un embalse ramificado mediante el análisis de los procesos físicos gobernantes. Aplicación al embalse multipropósito Riogrande II (Tesis de maestría). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Frempong, E.** (1995). Limnological research and training in Ghana: The past, present and perspectives for the future development. En B. Gopal y Wetzel, R.G. (Eds.). *Limnology in Developing Countries, 1*, New Delhi: International Association for Limnology (SIL). p. 1-39.
- Ganf, G.G. & Horne, A.J.** (1975). Diurnal stratification, photosynthesis and nitrogen fixation in a shallow equatorial lake (Lake George, Uganda). *Freshwat. Biol.* **5**: 13-19.
- González, E.J., Ortaz, M., Peña Herrera, Carrillo, V.** (2002). Caracterización limnológica de un embalse en fase de llenado, embalse Taguaza, Estado Miranda. *Hidroimpacto C.A. Hidrocapital y Universidad Central de Venezuela, Caracas.*
- González, E.J., Ortaz, M., Peña Herrera, C., Infante, A.** (2004). Physical and chemical features of a tropical hypertrophic reservoir permanently stratified. *Hydrobiologia.* **522**: 301-310.
- Henry, R.** (1999). Heat budgets, thermal structure and dissolved oxygen in Brazilian reservoirs. En J. G. Tundisi. & Straskraba, M. (Eds.). *Theoretical Reservoir Ecology and Its applications.* São Paulo: International Institute of Ecology, Brazilian Academy of Sciences & Backhuys Publishers. p. 125-151.
- Hernani, A. & Ramírez, J.J.** (2002). Aspectos morfológicos y teóricos de un embalse tropical de alta montaña: represa La Fe, El Retiro, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.* **26**: 511-518.
- Hutchinson, G.E.** (1957). A treatise on Limnology. I. Geography, physics, and chemistry. New York: Wiley.
- Hutchinson, G.E. & Loeffler, H.** (1956). The thermal classification of lakes. *Proceedings of Natural Academy of Sciences, USA.* **42**: 84-86.
- Kirk, J.T.O.** (2011). Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. 3rd Ed. Cambridge: Cambridge University Press.

- Kling, G.W.** (1988). Comparative transparency, depth of mixing, and stability of stratification in lakes of Cameroon, West Africa. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 27-40.
- Imberger, J.** (1985). The diurnal mixed layer. *Limnol. Oceanogr.* **30**: 737-770.
- Infante, A. & Infante, O.** (1994). Limnological studies in a tropical man-made lake (Lagartijo reservoir) Venezuela. *Internat. Rev. Ges. Hydrobiol.* **79**: 17-25.
- Lehmusluoto, P., Machbub, B., Terangna, N., Achmad, F., Boer, L., Brahmana, S.S., et al.** (1999). Limnology in Indonesia: From the legacy of the past to the prospects for the future. En: R. G. Wetzel & B. Gopal (Eds). *Limnology in Developing Countries*, 2. New Delhi: International Association for Limnology (SIL). p. 119-234.
- Lewis, W.M. Jr.** (1973). The thermal regime of Lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications for tropical lakes. *Limnol. Oceanogr.* **18**: 200-217.
- Lewis, W.M. Jr.** (1983a). Temperature, heat, and mixing in Lake Valencia, Venezuela. *Limnol. Oceanogr.* **28**: 273-286.
- Lewis, W.M. Jr.** (1983b). A revised classification of lakes based on mixing. *Can. J. Fish. Aq. Sc.* **40**: 1779-1787.
- Lewis, W.M. Jr.** (1987). Tropical limnology. *An. Rev. Ecol. Syst.* **18**: 159-184.
- Lewis, W.M. Jr.** (1996). Tropical lakes: How latitude makes a difference. En: F. Schiemer. & Boland, T. (Eds.) *Perspectives in tropical limnology*. Amsterdam: SBP Academic Publishing. p. 43-64.
- Lewis, W.M. Jr.** (2000). Basis for the protection and management of tropical lakes. *Lakes and Reservoir Research Management*. **5**: 35-48.
- León-López, N., Rivera-Rondón, C.A., Zapata, A., Jiménez, J., Villamil, W. Arenas, G., et al.** (2012). Factors controlling phytoplankton in tropical high-mountain drinking-water reservoirs. *Limnetica*. **31**: 305-322.
- Mackereth, J.J., Heron, H., Talling, J.F.** (1978). Water analysis: Some revised methods for limnologists. *Freshwater Biological Association, Scientific Publication n° 36*. England: Titus Wilson & Son Ltd.
- Margalef, R.** (1974). *Ecología*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Margalef, R.** (1980). *La biósfera entre la termodinámica y el juego*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Margalef, R.** (1983). *Limnología*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Margalef, R.** (1993). *Teoría de los sistemas ecológicos*. 2ª ed. Barcelona: Universitat de Barcelona Publicacions.
- Marín, L.** (2008). Modelamiento de la estructura térmica en embalses tropicales, aplicación Riogrande II (Tesis). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Montoya-Moreno, Y.** (2008). Variaciones nictemerales de algunas variables ambientales y fisicoquímicas en una laguna somera en Guatapé, Antioquia (Colombia). *Actual. Biol.* **30**: 83-96.MMM
- Montoya-Moreno, Y. & Aguirre, N.** (2009). Cambios nictemerales de variables físicas y químicas en la ciénaga de Patícos, complejo cenagoso de Ayapel, Colombia. *Rev. Biol. Trop.* **57**: 635-646.
- Padisák, J., Soróczki-Pintér, E., Receñir, Z.S.** (2003). Sinking properties of some phytoplankton shapes and the relation of form resistance to morphological diversity of plankton: An experimental study. *Hydrobiologia*. **500**: 243-257.
- Ramírez J.J. & Díaz, A.** (1995a). Variaciones verticales de temperatura y factores químicos en un ciclo de 24 horas en el embalse Punchiná, Antioquia, Colombia. *Acta Limnol. Bras.* **7**: 23-34.
- Ramírez, J.J. & Díaz, A.** (1995b). Cambios diurnos de temperatura y variables físicas y químicas en dos épocas del año en la laguna del Parque Norte, Colombia. *Acta Limnol. Bras.* **7**: 87-104.
- Ramírez, J.J., Bicudo, C.E.M., Roldán, P.G., García, L.C.** (2001). Variación vertical de parámetros físicos y químicos en cuatro embalses tropicales y su relación con el área, la altitud y el tiempo de retención hidráulica. *Acta Limnol. Bras.* **13**: 19-34.
- Ramos, R.** (2007). Modelación del Efecto del Viento sobre la Estructura Térmica del Embalse Porce II (Tesis). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Román, R.** (2011). Caracterización espacio temporal de la estructura térmica de un embalse tropical poco profundo, abastecido parcialmente por bombeo. (Tesis de maestría). Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Román, R., Gómez, A. & Toro, M.** (2013). Efecto estacional de los afluentes en la estructura térmica de un pequeño embalse neotropical, La Fe-Colombia. *Dyna*. **177**: 152-161.
- Ríos, E.L.** (2005). Caracterización ambiental de la ciénaga El Eneal, ubicada en la reserva San Guaré (municipio de San Onofre, Sucre) (Tesis de maestría). Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Medellín.
- Roldán, G. & Ruiz, E.** (2001). Development of Limnology in Colombia. En R. G. Wetzel & Gopal, B. (Eds.) *Limnology in Developing Countries*, 3. New Delhi: International Association for Limnology (SIL). p. 69-119.
- Ruttner, F.** (1953). *Fundamentals of Limnology*. 3ª Ed. Toronto: University of Toronto Press.
- Soto, L.M. & López, C.** (1996). *Limnología física del embalse Socuy, Venezuela*. Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas. **30**: 157-171.
- Schiemer F. & Boland, K.T.** (Eds.) (1996). *Perspectives in tropical limnology*. Amsterdam: SPB Academic Publishing.
- Straskaba, M., Tundisi, J.G. & Duncan, A.** (Eds.). (1993). *Comparative reservoir limnology and water quality management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Talling, J.F.** (1963). Origins of stratification in an African Rift Lake. *Limnol. Oceanogr.* **8**: 68-78.
- Talling, J.F.** (1965). Comparative problems of phytoplankton production and photosynthetic productivity in a tropical

- and a temperate lake. *Mem. Ist. It. d'Idrobiol. (Suppl.)*. **18**: 399-424.
- Talling, J.F. & Lemoalle, J.** (1998). *Ecological dynamics of tropical inland waters*. Cambridge: University Press.
- Tavera, R. & Martínez-Almeida, V.** (2005). Atelomixis as a possible driving force in the phytoplankton composition of Zirahuén, a warm-monomictic tropical lake. *Hydrobiologia*. **533**: 199-208.
- Thornton, K.W.** (1990). Sedimentary processes. En K. W. Thornton, Kimmel, L.B. & Payne, F.E. (Eds.). *Reservoir limnology: Ecological perspectives*. New York: Wiley. p. 43-69.
- Tundisi, J.G., Matsumura-Tundisi, T., Pontes, M.C., Gentil, J.C.** (1981). Limnological studies at quaternary lakes in eastern Brazil. I. Primary production of phytoplankton and ecological factors at lake Dom Helvécio. *Rev. Bras. Bot.* **4**: 5-14.
- Tundisi, J.G. & Matsumura-Tundisi, T.** (1984). Comparative limnological studies at three lakes in tropical Brazil. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **22**: 1310-1314.
- Tundisi, J.G. & Matsumura-Tundisi, T.** (2008). *Limnología*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Umaña, G., Haberyan, K.A., Shorn, S.P.** (1999). Limnology in Costa Rica. En: Wetzel, R.G. & Gopal, B. (Eds.). *Limnology in Developing Countries, 2*. International Association for Limnology (SIL), New Delhi. p. 33-62.
- Urrego A. & Ramírez, J.J.** (2000). Cambios diurnos de variables físicas y químicas en la zona de ritral del río Medellín, Colombia. *Caldasia*. **22**: 127-141.
- Vergara, N.** (2005). *Dinámica mensual de la capa superficial mezclada y la estabilidad térmica en la presa de un embalse tropical: Represa La Fe, El Retiro, Colombia* (Tesis). Facultad de Ingenierías. Universidad de Antioquia. Medellín.
- Villamizar, D.** (1984). Algunas consideraciones sobre los riesgos de proliferación de plantas acuáticas en embalses. *Revista Ainsa*. **2**: 23-29.
- Villegas, B.** (2004). *Utilización de un Modelo Numérico para el Estudio de la Estructura Térmica del Embalse Porce II* (Trabajo de grado). Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

Malformación en cangrejos de la superfamilia Xanthoidea (Crustacea: Brachyura) en la bahía de Cispatá (Córdoba, Colombia)

Néstor Hernando Campos-Campos^{1,*}, Pedro Ricardo Dueñas-Ramírez², Nohemí Genes³

¹CECIMAR, Universidad Nacional de Colombia, sede Caribe, Isla de San Andrés, Colombia

²Programa de Biología Marina, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, sede Caribe, Santa Marta, Colombia

³Departamento de Biología, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia

Resumen

Mediante muestreos para determinar la composición y los cambios estacionales de las poblaciones de los crustáceos decápodos del departamento de Córdoba entre junio de 2005 y mayo de 2006, se recolectó material asociado a las raíces de mangle de la bahía de Cispatá. En las estaciones de Punta Nisperal y Caño Mocho se capturaron varios ejemplares de cangrejos de la superfamilia Xanthoidea con malformaciones, entre ellas, la fusión de dientes anterolaterales, la malformación del dactilo con un apéndice caminador en forma de espiral, el crecimiento exagerado de pleópodos en hembras, además de enfermedades como las manchas negras que resultan en la destrucción de la capa de quitina. Durante el primer muestreo (julio de 2005), se recolectaron cinco ejemplares (2,4 %) con deformaciones en Caño Mocho y 67 en Punta Nisperal (3,8 %). La incidencia de malformaciones se relacionó con el período de lluvias, durante la cual se incrementa la descarga del río Sinú con el consecuente aumento en la descarga de nutrientes y contaminantes, lo que puede inducir a alteraciones durante la fase larval (teratogénesis) y resultar en las malformaciones descritas. Estudios recientes demuestran que la entrada constante de metales como el mercurio, catalogado como un agente teratogénico, es la causa más probable de esta problemática.

Palabras clave: crustáceos, cangrejos, malformaciones, teratogénesis, Caribe colombiano.

Malformation in crabs of the superfamily Xanthoidea (Crustacea: Brachyura) in the Cispatá Bay (Córdoba, Colombia)

Abstract

Material associated with the roots of mangrove in the Cispatá Bay (Department of Córdoba, Colombia) was collected during surveys carried out to determine the composition and seasonal changes of the populations of decapods crustaceans in this Department between June 2005 and May 2006. At Punta Nisperal and Caño Mocho stations, several specimens of crabs belonging to the Xanthoidea superfamily with malformations were captured. Malformations included the fusion of the anterolateral teeth, malformation of the dactyl in the form of a spiral-like walking appendix, overgrowth of pleopods in females, as well as the incidence of diseases such as black spots and subsequent destruction of the chitin layer. During the first sampling (July 2005), five specimens with deformations were collected in Caño Mocho (2.4%), and 67 in Punta Nisperal (3.8%). The incidence of malformations was associated to the rainy season, during which the discharge of the Sinú River increases and with it the discharge of polluting nutrients which can induce alterations during the larval phase (teratogenicity), resulting in the malformations described. Recent studies have shown that the constant input of metals such as mercury, classified as a teratogenic agent, is most likely the cause of this problem.

Key words: Crustacea, crabs, malformations, teratogenicity, Colombian Caribbean.

Introducción

El departamento de Córdoba cuenta con una diversidad de ambientes marinos, estuarinos y continentales, cada uno de los cuales aporta diferentes sustratos aptos para el desarrollo de comunidades de crustáceos decápodos y otros invertebrados. Entre los ambientes marinos se destacan las praderas de *Thalassia testudinum*, las comunidades macroalgales, el cascajo de coral, el litoral rocoso, los arrecifes de parche y los fondos de arena, así como el manglar, que predomina en los estuarios (Rangel-Churio, 2004).

Una de las características especiales del departamento de Córdoba es el delta del río Sinú, el cual ha permitido el asentamiento de extensas áreas densamente cubiertas de manglares. En la parte interna del delta se han desarrollado grandes áreas dedicadas al cultivo extensivo de camarones:

*Correspondencia:

Néstor Hernando Campos-Campos, nhcamposc@unal.edu.co

Recibido: 7 de enero de 2015

Aceptado: 5 de marzo de 2015

durante el periodo del estudio se localizaban cuatro camarones en sus alrededores, siendo las más grandes Agrosoleidad, con 150 hectáreas, la cual fue cerrada en el 2007, y Agrotijó, con 20 hectáreas (Sánchez, *et al.*, 1997).

El manglar, ubicado en la confluencia final del río Sinú, en la bahía de Cispatá (antiguo delta del río Sinú), es la formación de manglar más importante del departamento, con una superficie aproximada de 150 km² que se extiende entre los municipios de San Antero, Lórica y San Bernardo del Viento (Castaño, *et al.*, 2010). Esta zona está influenciada por las corrientes marinas y los desbordamientos de aguas del río, que han conformado las llanuras litoral y deltaica actuales, y que dieron origen a marismas, manglares, ciénagas y caños en el antiguo delta del río Sinú (Álvarez-León, *et al.*, 2003).

Los registros de decápodos incluyen especies comercializadas y de consumo como el cangrejo azul de tierra (*Cardisoma guanhumi*), las jaibas (*Callinectes sp.*) y los camarones (familia Penaeidae). Recientemente se estudió la fauna de crustáceos decápodos en la franja de la costa marina del departamento de Córdoba, (Dueñas, *et al.*, 2012), con lo que el número de especies registradas se elevó de 108 (Campos, *et al.*, 2010) a 187. La diversidad de otros crustáceos decápodos y los cambios que sufren las poblaciones en las estaciones climáticas están siendo estudiados actualmente (Quiroz & Campos, 2010; Quiroz, *et al.*, 2012). Otros reportes han sido producto de investigaciones llevadas a cabo en el Caribe colombiano, incluido el golfo de Morrosquillo, que no especifican las zonas del departamento, como ocurre en el estudio de INVEMAR (Campos, *et al.*, 2005), cuyos resultados proporcionan una visión de la diversidad de los decápodos en el sector.

Entre junio de 2005 y mayo de 2006 se recolectó material asociado a las raíces de mangle de las estaciones Punta Nisperal, Caño Salado y Caño Mocho, en la bahía de Cispatá, y se capturaron varios ejemplares de cangrejos de la superfamilia Xanthoidea con malformaciones.

La incidencia de malformaciones en crustáceos es frecuente en el medio marino y ha sido registrada en diferentes lugares del mundo. Noga, *et al.*, (2000) describieron una serie de patologías del caparazón de *Callinectes sapidus* en la costa noroccidental de los Estados Unidos. Recientemente, Gregati, *et al.*, (2009) reportaron la presencia de enfermedades del caparazón y anomalías en poblaciones naturales de *Neohelice granulata* en un bosque de manglar en Brasil. Este es, probablemente, uno de los pocos estudios en los que se reportan malformaciones en poblaciones de varias especies nativas.

Según Lira, *et al.*, (2003), el desarrollo anormal de estructuras corporales es un fenómeno que ocurre con cierta frecuencia y se ha observado en una gran variedad de organismos. Su causa se ha atribuido a una doble generación de zonas de crecimiento, así como a una falta de coordinación en

la regeneración de las heridas a partir de los bordes. Los reportes de malformaciones en crustáceos son frecuentes, pero aparecen en pocos ejemplares.

Materiales y métodos

El área de estudio se localizó entre las coordenadas 9° 23' y 9° 25' de latitud norte y 75° 45' y 75° 50' de longitud oeste, e incluyó la zona deltaico-estuarina del río Sinú, cuyo límite al sur es el distrito de riego de La Doctrina, al este, la bahía de Cispatá, al oeste, el río La Balsa, próximo a la población de San Bernardo del Viento, y al norte, el mar Caribe, abarcando la desembocadura y el complejo de ciénagas del antiguo delta ubicado entre la bahía de Cispatá y los caños Grande y Sicará (Figura 1).

Se hicieron cuatro salidas de campo entre junio de 2005 y mayo de 2006 con el objetivo de cubrir los dos periodos climáticos (seco, de noviembre a marzo, y de lluvias, entre abril y noviembre, con un período seco intermedio).

En la zona de manglar se escogieron tres puntos de muestreo: Caño Salado, Caño Mocho y Punta Nisperal; en cada uno se seleccionaron tres raíces de mangle al azar que fueron introducidas en una red de ojo de malla de 2 mm y cortadas por encima del nivel del agua, para luego guardarlas en una bolsa plástica, según la metodología utilizada por Campos (1999). En un recipiente plástico se separaron los crustáceos decápodos del resto de material y se fijaron en alcohol al 70 % en frascos plásticos debidamente sellados y rotulados. Los organismos recolectados se separaron por grupos utilizando un estereoscopio y se identificaron hasta el nivel de especie cuando fue posible. Para la identificación se utilizaron las claves de Rathbun (1930) y Williams (1984).

Resultados y discusión

Durante los cuatro períodos de muestreo, se recolectaron 1.819 individuos distribuidos en siete familias: Alpheidae (202), Diogenidae (4) Grapsidae (381), Goneplacidae (2), Palaemonidae (4), Porcellanidae (702), y Xanthoidea (524), las cuales agruparon 16 géneros.

Del total de crustáceos decápodos recolectados en las tres estaciones y durante los cuatro períodos, 138 presentaban algún grado de deformación. En las figuras 2 a 4, se presentan las malformaciones más relevantes.

El ejemplar de la figura 2A corresponde a un cangrejo del género *Eurypanopeus* que presentaba malformación a nivel de los dientes anterolaterales. Se observa fusión de los dientes 1 y 2 y 4 y 5 del borde derecho, en tanto que el 3 derecho es ancho y de forma subcuadrada y no subtriangular en comparación con el izquierdo.

En la figura 2 B-D se observan malformaciones en los bordes anterolaterales y el abdomen de un ejemplar no identificado de la superfamilia Xanthoidea. En la figura 2B se observan las malformaciones en los dos bordes anterolaterales: el izquierdo tiene los dientes separados, sin embargo, el quinto

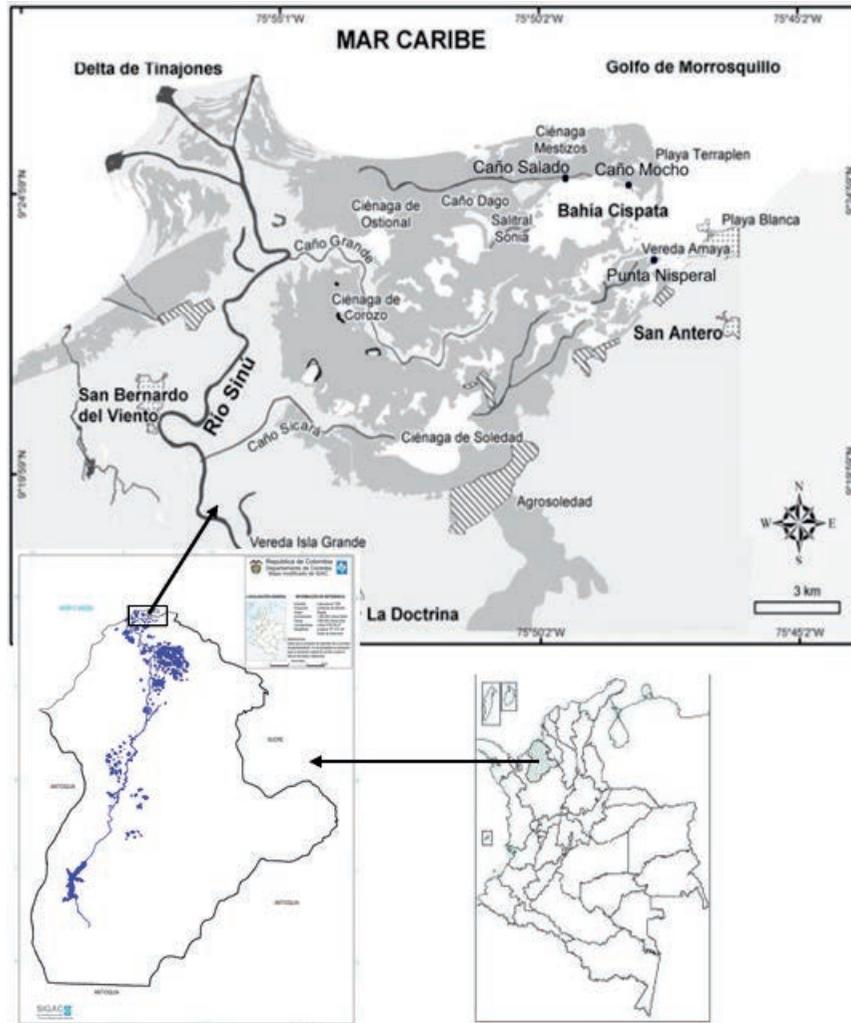


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio y los puntos de muestreo Caño Salado, Caño Mocho y Punta Nisperal (modificado de Estela y López-Victoria, 2005).

aparece reducido, mientras que el tercero termina en forma subcuadrada con una proyección posterior; el primero y el segundo están fusionados. El derecho (Figura 2D) presenta el quinto más reducido que el izquierdo; el tercero y cuarto están fusionados en la base, y se dividen distalmente y las puntas divergen; el segundo es reducido y no se fusiona con el borde postorbital. La tercera malformación se presenta en el abdomen (Figura 2C): los segmentos aparecen completamente deformes, a tal punto que no cubren la cavidad abdominal; el telson no termina en forma subredonda o subcónica, como es normal en los cangrejos machos, y, por el contrario, forma un subtriángulo con el borde derecho más largo que el izquierdo. Además, los esternitos derechos quinto y sexto se presentan separados, contrariamente a los del lado izquierdo, que aparecen fusionados.

En la figura 2 E-F se observan múltiples malformaciones en un cangrejo de la superfamilia Xanthoidea (posiblemente del género *Micropanope*). En la figura 2E, además de la deformación a nivel de las órbitas y de los dientes del borde

anterolateral derecho (primero y segundo), se muestra el dactilo del tercer pereiópodo izquierdo torcido en forma de espiral. En la figura 2F se observa el crecimiento excesivo de los pleópodos, los cuales sobresalen del abdomen; se resaltan las anomalías del abdomen, en las que se presenta una torsión hacia la derecha del cangrejo por acortamiento del borde derecho del sexto segmento abdominal y la consecuente pérdida de la simetría bilateral.

El ejemplar de la figura 2G corresponde a un cangrejo de la superfamilia Xanthoidea que no pudo identificarse más detalladamente debido a la cantidad de malformaciones del caparazón. El ejemplar presenta los bordes anterolaterales deformados completamente, así como las órbitas, el pedúnculo ocular derecho presenta un crecimiento excesivo, y se observa un abultamiento de la región branquial derecha.

El ejemplar de la figura 2 H presenta deformidades en los bordes anterolaterales, en las órbitas y en el quelípodo derecho, con el dedo móvil cruzando el fijo, lo cual no

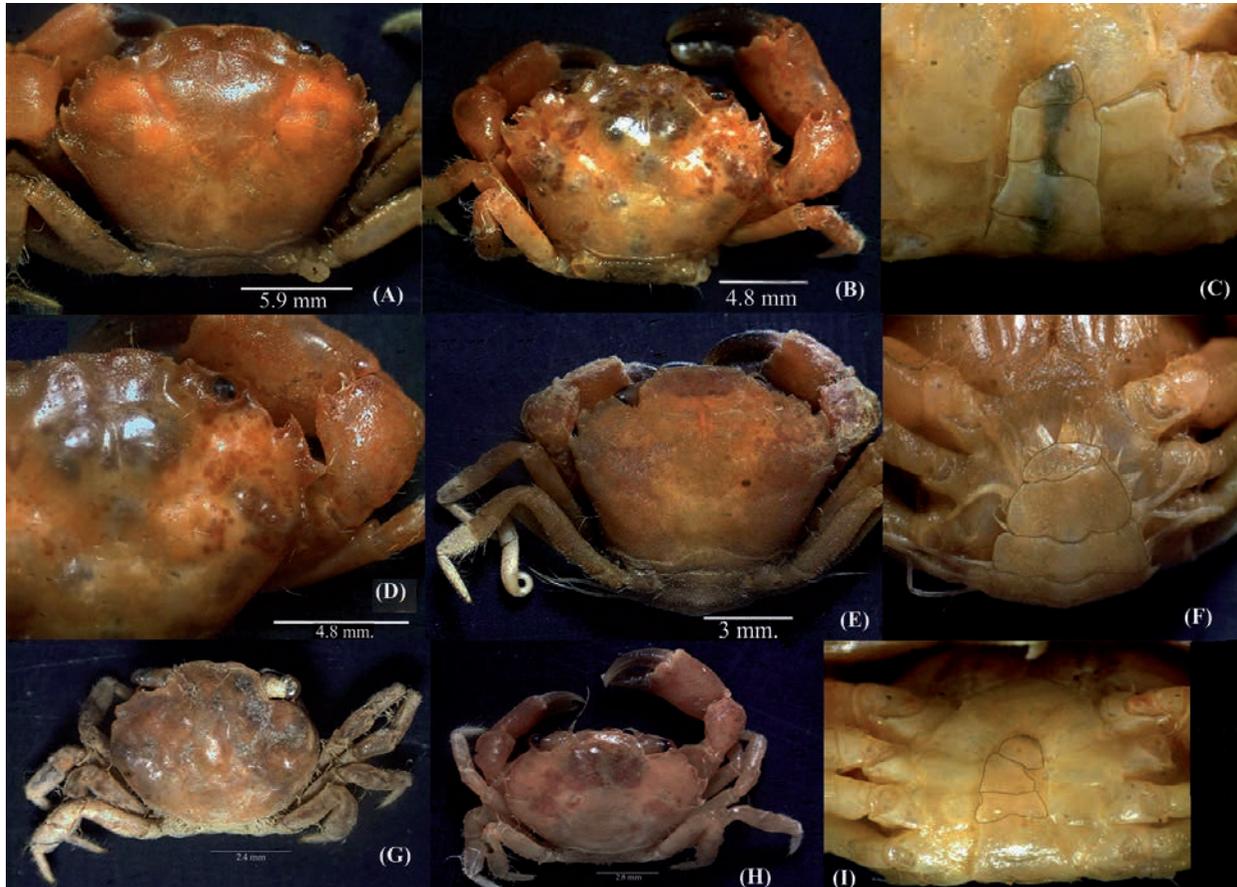


Figura 2. (A) Ejemplar de cangrejo del género *Eurypanopeus*. (B) Vista dorsal de un cangrejo de la superfamilia Xanthoidea. (C) Malformaciones en el abdomen, (D) Acercamiento a la malformación del borde anterolateral derecho del ejemplar B. (E) Vista dorsal de un cangrejo de la superfamilia Xanthoidea. (F) Acercamiento a la malformación del abdomen. (G) Ejemplar de cangrejo Xanthoidea no identificable. (H) Ejemplar de cangrejo Xanthoidea no identificable. (I) Abdomen del ejemplar H.

es característica de los cangrejos de esta superfamilia; en la figura 2I se muestran las anomalías del abdomen: los dos últimos segmentos y el telson están torcidos hacia la izquierda del cangrejo, con lo que se perdió la simetría.

El ejemplar de la figura 3A corresponde a un cangrejo del género *Eurypanopeus*, que, además de las malformaciones, presentaba necrosis en el quelípodo izquierdo (Figura 3B). Las deformaciones se observan en los dientes anterolaterales (Figura 3A): en el borde izquierdo el ejemplar presenta solo dos y el orbital externo; en el derecho se alcanzan a observar los cinco, característicos de este género, pero el segundo y el tercero aparecen reducidos, siendo ligeramente visibles. En la mano de la quela se observa necrosis de la quitina (Figura 3B), lesión probablemente causada por alguna bacteria quitinolítica perteneciente a los grupos *Flavobacter* y *Vibrio*, como se ha registrado en algunos estudios (Cobb & Castro, 2006); igualmente, el abdomen presenta modificaciones del último segmento y el telson.

El ejemplar de la figura 3C corresponde a un individuo no identificado, con malformaciones de los dientes anterolaterales, notorias sobre todo en los del borde derecho,

un crecimiento excesivo del cuarto y pérdida de los restantes, así como la malformación en las órbitas y en el borde frontal.

El ejemplar de las figuras 3D y E corresponde a un macho de *Panopeus* sp., en el que se observa malformación en los bordes anterolaterales, con el tercer y cuarto dientes del borde izquierdo convergiendo distalmente y el quinto reducido, mientras que el borde derecho presenta solo tres dientes, falta el segundo y el quinto; los restantes se presentan anchos, terminados en punta y no convergentes; el quelípodo derecho presenta necrosis; el último segmento del abdomen aparece deformado, con la mitad izquierda completamente ausente y en su reemplazo se ve una prolongación anterior del telson.

El ejemplar de la figura 3F y G es uno de los que presentó un gran número de deformidades, la mayoría de ellas en el costado derecho; hay ausencia total de los dientes; se presenta un abultamiento en la región branquial; la órbita ha desaparecido y el cangrejo no podía retraer el pedúnculo ocular; el borde anterolateral izquierdo no presenta malformaciones.

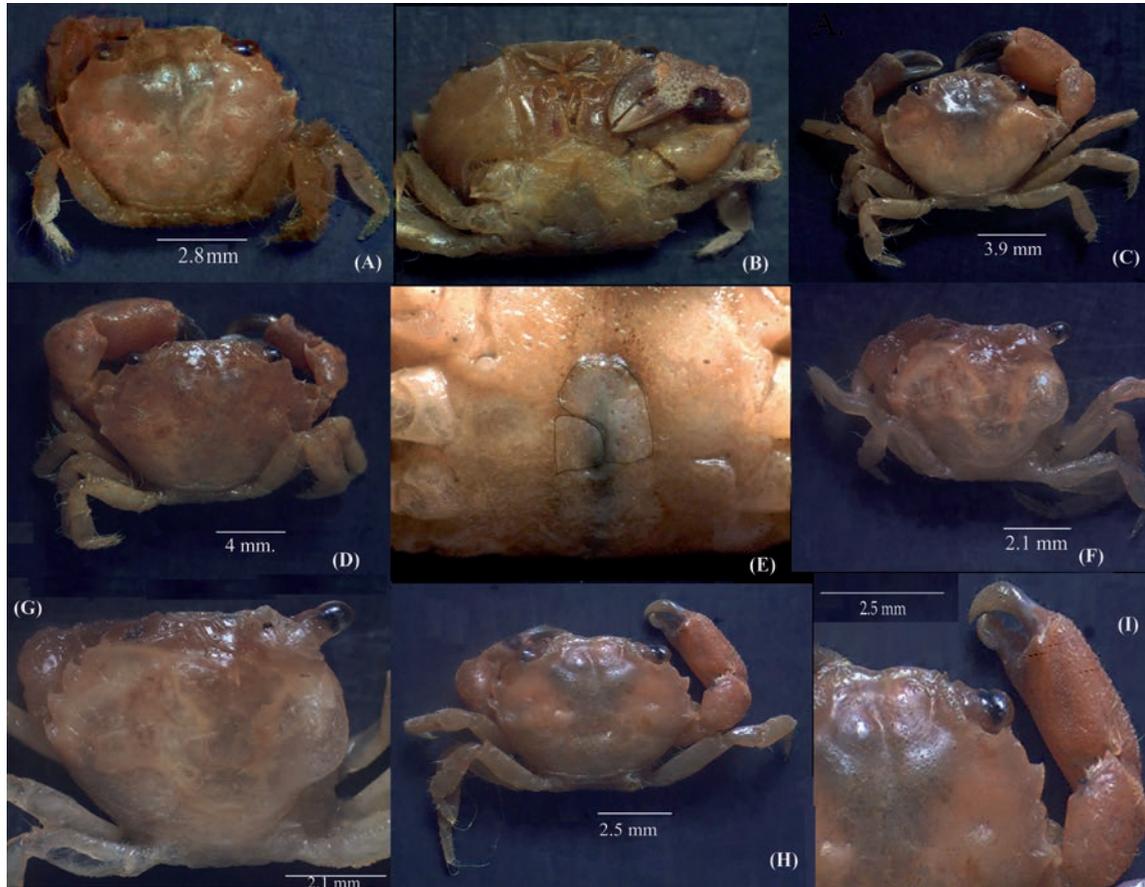


Figura 3. (A) Ejemplar de *Eurypanopeus* sp. en vista dorsal. (B) En vista ventral. (C) Vista dorsal de un cangrejo de la superfamilia Xanthoidea, no identificable. (D) Vista dorsal de *Panopeus* cf. (E) Vista ventral del abdomen. (F) Ejemplar de la superfamilia Xanthoidea no identificable, (G) Vista dorsal del ejemplar completo. (H) Ejemplar de la superfamilia Xanthoidea, (I) Acercamiento del borde anterolateral derecho y del quelípodo del ejemplar H.

El ejemplar de la figura 3H presenta malformaciones en las espinas de los dos bordes anterolaterales: deformidad del cuarto diente y reducción casi total del quinto diente en el costado izquierdo, mientras que en el derecho se observa una reducción del cuarto; además, presenta malformación en el borde frontal, a diferencia de la mayoría de los demás cangrejos que presentaban malformación en los bordes anterolaterales. La quela derecha (Figura 3I) presenta el dedo fijo más corto que el móvil y con un estrechamiento basal; el dedo móvil se asemeja al pico de un loro.

El cangrejo de la figura 4A corresponde, probablemente, a un ejemplar del género *Eurypanopeus*, varias de cuyas especies se caracterizan por presentar los dedos de la quela menor terminados en forma de cuchara, como se observa en la figura 4B. En la figura 4A se observan las múltiples malformaciones que presenta el ejemplar que, como en todos los casos, afectan principalmente los bordes anterolaterales. En este ejemplar el borde izquierdo ha perdido completamente los dientes y solo se observa un borde cristiforme, mientras que el derecho presenta solo el quinto diente y un crecimiento excesivo hasta la base

del diente postocular. El abdomen no está completamente formado, pues el borde anterolateral derecho está recortado (Figura 4B).

El ejemplar de la figura 4C presenta una pérdida de la bilateralidad, con la mitad derecha más ancha que la izquierda, al igual que atrofia de los dientes anterolaterales y en algunos casos solo es distingue la base de algunos de estos; se ve, además, deformidad del borde frontal y de las órbitas. El abdomen (Figura 4D) presenta malformación en el último segmento y expansión del telson.

En el ejemplar de la figura 4E, además de las malformaciones, se aprecia una pérdida de la bilateralidad, siendo la mitad derecha más ancha que la izquierda; además, hay malformación de los dientes anterolaterales, especialmente sobre el borde izquierdo, en el que se presenta una estructura cristiforme; en el derecho se observa una anomalía marcada de los dientes anterolaterales, con el tercero prolongándose anteriormente en una espina; igualmente, se presenta deformidad en el borde frontal orbital, con mayor inclinación hacia el costado izquierdo y una diferencia notoria entre las dos órbitas.

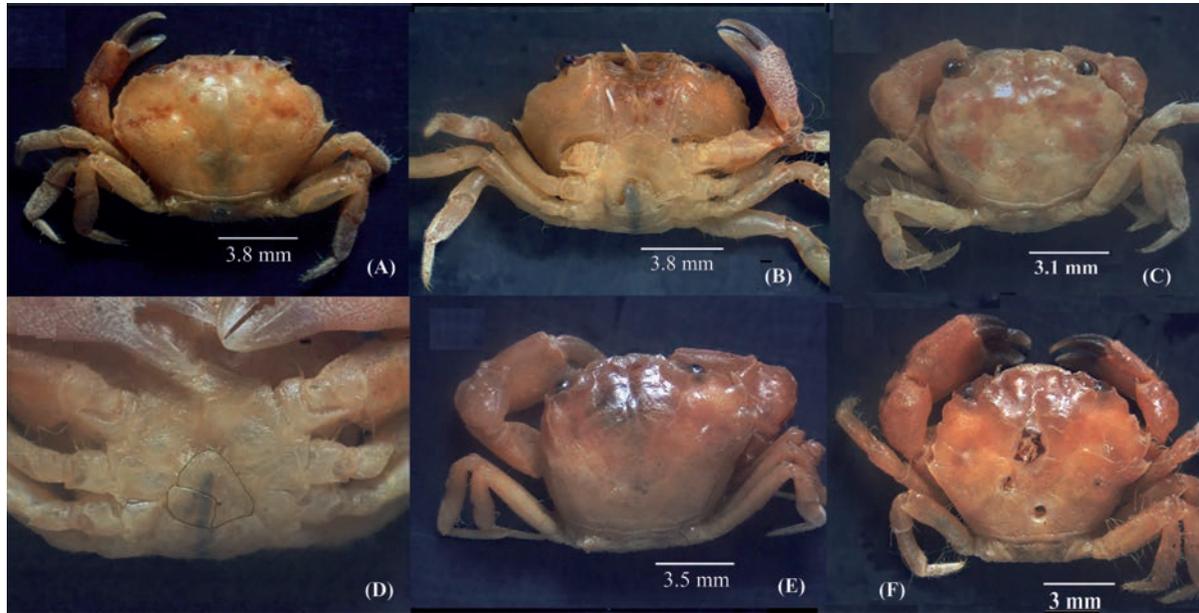


Figura 4. (A) Ejemplar del género *Eurypanopeus* cf. A. en vista dorsal. (B) En vista ventral. (C) Vista dorsal de un ejemplar de la superfamilia Xanthoidea no identificable. (D). Vista ventral, destacando el abdomen. (E) Ejemplar pertenecientes a la superfamilia Xanthoidea no es identificable. (F) *Panopeus* sp., cf., con perforaciones del caparazón.

En el ejemplar de la figura 4F, además de la pérdida de la simetría, se presenta deformidad de los dientes del borde anterolateral izquierdo, los cuales son de tamaño menor y más redondeados que los del derecho; la órbita izquierda está deforme y presenta necrosis en el caparazón, causada, probablemente, por bacterias quitinolíticas del grupo *Flavobacter* y *Vibrio*, al igual que en el ejemplar de la figura 3A.

En la tabla 1 se presenta el número de individuos con malformación por estación de muestreo y su porcentaje en relación con el número total de individuos recolectados por muestreo, así como la relación entre el periodo de muestreo y el número total de cangrejos deformes (138). El mayor porcentaje de individuos con deformidad se presentó durante el primer periodo de muestreo (junio de 2005) en la estación Punta Nisperal, con un 24,4 % de individuos deformes, seguido por el muestreo de marzo de 2006 en la misma estación, con un 11,6 % de ejemplares, pertenecientes todos a la superfamilia Xanthoidea. En esta estación los individuos con malformaciones se presentaron en tres de los cuatro muestreos, a excepción del de diciembre de 2005. Punta Nisperal fue la única estación en la que se recolectaron ejemplares deformes pertenecientes a la familia Goneplacidae durante los muestreos de junio y septiembre de 2005. Durante el muestreo de septiembre, el mayor número de cangrejos deformes se recolectó en Caño Salado.

Se recolectaron en total 138 individuos con malformaciones; en el mes de junio se recolectó el mayor número de cangrejos deformes (77 individuos, 55,8 % de ellos con malformaciones), seguido del mes de marzo (31 individuos,

22,46 % con malformaciones), en tanto que el menor número se recolectó durante el muestreo de diciembre. El 87 % de los cangrejos deformes se recolectaron en Punta Nisperal, en tanto que en cada una de las otras dos estaciones el porcentaje fue de 9 %.

En la figura 5 se resume el valor de las precipitaciones en el área durante todo el periodo de muestreo. Al comparar el periodo de mayor incidencia de malformaciones con las precipitaciones (junio de 2005), se observa una concordancia de este valor con los del incremento de las lluvias en la región, lo que se explicaría por el aumento en la descarga de sustancias contaminantes que acompaña las lluvias. El menor porcentaje de cangrejos deformes se presentó en el mes de diciembre de 2005, que corresponde a la época de disminución de las precipitaciones en la región, con el consecuente cambio en las condiciones ambientales, lo que implica menos contaminantes.

En la bahía de Cispatá se adelantó recientemente un estudio sobre la contaminación por metales pesados (**Marrugo-Negrete & Paternina-Uribe, 2011**, informe no publicado), en el que se registra la descarga en el río Sinú de diferentes metales, entre ellos el mercurio, que en su forma metal-orgánica causa teratogénesis y cáncer (**Español-Cano, 2006**).

Es importante resaltar que el alto porcentaje de malformaciones en Punta Nisperal se debe probablemente a la influencia que ejerce el caño Sicará sobre la bahía, uniendo al río Sinú con la ciénaga de Soledad para finalmente desembocar en Punta Nisperal. Entre la cabecera del caño Sicará y la ciénaga de Soledad se localizan los proyectos agropecuarios de cultivos de tilapia y camarón de Agrosoledad, en el corregimiento

Tabla 1. Se presenta el número total de individuos con deformidades, por estación y período de muestreo. CS: Caño Salado, CM: Caño Mocho, PN: Punta Nisperal; # D: Número de deformes por muestreo y estación, # T: Número total individuos por muestreo y estación, % D: Porcentaje de deformes en relación con el número total de individuos, por estación y muestreo.

Estación	Taxon	Junio/05			Septiembre/05			Diciembre/05			Marzo/06		
		# D	# T	% D	# D	# T	%D	# D	# T	% D	# D	# T	% D
CS	Xanthoidea	0	45	0	9	93	9.68	0	275	0	0	0	0
CM	Xanthoidea	6	55	10.91	0	153	0	0	108	0	3	73	4,11
PN	Goneplacidae	2	283	0.71	13	205	6.34	0	288	0	0	241	0
	Xantoidea	69	283	24.38	0	205	0	8	288	2.78	28	241	11.62
Total deformes		77			22			8			31		
% por muestreo		27.21			10.73			2.78			12.86		
% por número total deformes		55.8			15.94			5.8			22.46		

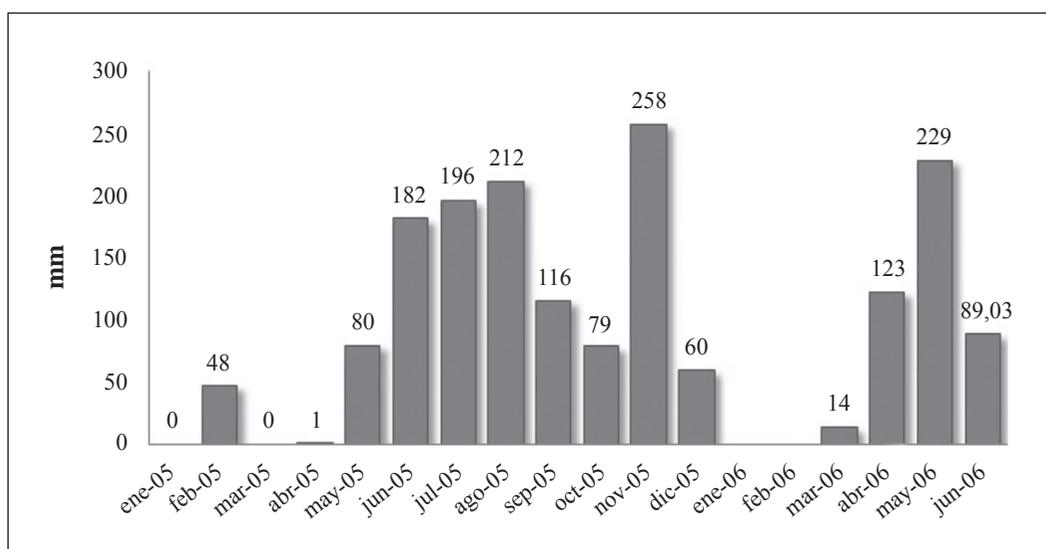


Figura 5. Precipitación mensual durante el período enero 2005 – junio 2006 (Fuente: IDEAM, 2007, estación Villa Marcela, San Antero).

de La Doctrina, y de Agrotijó, en el municipio de San Antero, los cuales drenan de la ciénaga misma (en el caso de la C.I. Agrosoledad) o tributan en ella, descargando material de desecho de diferentes cultivos en la zona de manglar.

Sanchez et al., (1997) mencionan que en 1993 la Corporación Autónoma de los Valles del Sinú y San Jorge, CVS, dentro del Plan de Ordenamiento Forestal del manglar, promueve la apertura de un canal que comunica el Caño Sicará con la Ciénaga de Mestizos, obra con la que se pretendía recuperar 20 ha de salitral. También por contrato con CVS, en septiembre de 1995 se abre otro canal que une la Ciénaga de Navío con Caño Salado, para recuperar 400 ha de salitral. Cabe recordar que estos canales son recorridos diariamente por los pescadores usando palanca y resuspendiendo material de turba.

De acuerdo con **Noga, et al., (2000)**, quienes hacen una descripción detallada de varias de las enfermedades presentes en la jaiba azul, la mayoría de las afecciones que se presentan en cangrejos, como las que se muestran en las figuras 3B (quela

derecha) y 4F (parte posterior del cefalotorax), corresponde a lesiones causadas por bacterias (lesiones melanizadas ulceradas). Estos autores enumeran 15 especies de bacterias quitinolíticas de los géneros *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Plesiomonas*, *Pseudomonas*, *Serratia* y *Vibrio*, y describen en detalle los cuatro diferentes grados de afectación; de acuerdo con **Cobb & Castro (2006)**, las lesiones en el caparazón se deben principalmente a la acción de bacterias de los géneros *Flavobacter* y *Vibrio*.

De acuerdo con **Gregati, et al., (2009)**, la gran prevalencia de malformaciones y enfermedades del caparazón en crustáceos está asociada con el estrés ambiental, la acuicultura intensiva y la contaminación del medio; además, sostienen que la mayoría de las afectaciones ocurren durante el período de la muda.

En la figura 6 se presentan los contenidos totales de mercurio medidos por **Marrugo-Negrete & Paternina-Urbe (2011)** en sedimentos de las áreas de muestreo. Estos

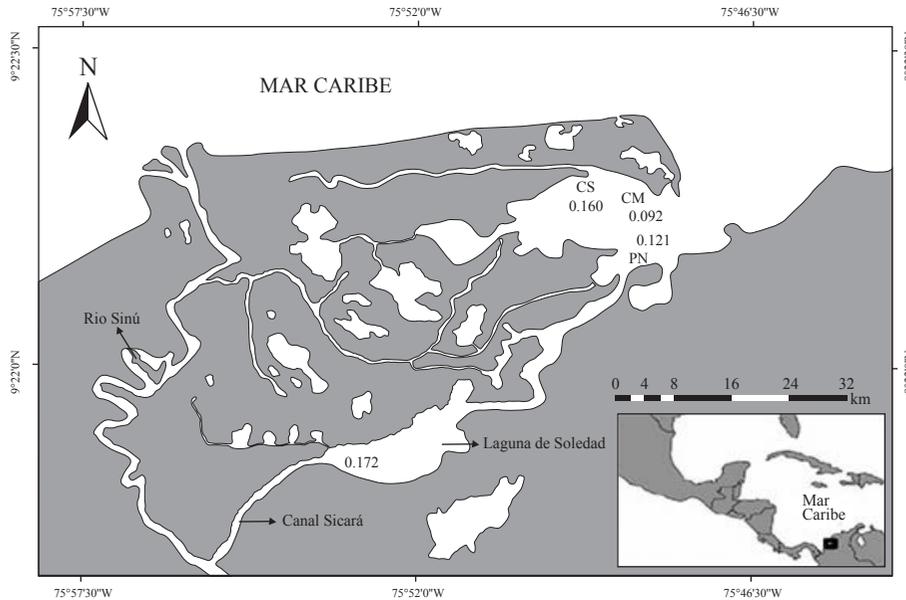


Figura 6. Contenidos de mercurio en sedimentos en la Bahía de Cispatá, en las estaciones de recolección de cangrejos deformes. (Modificado de Marrugo y Paternina, 2011).

autores registraron concentraciones entre 0,092 y 0,172 mg/kg de sedimento seco, igualmente determinaron contenido elevado de otros elementos como cobre (30,54 a 53,24 mg/kg), cromo (11,87 a 22,64 mg/kg) y plomo (0,11 a 0,19 mg/kg). Se debe anotar que tanto el mercurio como el plomo forman compuestos organometálicos cuya toxicidad puede afectar múltiples procesos metabólicos en los organismos expuestos.

Los valores determinados por **Marrugo-Negrete & Paternina-Uribe** (2011), se encuentran por debajo de los reportados en diferentes partes del mundo, como los encontrados en la bahía Alemana, en Alemania, que fluctúan entre 0,2 y 1,6 ppm (**Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen**, 1980).

Iannacone & Alvariño (2003) determinaron el efecto tóxico del mercurio sobre las larvas del cangrejo topo *Emerita analoga*, sin embargo, dicho estudio no registró los efectos subletales, pues su objetivo era determinar las dosis letales. Las concentraciones usadas por estos autores son superiores (entre 14,2 y 7,48 $\mu\text{g/l}$ a las 48 y 96 horas, respectivamente), a las registradas por **Marrugo-Negrete & Paternina-Uribe** (2011). En general, los efectos subletales se presentan en los momentos más sensibles del ciclo de vida de los cangrejos, como son los estadios postlarvales o en periodos de muda. Esto explicaría por qué las malformaciones se presentan con mayor frecuencia en cierto período del año.

Con base en las observaciones hechas, se concluye que el mayor porcentaje de cangrejos deformes se presentó en la estación Punta Nisperal. Este porcentaje se determinó en el muestreo de junio de 2005, periodo en el cual se observó un incremento de las lluvias, lo que aumentó la escorrentía.

Dicha estación está influenciada directamente por las descargas del río Sinú a través del caño Sicará. La descarga de mercurio se da por esta vía y constituye una posible causa de teratogénesis.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Agradecimientos

El proyecto FCB-14-04 fue financiado por el Centro de Investigaciones de la Universidad de Córdoba (CIUC) y contó con el apoyo del CECIMAR (contribución No. 411) y la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia. Agradecemos a A. Merchán por la revisión del documento.

Bibliografía

- Álvarez-León, R., Mendoza, L. A., Vernet, G.** 2003. Factores de formación de las lagunas costeras del suroeste del Caribe colombiano. *Acta Cient. Venez.* **54** (3): 180 – 188.
- Campos, N. H.** 1999. Interacción de las comunidades de crustáceos decápodos asociados a tres hábitats vegetales en la Bahía de Chengue, Caribe Colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **23**: 575-582.
- Campos, N. H., Navas, G., Bermúdez, A., Cruz, N.** 2005. Los crustáceos decápodos de la franja superior del talud continental (300 – 500 m) del mar Caribe colombiano. *Monografías de fauna de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Instituto de Ciencias Naturales.* 272 p. ISBN: 958 – 701 – 585 – 1.
- Campos, N. H., Navas, G. R., Bermúdez, A.** 2010. Riqueza y distribución geográfica de los crustáceos decápodos del Mar Caribe colombiano, 83 – 99. En Campos, N. H., A.

- Acero y J. E. Mancera (Eds.). Cuadernos del Caribe No. 14. Contribuciones en Ciencias del Mar en Colombia, La Investigación en Ciencias del Mar de la Universidad Nacional de Colombia, 30 años de la Biología Marina, Gráficas Ducal Ltda., Bogotá, D. C., 146 p.
- Castaño, A., Urrego, L., Bernal, G.** 2010. Dinámica del manglar en el complejo lagunar de Cispatá (Caribe colombiano) en los últimos 900 años. *Rev. Biol. Trop.*, **58** (4): 1347-1366.
- Cobb, J. S. & K. Castro, M.** 2006. Shell disease in lobsters: A synthesis. Fisheries Center, University of Rhode Island, USA. 18 p.
- Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen.** 1980. Umweltprobleme der Nordsee. Verlag Koglhhammer GmBh, Stuttgart. 503 p.
- Dueñas, P. R., Campos, N. H., Quirós, J. A.** 2012. Los crustáceos decápodos del departamento de Córdoba, Colombia. Ed. Académica Española, Saarbrücken, 258 p.
- Español-Cano, S.** 2006. Toxicología del mercurio: 60-127. En: Academia Nacional de Medicina (E). Seminario internacional sobre clínica del mercurio. Memorias. Editorial Kimpres Ltda. Bogotá, D. C. 260 p.
- Estela, F. & López-Victoria, M.** 2005. Aves de la parte baja del río Sinú, Caribe colombiano: inventario y ampliaciones de distribución. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, **34**: 7-42.
- Gregati, R. A. & Negreiros-Fransozo, M. L.** 2009. Occurrence of shell disease and carapace abnormalities on natural population of *Neohelice granulata* (Cruatacea: Verunidae) from a tropical mangrove forest, Brazil. *Mar. Biod. Rec.*, 2; e60, Publicado en línea: 1-3. Consultada el 28 de octubre de 2014. http://www.vims.edu/research/departments/eaah/programs/crustacean/research/lobster_shell_disease/Lobster-Project-Resources/Publications/Lobster-pdf-files/2009%20Gregati%20and%20Franzoso%20shell%20disease%20and%20carapace%20deformities%20in%20neohelice.pdf
- Ianncone-Oliver, J. A. & Alvaríño-Flores, L.** 2003. Efecto ecotoxicológico agudo del mercurio sobre larvas del “Muy Muy” *Emerita analoga* (Stimpson) (Decapoda: Hippidae) procedentes de cuatro localidades de Lima. *Ecol. Aplic.*, **2** (1): 111-115.
- Lira, C., Hernández, G., Bolaños, J. A.** 2003. Un caso de malformación en *Pachycheles serratus* (Decapoda: Pordellanidae) *Rev. Biol. Trop.* 51, Supl. 4: 149-151.
- Marrugo-Negrete, J. L. & Paternina-Urbe, R.** 2011. Evaluación de la contaminación por metales pesados en la Ciénaga La Soledad y Bahía de Cispatá, cuenca del bajo Sinú, Departamento de Córdoba. Informe final, Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Química. 121 p.
- Noga, E. J., Smolowitz, R., Khoo, L. H.** 2000. Pathology of shell disease in the blue crab, *Callinectes sapidus* Rathbun, (Decapoda, Portunidae). *J. Fish Diseases.* **23**: 389-399.
- Quirós, J. A. & Campos, N.H.** 2010. Dinámica espacial de crustáceos decápodos asociados a céspedes algales en el departamento de Córdoba, Caribe colombiano. *Acta Biol. Colomb.* **15** (3): 89-104.
- Quirós, J. A., Dueñas, P. R., Campos, N. H.** 2012. Crustáceos decápodos asociados a ensamblajes macroalgales en el litoral rocoso de Córdoba, Caribe colombiano. *Rev. MVZ Córdoba* **17** (1): 2834 - 2845.
- Rangel-Churrio, O.** 2004. Caracterización de la fauna y flora de los humedales cordobeses. Informe final, Convenio interadministrativo entre la Corporación Autónoma de los Valles del Sinú y San Jorge y la Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales.
- Rathbun, M.** 1930. The cancroïd crabs of America of the family Euryalidae, Portunidae, Atelecidae, Cancridae and Xanthidae. Smithsonian Institution. United States National Museum Bulletin, Washington, 508 p.
- Sánchez, H., Álvarez-León R., Pinto F., Sánchez A. S., Pino J. C., García I., Acosta M. T.** 1997. Diagnóstico y zonificación preliminar de los manglares del Caribe de Colombia. En: H. Sánchez y R. Álvarez-León Eds., Ministerio del Medio Ambiente, Proyecto PD/171/91 REV 2 (F) Fase 1, Organización Internacional de Maderas Tropicales, OIMT. Bogotá, D.C., 511 p.
- Williams, A.** 1984. Shrimps, Lobsters and Crabs of the Atlantic Coast of the Eastern United States. Maine to Florida. Smithsonian Inst. Press. 18, 550 p.

Morfotectónica de la falla Abriaquí y sismicidad histórica asociada con el sismo de 1903 en Frontino, Antioquia

Santiago Noriega-Londoño^{1*}, José Humberto Caballero-Acosta²

¹Departamento de Materiales y minerales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

²Departamento de Geociencias y medio ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Resumen

En el sistema orogénico de los Andes del Norte se han desarrollado importantes fallas activas que revelan un grado moderado a alto de amenaza sísmica en el borde noroccidental de Colombia. Este estudio presenta un análisis morfotectónico que señala la ocurrencia de deformaciones recientes a lo largo de la falla Abriaquí e introduce nuevos datos de sismicidad histórica que permiten la atribución preliminar del sismo de 1903 en Frontino a esta estructura, y ubica la edad de su último desplazamiento en periodos históricos.

Palabras clave: Frontino, sismicidad histórica de Colombia, falla Abriaquí, morfotectónica, neotectónica, Antioquia.

Morphotectonics of the Abriaquí fault, historical seismicity and their relation with the 1903 earthquake in Frontino, Antioquia

Abstract

Major active faults have developed in the North Andean orogenic system that reveal moderate to high seismic hazard in the northwestern border of Colombia. This study presents a morphotectonic analysis of recent deformations along the Abriaquí fault and introduces new historical seismicity data that allows for preliminarily assigning the 1903 earthquake in Frontino to this structure, and modifying the age of its last displacement to historical time periods.

Key words: Frontino, historical seismicity of Colombia, Abriaquí fault, morphotectonics, neotectonics, Antioquia.

Introducción

Este artículo presenta los resultados parciales del proyecto “Evidencias preliminares de tectónica activa entre la cuenca media del Río El Cerro y la vereda El Chuscal, Frontino - Antioquia, Cordillera Occidental”, desarrollado por medio del programa de Jóvenes Investigadores de Colciencias - 2012. Se exponen, específicamente, nuevos datos tanto de sismicidad histórica como de morfotectónica, los cuales permiten reevaluar las condiciones neotectónicas de la falla Abriaquí.

El objetivo del estudio consistió en revisar y actualizar la base de datos de sismicidad histórica en el occidente colombiano, en particular lo relativo al evento de 1903, y contrastarla con los resultados del análisis morfotectónico de la falla Abriaquí, la cual no ha sido considerada hasta ahora como una estructura potencialmente sismogénica. Se presentan nuevos datos neotectónicos a escala local que permitan refinar el catálogo de fallas y pliegues cuaternarios de Colombia y actualizar las bases de datos de evaluación de amenaza sísmica en el occidente colombiano.

La falla Abriaquí es una estructura transpresiva de aproximadamente 34 km de longitud, de componente sinistral/inversa, que se extiende al suroccidente del municipio de Frontino con tendencia principal en sentido N50°O que varía

a NNO en el tramo norte. Esta falla posee una expresión geomorfológica bien definida, representada por silletas, escarpes y corrientes deflectadas. Page (1986) reporta deformaciones en depósitos cuaternarios que reposan sobre esta estructura, y le asigna un grado de actividad moderado con tasas de desplazamiento entre 0,2 y 1,0 mm/año y edades por debajo de 1,6 Ma para el último movimiento. Además, en el área de influencia de esta estructura se han reportado sismos históricos importantes, como el de 1903, el cual generó daños graves en el municipio de Frontino, aunque en los municipios vecinos los efectos fueran considerablemente menores, lo que indica, quizá, el carácter local y superficial del evento.

Los resultados obtenidos sugieren que la falla Abriaquí ha tenido desplazamientos más recientes, ocurridos al menos en el Holoceno, y que probablemente el sismo de 1903 se produjo sobre esta estructura, lo cual plantea su relevancia en términos sismogénicos; sin embargo, se hace necesario diseñar y ejecutar campañas de exploración paleosismológica que permitan estimar con un mayor grado de detalle la historia sísmica de esta falla.

*Correspondencia:

Santiago Noriega Londoño; santiagoel@gmail.com

Recibido: 6 de agosto de 2014

Aceptado: 16 de febrero de 2015

Marco geotectónico

El borde noroccidental de Colombia se sitúa en un complejo sistema orogénico de edad Meso-Cenozoico conformado por eventos sucesivos de acreción de bloques y terrenos exóticos involucrados en el régimen compresivo de las placas de Nazca-Farallones, Caribe y Suramérica, y de los bloques Panamá-Chocó (BPC) y Norandino (BNA).

El proceso de acreción y engrosamiento de la margen puede establecerse desde finales del Cretáceo, en principio por efecto de la migración de la placa Caribe en sentido NNE (Kennan & Pindell, 2009; Cediel, et al., 2011); esta fase está representada por el plegamiento y la formación de fallas dextrales en sentido NS dentro del grupo Cañasgordas, como las fallas San Ruperto y Portachuelo. Un segundo evento importante corresponde a la partición de la placa Farallones hacia el Mioceno medio (Chicangana, 2005; López, et al., 2006), indicado una variación del régimen tectónico con un vector de deformación en sentido OE, que coincide con el acercamiento y posterior acreción del BPC y la placa Nazca.

El evento geodinámico más relevante, generador del régimen tectónico dominante en el presente, corresponde a la colisión del bloque BPC con el bloque BNA hacia finales del Mioceno (Duque-Caro, 1990; Taboada, et al., 2000; Vargas, et al., 2002; Vargas & Mann, 2013), lo que dio lugar al último pulso de la orogenia andina (fase Eu-andina, Van der Hammen, 1960). De esta forma, la indentación

tectónica del BPC sobre el BNA constituye el evento geodinámico del cual se deriva el marco neotectónico del noroccidente colombiano.

Marco geológico y tectónico

La configuración geológica del occidente colombiano comprende una serie de unidades litotectónicas de afinidad oceánica que han sido acrecionadas a la margen oriental del BNA a lo largo del periodo Meso-Cenozoico (Restrepo & Toussaint, 1988; Cediel, et al., 2011). Las rocas oceánicas se agrupan en dos grandes bloques (Figura 1). El primero corresponde a ofiolitas desmembradas e intensamente deformadas de edad cretácica que conforman el grupo Cañasgordas, mientras que el segundo corresponde a un arco de islas oceánico compuesto por el batolito de Mandé y el complejo Santa Cecilia – La Equis, que constituyen el borde oriental del BPC. Estos bloques se encuentran en contacto por la falla de Dabeiba-Pueblo Rico (Figura 2), la cual se prolonga al norte y toma el nombre de falla Uramita, en tanto que en el extremo oriental se encuentra intruida localmente por pequeños cuerpos plutónicos correspondientes al cinturón magmático del Mioceno medio, el cual se extiende a lo largo del eje de la Cordillera Occidental. Por último, en el fondo de los valles se han concentrado espesos depósitos aluviales y aluviotorrenciales de edad cuaternaria, cubriendo parcialmente estructuras geológicas como las fallas Abriaquí, Murri-Mutatá y San Ruperto, entre otras.

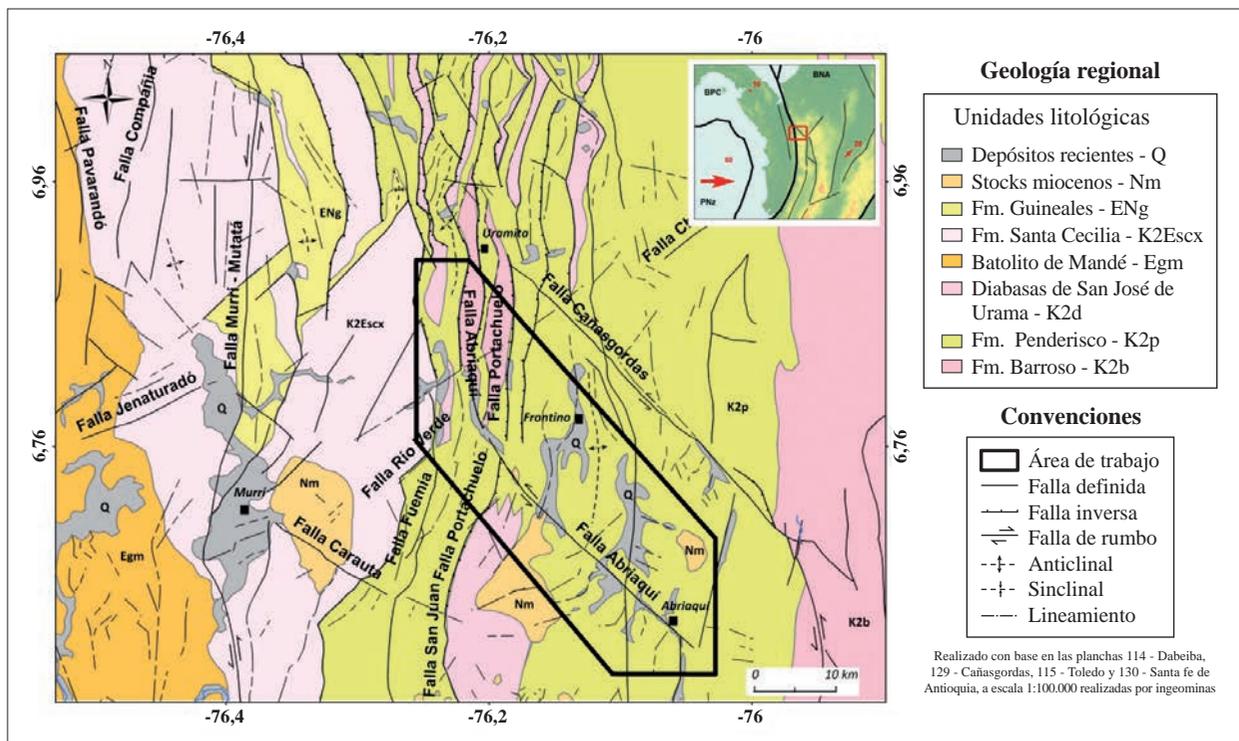


Figura 1. Geología regional y tectónica del área de estudio. Modificado de la cartografía geológica de Ingeominas a escala 1:100.000. Planchas 114 – Dabeiba y 129 - Cañasgordas

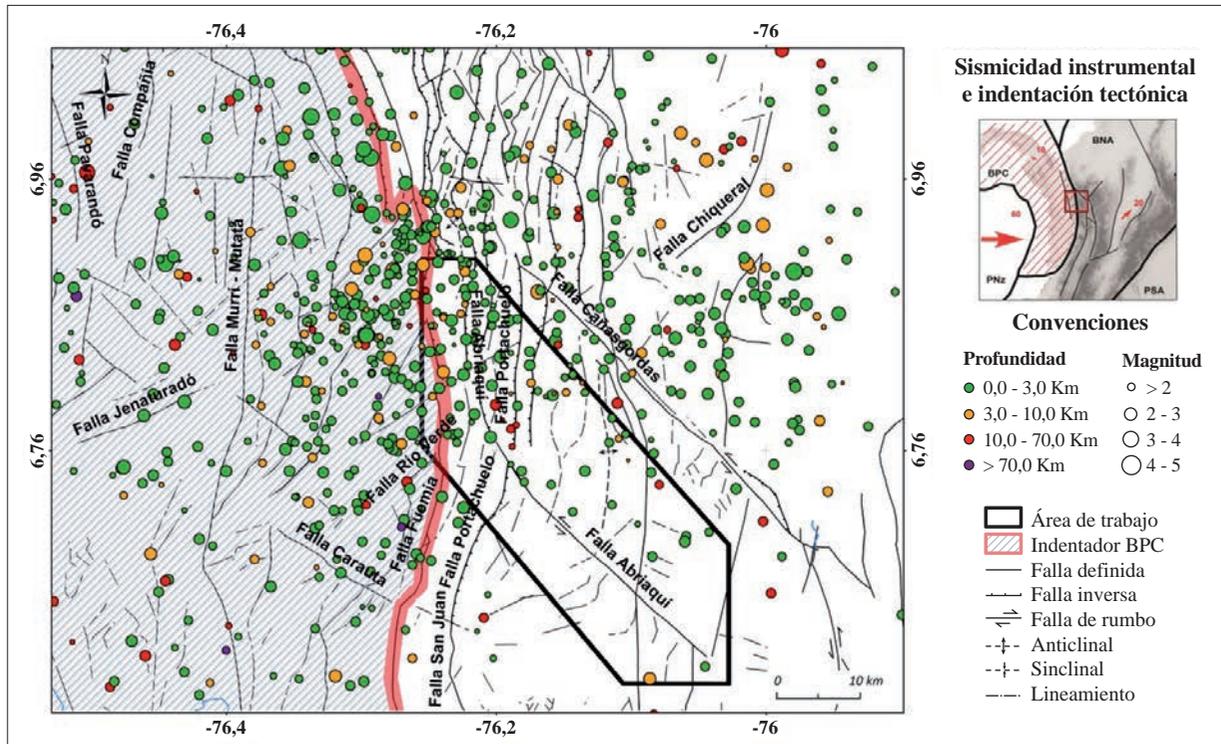


Figura 2. Contexto geodinámico del área de estudio, sismicidad instrumental y esquema de indentación tectónica

La deformación frágil existente en la zona, derivada de las fases finales de acreción, viene definida por lineamientos y sistemas de fallas sinistralas de orientación NO y componentes inversos, y por fallas inversas de orientación NS. Entre las primeras se incluyen las fallas Abriaquí y Cañasgordas, y fallas menores como las de Portachuelo y Morrogacho en la zona occidental y las de Arma y La Mansa en el extremo oriental. Las estructuras de orientación NS, por su parte, vienen representadas por los sistemas de fallas de Cauca-Romeral, Herradura-San Ruperto, Portachuelo, Dabeiba-Pueblo Rico, Murrí-Mutatá y Murindó, que generalmente exhiben un comportamiento predominantemente inverso con componente lateral izquierdo.

Las relaciones temporales de estos dos sistemas indican que las fallas de orientación NO constituyen las estructuras más recientes, puesto que desplazan y controlan la deformación de las fallas NS, como lo sugiere el desplazamiento de la falla Portachuelo por la falla Abriaquí, observado directamente en campo, y la deformación de fallas cretácicas en cercanías del sistema Cauca-Romeral en respuesta a la colisión del BPC (López, et al., 2006; Ramírez, et al., 2012), mientras que las fallas de orientación NS, sufren una reactivación e inversión como respuesta al evento de acreción tardío.

Materiales y métodos

El problema planteado se abordó mediante la aplicación de marcadores morfotectónicos y el análisis de registros de sismicidad histórica. Las características morfotectónicas

y las áreas de deformación reciente o activa a escala local se obtuvieron mediante la aplicación de técnicas de fotointerpretación geológica en una escala de 1/10.000, cartografía geológica en escalas de 1/20.000 y 1/3.000, análisis de capas de altitud, pendiente y aspectos extraídas del STRM (*Shuttle Radar Topography Mission*), con resolución de 30 m a lo largo de la falla Abriaquí, y perfiles topográficos extraídos del modelo digital de elevaciones (MDE) mediante un sistema de información geográfica ArcGIS 10.0. A escala local, se realizaron perfiles longitudinales usando un GPS Garmin con error promedio de ± 3 metros para cada punto medido. Al mismo tiempo, en el análisis de la sismicidad histórica se siguió la metodología clásica de Ingeominas, consistente en la revisión de archivos históricos que, en este caso, reposaban en la casa de la cultura y en el despacho parroquial del municipio de Frontino; la evaluación macrosísmica apoyada en los análisis de Cifuentes & Sarabia (2009) para el evento de 1903, y la estimación de parámetros sismológicos como la localización epicentral, la magnitud y la profundidad, así como los datos de sismicidad instrumental suministrados por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) para un periodo de 20 años entre 1993 y 2013. Esta información se analizó y luego se integró mediante el sistema de información geográfica para establecer relaciones espaciales entre las variables. Por último, se incluyeron relaciones entre modelos análogos de indentación tectónica y los datos disponibles en la literatura científica relacionada con la colisión del BPC.

Resultados

Sismicidad histórica

Al enfrentar el estudio de la neotectónica desde la perspectiva de la sismicidad histórica es necesario partir de las dos premisas señaladas por **Espinosa** (2003): i) la sismicidad colombiana es principalmente preinstrumental, por lo tanto, la inclusión de los catálogos históricos se convierte en una herramienta indispensable, y ii) la identificación de fuentes sísmicas es efectiva mediante la superposición de epicentros y fallas activas.

Los registros de sismicidad histórica disponibles indican la ocurrencia de sismos sentidos en el noroccidente colombiano en los años de 1792, 1888, 1903, 1952, 1981, 1987 y 1992, (**Ramírez**, 1975; **Arias & Tejada**, 1987; **Caballero**, 1991; **Velásquez, et al.**, 1993), entre los cuales el evento de 1903 reporta los efectos más notables en el municipio de Frontino, con alteraciones en el relieve y daños directos sobre la población, por lo que el análisis de sismicidad histórica se concentra particularmente en dicho evento.

Para este evento en particular, **Ramírez** (1975) reporta que:

“... el movimiento fue al principio vertical y luego fuertemente horizontal en Frontino, donde fue el epicentro; las tejas cayeron de los techos y hubo muchas grietas en los muros. Volvió a repetirse a las 9 am produciendo daños y pánico.”

White (1959), por su parte, indica que:

“Se experimentaron dos de aquellos movimientos, los cuales podemos llamar locales, pues su epicentro estuvo dentro de la serie de cordilleras formadas por el Plateado de El Cerro, el Cerro de Muzinga [sic], de 3800 mtrs. de altura sobre el nivel del mar, Morro Pelado, el Cerro de La Horqueta, el Páramo de Frontino y los cerros de El Paramillo, Tres Morros y el León por el lado norte. Más allá de estos lugares, los sismas [sic] fueron imperceptibles salvo uno o dos casos. (...)...algunos de esos movimientos fueron verticales, y de allí que en terrenos casi planos se viera la superficie de la tierra invertida, es decir que el golpe hacia arriba en algunas partes fue tal, que lanzo [sic] la tierra hacia el espacio volviendo a caer invertida sobre la superficie. (...)...en el valle de Musinga, dos leguas distante de Frontino, en la casa de dos labriegos de apellido Londoño, uno de los temblores de oscilación vertical lanzara hacia arriba una de las piedras de moler maíz y la hiciera caer sobre la otra con el consiguiente estrepito.”

Góez de Gaviria, (198?), reporta en sus “Apuntes para la Historia de Frontino” lo siguiente:

“En la historia de Musinguita se vivieron dos momentos de tragedia y pánico. Uno de ellos fue la explosión de un volcán que los viejos llamaron “Eclipse” (...) El eclipse sucedió en 1903. La tierra tembló durante 40 días. Los pocos habitantes huyeron a Frontino por temor a las grietas

que se abrían en la tierra. (...) Fue tal el susto que algunos siguieron huyendo hasta llegar a Medellín y aun allí sentían los temblores bajo la tierra que pisaban. Algunos jamás regresaron. (...).

“1903. Diciembre 3. Empezó en esta fecha una serie de temblores que aumentaban en intensidad y en violencia durante el día y la noche, por espacio de doce días, los que hicieron emigrar las gentes hacia otras ciudades, dejando abandonadas sus casas, sus pertenencias, sus animales. (...) No hubo ninguna explicación científica para estos temblores, pues en ninguna otra parte se sintieron. Parece que el epicentro de estos fue “El Chuscal”.

Suárez (1989) relata en su obra “Nuestra Antioquia. La región de occidente, reseñas municipales”, algunos de los efectos de este sismo:

“El nuevo siglo dio comienzo con el surgimiento de las actividades sísmicas en la zona de Frontino. Al amanecer del 2 de diciembre de 1903, se produjo un fuerte movimiento telúrico y la población quedó aislada por los aludes que estancaron los ríos, formando grandes lagos. Los caminos se bloquearon con grandes derrumbes y las fuertes corrientes de agua, cargadas de piedras y maderas arrazaron [sic] todo aquello que encontraban a su paso (...).”

Ospina (1904), en **Cifuentes & Sarabia** (2009), reporta:

“El 1° del presente mes, como a las 8 a.m., un movimiento brusco de la tierra, unido al estruendo de algo que se derrumbaba (...).

“El primer movimiento fue del tipo llamado vertical o explosivo, con leve oscilación hacia el Este, como lo revela la caída al suelo de frascos, botellas y otros objetos que se hallaban en los estantes de los costados septentrional y meridional de casi todas las tiendas.

“(...) Entre los fenómenos raros de este tercer sacudimiento se cuenta el haber volado los corchos de muchas botellas (probablemente las que contenían licores fermentados o efervescentes) sin que, en varios casos, rodaran al suelo aquellas. Esto confirma más y más la noción de que el movimiento fue esencialmente vertical (...).

“Lo ocurrido en Frontino, aunque tan alarmante, fue poco en comparación de lo que pasaba en el Valle de Musinga, a una legua del pueblo. (...) Es evidente que allí se hallaba el centro de los sacudimientos y por eso fueron más notables la dirección vertical y la intensidad de las vibraciones. (...) Al mismo tiempo aparecieron en la tierra grietas más o menos considerables”.

El estudio macrosísmico del evento de 1903 hecho por **Cifuentes & Sarabia** (2009) reporta que las réplicas de este evento se sintieron en Cañasgordas, Heliconia, Santa Fe de Antioquia y en Medellín, con efectos menores e imperceptibles en lugares más alejados, lo que indica que se trató de un sismo local. Por otro lado, estos autores coinciden

en asignarle intensidades de VII en la escala de Mercalli modificada, acordes con los daños y efectos reportados en el registro histórico.

Como se puede notar en los textos citados, no hay claridad en cuanto a la fecha exacta del evento. Esto puede indicar la ocurrencia de diversos eventos sísmicos importantes, sin embargo, se presume que tales variaciones están asociadas a la naturaleza propia de los registros históricos, de manera que muy probablemente todos los reportes se refieren al evento principal, pues la mayoría de los autores reportan el sismo para el día 1 de diciembre de 1903.

Morfotectónica de la falla Abriaquí

Las características morfológicas más relevantes a escala local permiten segmentar el trazo de la falla Abriaquí en tres tramos principales definidos por su geometría, la ocurrencia de índices morfométricos y el estilo de deformación.

El tramo norte de la falla Abriaquí posee una orientación de NS a ligeramente NNO, un buzamiento hacia el este y un movimiento predominantemente inverso, delimitando la parte occidental de la cuenca de la quebrada Nobogá. La proyección de la falla hacia el norte es incierta debido a la ocurrencia de trenes de fallas de cabalgamiento que se extienden hasta Dabeiba. Sobre este tramo los elementos morfotectónicos más representativos corresponden a bermas y silletas de falla, peldaños, escarpes escalonados y drenajes alineados.

El tramo central posee una orientación predominante en sentido NNO, un buzamiento subvertical hacia el este, con componente inversa/sinistral, y se extiende desde el lineamiento de Nutibara en el extremo norte hasta la parte alta de la quebrada Cenizas en la extremo sur, controlando parte del río Musinga. Se caracteriza por la presencia de extensos y marcados escarpes a lo largo de la falla Abriaquí, separados localmente por lomos y peldaños que alcanzan

hasta 250 metros de altura; además, las silletas de falla y las facetas triangulares muestran sus mejores expresiones en este tramo (Figura 3). También se identificaron filos deflectados sobre ambos márgenes de la falla Abriaquí, lo que corrobora los desplazamientos sinistral.

Sobre este tramo, en la vereda Sincerín, se identificaron abanicos aluviotorrenciales que cubren parcialmente el trazo de la falla Abriaquí y desarrollan lomos de presión con muy buena expresión en superficie, producidos por el cruce transversal de la falla sobre flujos de lodos y escombros (Figura 4). La forma elongada del lomo de presión responde a la deformación transpresiva que genera contrapendientes a lo ancho del depósito, presentando una deformación muy bien definida sobre materiales no consolidados de edad reciente, que sugieren que la falla Abriaquí ha tenido actividad tectónica reciente, probablemente en el Holoceno. Un perfil topográfico longitudinal del abanico aluvial permite observar la expresión morfológica del lomo de presión (Figura 5), así como las variaciones en la pendiente inducidas por la falla Abriaquí, que alcanzan un desplazamiento vertical de aproximadamente 5 metros; sin embargo, no es posible medir la componente lateral del desplazamiento y, por lo tanto, el desplazamiento medido es aparente. Para este punto en particular la deformación de abanicos aluviales, de edad presumiblemente cuaternaria, es evidente y consecuente con el estilo de deformación de la falla Abriaquí, la cual posee al menos dos trazos subparalelos que configuran bloques tectónicos de escala métrica. Estos bloques, al estar sometidos a un campo compresivo con orientación predominante OE, levantan y deforman los depósitos recientes que allí descansan.

Debido a la naturaleza de los flujos no se obtuvo un registro estratigráfico de la deformación con el cual se pudieran estimar los desplazamientos o eventos sísmicos ocurridos en el pasado con un mayor grado de detalle, y se hace



Figura 3. Sector central de la falla Abriaquí. **a)** Vista panorámica de la traza en sentido NNO. **b)** Marcadores morfotectónicos asociados al cruce transversal de la falla Abriaquí sobre depósitos aluviales en el sector de Sincerín y la quebrada El Silencio

necesario diseñar técnicas que permitan refinar los datos, como por ejemplo, campañas de exploración geofísica y paleosismológica.

Algunos recorridos de los drenajes incisos en el abanico no muestran deformación en los depósitos aluviales más superficiales y por ende, más recientes; sin embargo, se

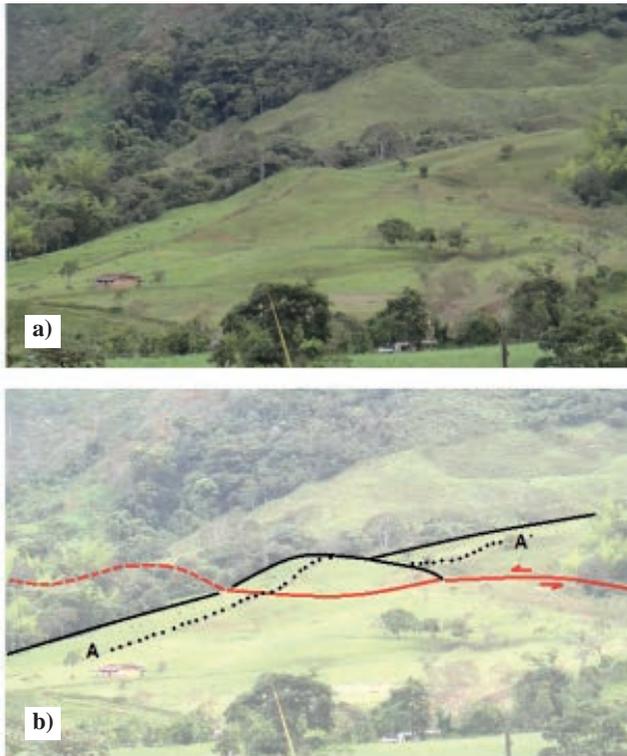


Figura 4. Deformación de abanicos aluviales. **a)** Lomo de presión sobre abanico aluvial. **b)** Localización del perfil A-A' de la figura 5

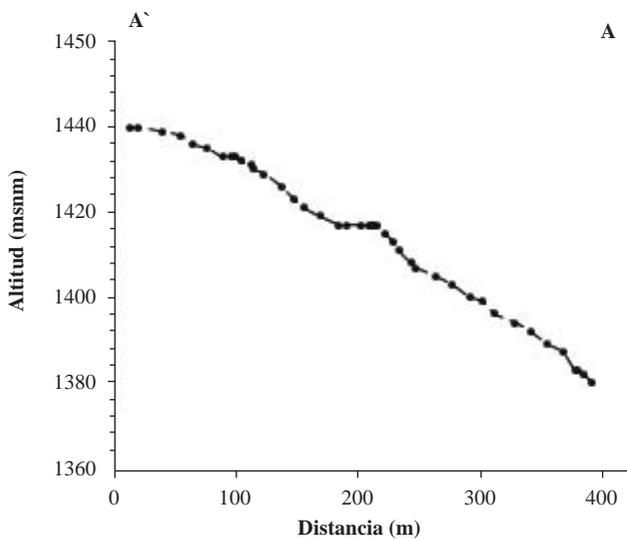


Figura 5. Perfil longitudinal A-A', a lo largo del abanico aluvial. Nótese la expresión topográfica del lomo de presión.

notaron desplazamientos laterales de las corrientes en sentido sinistral, probablemente por reacomodación del sistema de drenaje a las deformaciones inducidas y no por un desplazamiento real en el cauce de los tributarios.

Hacia el extremo norte del abanico, donde se localiza la parte baja de la quebrada El Silencio, no se registran deformaciones en los sedimentos superficiales, probablemente debido a la mayor carga y deposición de material aluviotorrencial; sin embargo, esta microcuenca presenta características morfotectónicas anómalas, ya que a pesar de pertenecer a la cuenca del río Musinga, su cabecera se localiza en una superficie subhorizontal contigua a la de la quebrada Nobogá, y está aislada del resto de la cuenca, cruzando transversalmente el trazo principal de la falla Abriaquí (Figura 6a).

Con base en los datos morfotectónicos de dicha cuenca, dos elementos principales marcan el desplazamiento reciente de la falla Abriaquí. El primero corresponde al perfil longitudinal de la quebrada El Silencio, la cual presenta un marcado quiebre de pendiente que coincide con el cruce sobre la falla, dividiendo el perfil longitudinal en dos tramos, uno superior, que representa una superficie de levantamiento, y uno inferior, al nivel del río Musinga, que presenta una diferencia de alturas de más de 250 metros, correspondiente, al parecer, a un pulso de levantamiento (Figura 6b), que induce anomalías en el estado de equilibrio de la cuenca de la quebrada El Silencio (Figura 6c). El resto del tramo central de la falla Abriaquí muestra principalmente facetas triangulares y silletas de falla de muy buena expresión, que se localizan a lo largo del río Musinga, las quebradas Musinguita y Cenizas; sin embargo, en estos sectores no se identificaron materiales recientes deformados, aunque se superponen a zonas reportadas en los registros de sismicidad histórica (Figura 6d).

En el tramo sur la falla Abriaquí atraviesa la cuenca del río El Cerro con una expresión morfológica moderada, ya que los procesos exógenos predominantes son de carácter erosivo o de deposición, y cubren el trazo de la estructura en los fondos de los valles, enmascarándose en las vertientes. En este sector no se identificaron afectaciones tectónicas sobre materiales recientes con expresión marcada en superficie, sin embargo, la proyección de la falla sobre depósitos aluviotorrenciales del río El Cerro en su parte alta muestra un salto de aproximadamente 50 cm, marcado por una línea transversal que sigue de manera subparalela el trazo de la falla.

Por último, hacia el extremo suroriental, la expresión morfológica, la presencia de las silletas de falla y drenajes alineados permiten proyectar un trazo claro al SE, que continúa hacia las cuencas de la quebrada Piedras y el río Herradura, en cercanías del municipio de Abriaquí.

Índice de sinuosidad J

Este índice, definido por Bull & McFadden (1977), relaciona la longitud de la línea horizontal, generalmente

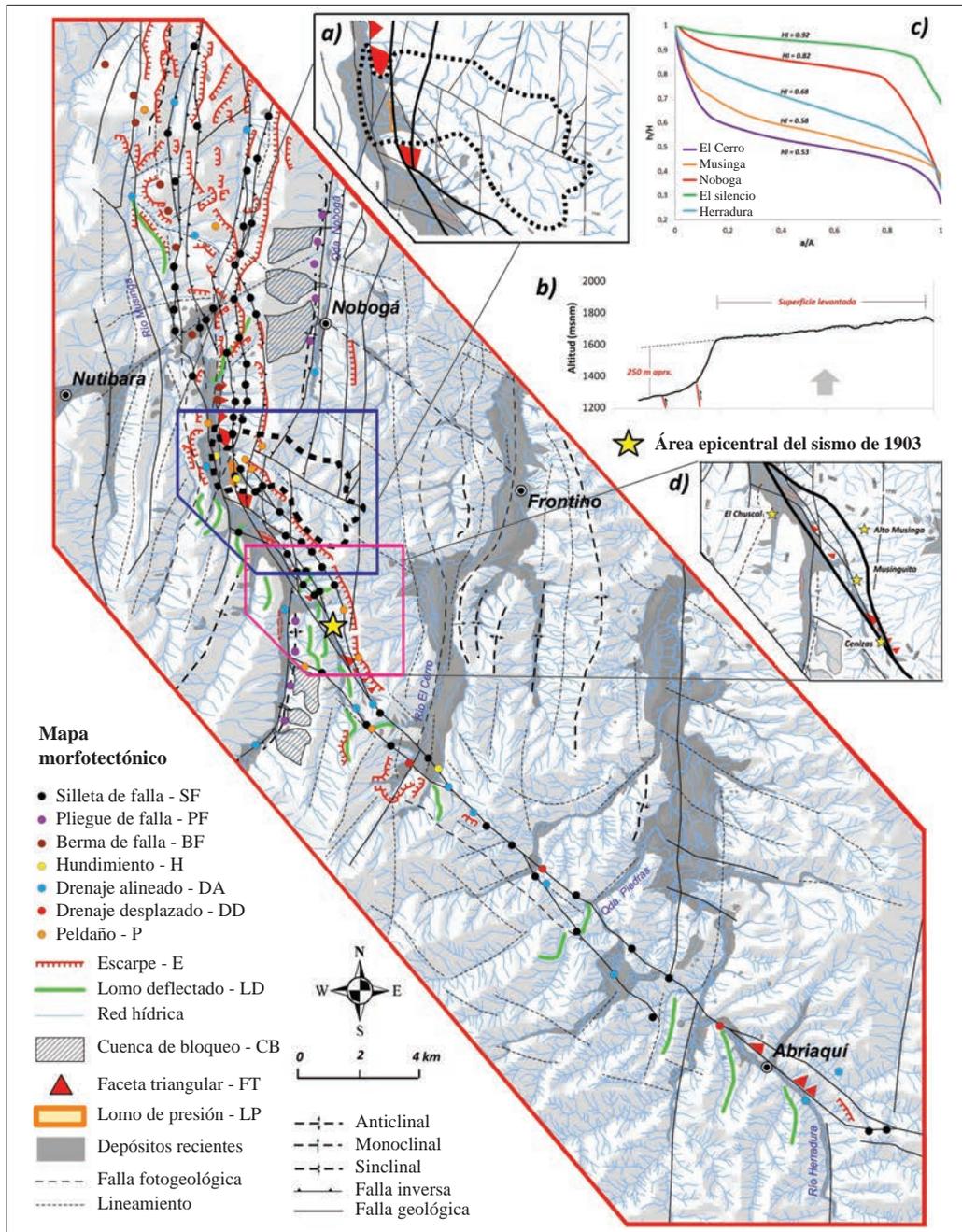


Figura 6. Mapa morfotectónico simplificado de la falla Abriaquí. a) Detalle de la cuenca de la quebrada El Silencio. b) Perfil longitudinal de la quebrada El Silencio. c) Curvas hipsométricas comparadas. d) Área epicentral propuesta para el sismo de 1903

sinuosa, que atraviesa un frente montañoso para un valor fijo de la altitud L_{mf} , dividido por la longitud de la línea recta que une los extremos del frente, L_s , por lo tanto:

$$J = L_{mf}/L_s \quad (1).$$

Así, en un frente de montaña o sobre el trazo bien definido de una falla, los valores más cercanos a 1 indican desplazamientos tectónicos recientes que predominan sobre los procesos erosivos o de deposición, mientras que valores mayores indican bajos grados de actividad de las fallas.

Los resultados obtenidos para tres segmentos de la falla Abriaquí se muestran en la tabla 1, indicando valores de actividad de moderados a bajos. El índice de sinuosidad J indica grados de actividad baja en el sector de Sincerín, donde el frente está cubierto por abanicos aluviales que alteran el valor del índice; sin embargo, se ha registrado deformación de los materiales recientes representada por lomos de presión, lo que evidencia que el grado de actividad no es tan bajo como sugiere el indicador y que, de hecho, podría considerarse como moderado a alto.

Nótese que en los demás sectores de la falla Abriaquí, donde la presencia de depósitos recientes es menor, el valor de J se acerca más a 1, lo que indica grados de actividad moderados.

Porcentaje de facetas triangulares

Este índice permite estimar la proporción de facetas triangulares a lo largo de un frente de montaña mediante la relación entre la suma de las longitudes de las bases de las facetas L_f y la longitud total del frente de montaña (Wells, et al., 1988). Mientras mayor sea esta relación, mayor es el porcentaje de facetas triangulares en el tramo analizado y, por lo tanto, la predominancia de procesos tectónicos. La tabla 2 muestra los resultados de dos tramos analizados a lo largo de la falla Abriaquí.

Inclinación de las facetas triangulares

Identificar el grado de actividad que registra una falla mediante el cálculo de la inclinación de las facetas triangulares es un método sencillo que consiste en obtener la tangente inversa de la diferencia de altura entre base y techo de la faceta Δh, dividido por la longitud en la horizontal L_h mediante la ecuación:

$$\alpha = \text{atg} (\Delta h / L_h) \quad (2).$$

Mientras más se acerque la inclinación de la faceta al plano de la falla, mayor será su expresión morfológica, ya que a medida que los agentes erosivos actúan, α tiende a disminuir. Según Perea (2009), en fallas activas la inclinación de las facetas suele estar entre 25° y 35°, mientras que valores menores corresponderían a zonas de baja actividad o en proceso de erosión. En la tabla 3 se muestran los grados de inclinación de las facetas y su respectivo grado de actividad según la anterior clasificación; cabe recordar que en la zona de estudio se encontraron dos conjuntos de facetas triangulares bien definidas y continuas sobre el trazo de la falla Abriaquí.

Tabla 1. Índice de sinuosidad para el frente de montaña asociado a la falla Abriaquí en la cuenca del río Musunga

Sector	L _{mf} (m)	L _s (m)	S _{mf}	Grado de actividad
Cenizas	3.378,27	2.098,17	1,610	Moderado
Musinguita	5.207,62	2.859,79	1,820	Moderado
Sincerín	9.600,39	4.433,81	2,165	Bajo

Tabla 2. Porcentaje de facetas triangulares

Sector	Porcentaje de facetas triangulares	Grado de actividad
Cenizas	56,06	Moderado
Musinga	24,76	Bajo

Tabla 3. Inclinación de las facetas triangulares a lo largo del río Musunga y grados de actividad según el índice propuesto por Perea (2009)

Falla Abriaquí	Número de faceta	Inclinación	Grado de actividad
Sector de la quebrada de Cenizas	1	41°	----
	2	35°	Alta
	3	25°	Alta
	4	20°	Moderada
Sector del río Musunga	1	22°	Moderada
	2	23°	Moderada
	3	36°	Alta
	4	20°	Moderada
	5	33°	Alta
	6	23°	Moderada
	7	44°	----
	8	32°	Alta
	9	20°	Moderada
	10	21°	Moderada
	11	24°	Moderada
	12	36°	Alta

Discusión

Evaluación del área epicentral

Naturalmente, las descripciones resultantes del registro histórico no constituyen una representación científica del evento sísmico ocurrido, y por lo tanto, estas pudieron haber sido modificadas parcialmente en el proceso de observación, asimilación y escritura. Sin embargo, algunos elementos de las descripciones registradas permiten obtener datos puntuales acerca del sismo de 1903.

El hecho de inducir oscilaciones de carácter predominantemente vertical indica la llegada de las ondas compresivas (P) desde un punto próximo al lugar donde el sismo se sintió. De esta manera, y teniendo en cuenta que las descripciones reportan las mayores intensidades en el sector comprendido entre Musinguita, Cenizas, El Chuscal y el alto de Musunga, se propone esta zona, localizada al suroccidente del casco urbano del municipio de Frontino, en las coordenadas 6.748 N y -76.183 O, como el área epicentral más probable para el sismo de 1903. Este análisis es consecuente con la propuesta de Cifuentes & Sarabia (2009) de que la localización de este sismo fue local y superficial, ya que los efectos se concentraron en un área reducida entre Frontino y Musunga, donde se sintieron con mayor intensidad con réplicas prolongadas; sin embargo, estos autores no señalan una fuente sísmica concreta. A pesar de lo anterior, Montes

& Sandoval (2001) asignaron el epicentro a un sector localizado en el municipio de Urrao y postulan la falla Murri Mutatá como potencial fuente sísmica; sin embargo, esta propuesta no se adapta a la cantidad de reportes que sugieren como zona epicentral los alrededores del municipio de Frontino.

Desplazamientos recientes de la falla Abriaquí

Cuatro criterios principales permiten inferir la ocurrencia de desplazamientos recientes o históricos asociados a la falla Abriaquí.

Un primer criterio, que abarca eventos y mecanismos de largo plazo, se deriva del fenómeno pos-Mioceno de indentación tectónica del BPC, el cual define las características tectónicas del noroccidente colombiano y se ubica en el Cenozoico tardío, controlando la dinámica de la falla Abriaquí mediante las trayectorias de deformación en régimen de cizalla pura (Tapponnier & Molnar, 1976, Davy & Cobbold, 1988), además de otras estructuras de orientación NO en el noroccidente colombiano, como las fallas Mutatá y Cañasgordas, entre otras, las cuales muestran grados de actividad en el Cuaternario.

Vale la pena anotar que al igual que en el modelo análogo de indentación de Graveleau, *et al.*, (2012), la tasa de convergencia del BPC supera a la de subducción, como indican los datos geodésicos (Mora, *et al.*, 2002, Trenkamp, *et al.*, 2002), e induce una deformación en la corteza superior que naturalmente se evidencia por la ocurrencia de sismos a profundidades menores de 10 km y expresiones bien definidas de las fallas en interacción con los procesos exógenos del Cuaternario.

Por otro lado, un segundo criterio se deriva de las características morfotectónicas que se desarrollan a lo largo de la falla Abriaquí y de las relaciones que presenta con los sistemas de drenajes y pliegues circundantes, reflejadas principalmente en el valor de la integral hipsométrica de la cuenca de la quebrada El Silencio y la formación de pliegues de rampa y cuencas de bloqueo sobre la falla Portachuelo. Estas permiten estimar deformaciones corticales y respuestas del relieve a escalas de tiempo intermedias que, según Burbank & Anderson (2011), se extienden desde el Pleistoceno, indicando períodos de tiempo de cientos de miles de años. En este caso, las características morfotectónicas están representadas principalmente por la formación de lomos de presión, el crecimiento de pliegues y cuencas de bloqueo, los levantamientos diferenciales y las anomalías en los sistemas de drenajes, entre otros. Estas observaciones, sumadas a los registros de deformación en materiales no consolidados como abanicos y terrazas aluviales en la cuenca de los ríos Musinga, el Cerro y Herradura, constituyen un tercer criterio que sugiere desplazamientos de la falla Abriaquí en intervalos de tiempo correspondientes al Holoceno, ya que en la quebrada Piedras se han identificado depósitos deformados con

edades menores a 2.000 años (Page, 1986), lo que permite estimar deformaciones en periodos de tiempo de pocos miles de años. Un último criterio es el que se respalda en la información histórica que sugiere la ocurrencia de eventos sísmicos importantes en los últimos cien años.

Evaluación de la fuente sísmica

Como se indicó anteriormente, el evento de 1903 tuvo efectos asociados como rupturas superficiales cosísmicas, deslizamientos, represamientos, flujos de lodos, grietas en edificaciones, así como el pánico y el éxodo de la población, con un registro de dos víctimas y cientos de personas afectadas, lo que permite estimar una intensidad de VII a VIII en la escala de Mercalli modificada (versión de 1956), congruente con la evaluación macrosísmica de Cifuentes & Sarabia (2009) y Velásquez, *et al.* (1993), quienes, además, propusieron una magnitud en la escala de Richter mayor de 6.0.

Dada la ocurrencia de un evento sísmico de tales proporciones y la localización concreta de su zona epicentral en el área de Musinguita, se sugiere que la fuente sísmica debe corresponder a una estructura relevante en términos de amenaza sísmica; para este sector en particular, se han identificado dos fuentes sísmicas específicas: i) la falla Abriaquí, y ii) los pliegues de rampa asociados a la falla Portachuelo; sin embargo, la generación de un evento de este tipo, basado en la longitud de la estructura (Wells & Coppersmith, 1994), solo podría asociarse a una falla de longitud de más de 10 kilómetros, criterio con el que la falla Abriaquí cumple. Por otro lado, las localidades reportadas como epicentros en los registros históricos de sismicidad, como la quebrada Cenizas, la vereda Musinguita, la vereda el Chuscal y el alto de Musinga, se alinean con el trazo de la falla Abriaquí, lo que sugiere que esta es responsable del evento de 1903 y, en consecuencia, la edad de su último desplazamiento se remonta a periodos históricos.

Con esta propuesta se buscaba identificar las estructuras geológicas sismogénicas con influencia en las actividades antrópicas mediante estudios de neotectónica local, así como aportar datos concretos para actualizar el catálogo de fallas activas y refinar las evaluaciones de la amenaza sísmica en el territorio colombiano.

Conclusiones

En el área de estudio, las estructuras geológicas de última generación corresponden a fallas de rumbo transpresivas representadas principalmente por la falla Abriaquí y lineamientos de buena expresión geomorfológica, generalmente con orientación NO, controladas actualmente por el régimen compresivo derivado de la indentación tectónica del BPC y la convergencia de la placa Nazca.

La configuración morfotectónica de la falla Abriaquí está definida en tres segmentos principales: i) el sector norte, dominado por una falla inversa de orientación NS donde

se desarrollan silletas de fallas, peldaños, bermas de fallas y drenajes alineados; ii) el sector central, de orientación NO, donde predominan facetas triangulares y silletas de falla en un régimen transpresivo, y iii) el sector sur, con desplazamiento lateral izquierdo y componente inversa, y ocurrencia de silletas de falla y drenajes alineados que se extienden hasta el municipio de Abriaquí.

Los elementos morfotectónicos identificados a lo largo de esta estructura revelan procesos activos de deformación cortical que controlan directamente el modelado del relieve y la evolución de las cuencas circundantes. Además, en las cuencas de los ríos Musinga, El Cerro y Herradura se identificó la deformación de depósitos aluviales de edad reciente, lo que demuestra que la falla Abriaquí ha tenido al menos un desplazamiento en el Cuaternario.

Aunque el análisis morfotectónico indica que el grado de actividad de la falla Abriaquí es moderado, hay indicios claros de que es sismoactiva, razón por la cual debe estudiarse con mayor detalle, debido a las potenciales implicaciones en el desarrollo del municipio.

Las características reportadas en el registro histórico permiten estimar que la intensidad del evento de 1903 fue de VII a VIII en la escala de Mercalli modificada, ya que produjo rupturas superficiales, deslizamientos, represamientos, flujos de lodos, grietas y colapso de edificaciones, además de pánico y migración de la población. La profundidad de este evento se ha estimado en menos de 10 km.

Los registros de sismicidad histórica indican que el evento de 1903 fue sentido con mayor intensidad al SO de Frontino, por lo tanto, se propone que el sector de Musinguita, Cenizas, El Chuscal y Alto de Musinga corresponde al área epicentral más probable. Estos sitios se alinean con el trazo de la falla Abriaquí, por lo que se sugiere esta estructura como la fuente sísmica de dicho evento.

La falta de dataciones absolutas sobre materiales deformados deja abierta la discusión sobre la temporalidad concreta de los episodios de deformación de esta estructura. A pesar de ello, el análisis presentado indica que la dinámica de esta falla presenta grados de actividad en diversos intervalos de tiempo, hecho deducido con base en criterios geodinámicos, morfotectónicos, estratigráficos y de sismicidad histórica.

El municipio de Frontino deberá integrar estos resultados en sus futuros planes de expansión y manejo del territorio, ya que se encuentra en una zona con una sismicidad moderada pero próxima, con aceleraciones que pueden tener importantes impactos en la población y la infraestructura.

Dado que se postula a la falla Abriaquí como potencial fuente sísmica, se recomienda hacer estudios detallados en ella y en las fallas emparentadas, con el fin de tener un mejor conocimiento de la amenaza sísmica en la región del noroccidente del departamento de Antioquia.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en el marco del programa de Jóvenes Investigadores de Colciencias - 2012, y con el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Agradecemos profundamente a ambas entidades la financiación del proyecto “Evidencias preliminares de tectónica activa entre la cuenca media del río El Cerro y la vereda El Chuscal, Frontino – Antioquia, Cordillera Occidental – Jóvenes Investigadores de Colciencias 2013”, con código QUIPU 202010011803.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Árias, A. & Tejada, R.** (1987). Informe técnico de reconocimiento aéreo de la región de la cordillera occidental (Punta de Ocaidó - Dabeiba). Comité Operativo de Emergencias Departamental (COE). Medellín. p. 5.
- Bull, W. & McFadden, L.** (1977). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium, Geomorphology in Arid Regions. Geosciences Department. University of Arizona. pp. 1–21.
- Burbank, D. W. & Anderson, R. S.** (2011). Tectonic Geomorphology. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. p. 287. doi:10.1002/9781444345063
- Caballero, H.** (1991). Contribucion al análisis de amenazas naturales en el Municipio de Frontino. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras, INGEOMINAS. Medellín.
- Cediel, F., Leal-Mejia, H., Shaw, R., Melgarego, J., Restrepo-Pace, P.** (2011). Petroleum geology of Colombia: Regional geology of Colombia. Fondo Editorial U. Eafit, Ed. 1: 220. Medellín.
- Chicangana, G.** (2005). The Romeral fault system: A shear and deformed extinct subduction zone between oceanic and continental lithospheres in Northwestern South America. Earth Sciences Research Journal. 9 (1): 51–66.
- Cifuentes, H. & Sarabia, M.** (2009). Estudio macrosísmico del sismo del 1 de diciembre de 1903, Frontino - Antioquia. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras - INGEOMINAS. Bogotá D.C. p. 54.
- Davy, P. & Cobbold, P. R.** (1988). Indentation tectonics nature and experiment: 1. Experiments scaled for gravity. Bulletin of the Geological Institutions of Uppsala. 14: 129 – 141.
- Duque-Caro, H.** (1990). The Chocó block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. Journal of South American Earth Sciences. 3 (1): 71–84. doi:10.1016/0895-9811(90)90019-W
- Espinosa, A.** (2003). La sismicidad histórica en Colombia. Revista Geográfica Venezolana. 44 (2): 271–283.
- Góez de Gaviria, Á.** (198?). Apuntes para la historia de Frontino. Frontino. Manuscrito Inédito. Consultado en la

casa parroquial de la Basílica Menor de Nuestra Señora del Carmen, Frontino - Antioquia.

- Graveleau, F., Malavieille, J., Domínguez, S.** (2012). Experimental modelling of orogenic wedges: A review. *Tectonophysics*. **538-540**: 1–66. doi:10.1016/j.tecto.2012.01.027
- Kenan, L. & Pindell, J.** (2009). Dextral shear, terrane accretion and basin formation in the Northern Andes: Best explained by interaction with a Pacific-derived Caribbean Plate? En: James, K.H., Lorente, M.A., Pindell, J. (Eds). *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate*: Geological Society of London Special Publication **328**: 487-533.
- López, A., Ramírez, D., Sierra, G.** (2006). Vulcanismo neógeno en el suroccidente antioqueño y sus implicaciones tectónicas. *Boletín de Ciencias de La Tierra*: 27–42.
- Montes, N. & Sandoval, A.** (2001). Fuentes sismogénicas que contribuyen a la amenaza sísmica en el eje cafetero. Compendio geológico, neotectónico y sismológico de la zona del eje cafetero Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras - INGEOMINAS. Bogotá D.C. p. 147.
- Mora, H. P., Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., Ordóñez, M.** (2002). Resultados del uso de geodesia satelital para estudios geodinámicos en Colombia. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras - INGEOMINAS. Bogotá D.C.
- Page, W.** (1986). Seismic geology and seismicity of Northwestern Colombia Woodward-Clyde Consultants; Interconexión Eléctrica SA. Medellín. p. 200.
- Perea, H.** (2009). Curso - taller sobre tectónica activa y paleosismología. Bloque II: Tectónica activa. En: II Curso de neotectónica y paleosismología. Medellín.
- Ramírez, J. E.** (1975). Historia de los Terremotos en Colombia. (I. G. A. Codazzi, Ed.) Instituto Geográfico Agustín Codazzi. p. 250.
- Ramírez, J., Sierra, G. M., Marín-Cerón, M. I.** (2012). Anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) del miembro superior de la formación Amagá, sección quebrada Sabaleticas, SW antioqueño y su relación con los movimientos del sistema de fallas Romeral en el Cenozoico tardío. *Boletín de Ciencias de La Tierra*. **32**: 125–142.
- Restrepo, J. & Toussaint, J. F.** (1988). Terranes and continental accretions in the Colombian Andes. *Episodes*, **11** (3): 189-193.
- Suárez, I.** (1989). Nuestra Antioquia. La región de occidente, reseñas municipales. Secretaría de Educación y Cultura de Medellín. Medellín. p. 483.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., Rivera, C.** (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*. **19** (5): 787-813.
- Tapponnier, P. & Molnar, P.** (1976). Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*. **264**: 319-324.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., Mora, H. P.** (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*. **15** (2): 157-171. doi:10.1016/S0895-9811(02)00018-4
- Trenkamp, R., Mora, H., Salcedo, E., Kellogg, J.** (2004). Possible rapid strain accumulation rates near Cali, Colombia, determined from Gps measurements. *Earth Sciences*. **8** (1): 25-33.
- Van Der Hammen, T.** (1960). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y tectogenesis de los Andes colombianos. Servicio Geológico Nacional. Informe N° 1279. Bogotá, D.C. p. 74.
- Vargas, C. A. & Mann, P.** (2013). Tearing and Breaking Off of Subducted Slabs as the Result of Collision of the Panama Arc-Indenter with Northwestern South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **103** (3): 2025–2046. doi:10.1785/0120120328
- Vargas, C. A., Pujades, L., Ugalde, A., Canas, J.** (2002). Estado de deformación y esfuerzos en el territorio colombiano. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **26** (100): 373–391.
- Velásquez, A., Arango, M., Meyer, H.** (1993). Sismicidad histórica del NW Colombiano. In VI Congreso Colombiano de Geología. Medellín. pp. 1102–1113.
- Wells, D. & Coppersmith, K.** (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **84** (4): 974–1002.
- Wells, S. G., Bullard, T. F., Menges, C. M., Drake, P. G., Karas, P. A., Kelson, K. I., Ritter, J., Wesling, J. R.** (1988). Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary, Pacific coast of Costa Rica. *Geomorphology*. **1**: 239–265.
- White, G.** (1959). Temblores en Frontino. (Movimientos sísmicos en Dabeiba, Frontino y Cañasgordas. Departamento de Antioquia. República de Colombia). Medellín. p. 15.

***Trypanosoma rangeli*: un protozoo infectivo y no patógeno para el humano que contribuye al entendimiento de la transmisión vectorial y la infección por *Trypanosoma cruzi*, agente causal de la enfermedad de Chagas**

Gustavo Adolfo Vallejo*, Yázmin Suárez, Jenny Lorena Olaya, Sneider Alexander Gutiérrez, Julio César Carranza

Laboratorio de Investigaciones en Parasitología Tropical (LIPT), Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Resumen

A diferencia de *Trypanosoma cruzi*, agente causal de la enfermedad de Chagas, *Trypanosoma rangeli* es un parásito infectivo y no patógeno para el humano, pero sí para los vectores del género *Rhodnius*. Con base en polimorfismos del ADN del cinetoplasto (kADN), del gen miniexón o líder de empalme (*Spliced Leader*), del espaciador interno transcrito (ITS) y de la subunidad pequeña del ribosoma (SSU rARN), se han descrito varios genotipos de *T. rangeli* (KP1+/A, B, KP1-/C, KP1-/D y E), los cuales son transmitidos selectivamente por dos líneas filogenéticas de *Rhodnius*, lo que indica la ocurrencia de procesos coevolutivos entre el parásito y los vectores. La línea Robustus (*Rhodnius prolixus*, *Rhodnius robustus* y *Rhodnius neglectus*) transmite exclusivamente el genotipo KP1+/A y la línea Pallescens (*Rhodnius pallescens*, *Rhodnius colombiensis* y *Rhodnius ecuadoriensis*) transmite el genotipo KP1-/C. Aunque el conocimiento de las bases moleculares de la interacción parásito-vector es todavía escaso, este trabajo presenta observaciones inéditas sobre la capacidad de los genotipos KP1+/A y KP1-/C para completar el ciclo de vida en algunas de las 19 especies de *Rhodnius* y la detección de factores tripanolíticos en *R. prolixus*, *R. robustus* y *R. neglectus* contra el genotipo KP1-/C y varios genotipos de *T. cruzi*. Los avances recientes en los estudios de transcripción genómica de *T. rangeli*, y su comparación con *T. cruzi* constituyen el punto de partida para entender cabalmente la transmisión vectorial selectiva de *T. rangeli* y *T. cruzi*, así como de la patogenia de *T. rangeli* para el vector y de la incapacidad de *T. rangeli* y la capacidad de *T. cruzi* para invadir células del mamífero.

Palabras clave: *Trypanosoma rangeli* KP1(+), *Trypanosoma rangeli* KP1(-), epidemiología molecular, genoma de *T. rangeli*, *Rhodnius* spp.

***Trypanosoma rangeli*: an infective but non-pathogenic protozoon for humans which contributes to the understanding of the vector-borne transmission and the pathogenesis of *Trypanosoma cruzi*, causative agent of Chagas' disease**

Abstract

Unlike *Trypanosoma cruzi*, the causative agent of Chagas' disease, *T. rangeli* is an infective, non-pathogenic parasite for humans, but pathogenic for vectors from the *Rhodnius* genus. Several *T. rangeli* genotypes (KP1+/A, B, KP1-/C, KP1-/D and E) have been described based on kinetoplast DNA (kDNA) polymorphisms, the spliced leader or miniexon, the intergenic transcribed spacer (ITS) and the small ribosomal subunit (SSUrRNA). These are selectively transmitted by two *Rhodnius* phylogenetic lines, thereby indicating co-evolutionary processes between parasite and vector genotypes. The Robustus line (*Rhodnius prolixus*, *R. robustus* and *R. neglectus*) exclusively transmits the KP1+/A genotype and the Pallescens line (*R. pallescens*, *R. colombiensis* and *R. ecuadoriensis*) only transmits the KP1-/C genotype. Even though little knowledge is available regarding the molecular basis of parasite-vector interaction, the present work presents unpublished observations about KP1+/A and KP1-/C genotype ability to complete the life-cycle of some of the 19 *Rhodnius* species and the detection of trypanolytic factors in *R. prolixus*, *R. robustus* and *R. neglectus* against the KP1-/C genotype and some *T. cruzi* genotypes. Several advances regarding molecular, transcriptome and genomic studies dealing with *T. rangeli* are presented and compared to *T. cruzi*; these are the starting point for understanding the selective vectorial transmission of *T. rangeli* and *T. cruzi*, *T. rangeli* pathogenicity for the vector, as well as *T. rangeli* inability and *T. cruzi* ability to invade mammalian cells.

Key words: *Trypanosoma rangeli* KP1(+), *Trypanosoma rangeli* KP1(-), molecular epidemiology, *T. rangeli* genome, *Rhodnius* spp.

Introducción

Trypanosoma rangeli fue reportado por primera vez en Colombia en *Rhodnius prolixus* del municipio de Prado, Tolima (Uribe, 1929). Los estudios sobre el ciclo del parásito en el vector, su persistencia e inocuidad en los humanos se deben a Groot, *et al.* (1950, 1951) y a Groot (1952, 1954). Algunos de los estudios posteriores sobre la biología y la epidemiología de *T. rangeli* fueron llevados a cabo por Marinkelle (1968a, 1968b); D'Alessandro, 1976; D'Alessandro & Gore-Saravia, 1999; Guhl & Marinkelle, 1982, y Guhl, *et al.*, 1985. *T. rangeli* y *Trypanosoma cruzi* son las dos únicas especies de tripanosomas que infectan al hombre en los países de América Latina. *T. cruzi* es el agente causal de la enfermedad de Chagas, la cual afecta a entre 7 y 8 millones de personas en las zonas endémicas, en tanto que alrededor de 60 millones se encuentran en riesgo de adquirir la infección desde el sur de los Estados Unidos hasta el sur de Argentina y Chile (Organización Panamericana de la Salud, 2007; Organización Mundial de la Salud, 2014). Aunque las infecciones humanas por *T. rangeli* son frecuentes, se considera que no es patógeno para el vertebrado, pero sí para las especies del género *Rhodnius*, las cuales son los vectores comprobados de este parásito (Guhl & Vallejo, 2003). En algunos países de América Latina las dos especies de tripanosomas se encuentran infectando a los mismos vertebrados y vectores, lo cual dificulta el acertado diagnóstico e identificación del agente causal de la enfermedad de Chagas (Vallejo, *et al.*, 1988). Es por esto que los estudios de *T. rangeli* se enmarcan dentro de la epidemiología de la enfermedad de Chagas; en los últimos años, *T. rangeli* se ha considerado como un modelo para los estudios biológicos y moleculares relacionados con las interacciones parásito-hospedero-vector, pues su conocimiento ayudará a entender la dinámica de la transmisión vectorial de *T. cruzi* y de *T. rangeli*, las bases químicas y moleculares de la patogénesis de *T. cruzi* y la ausencia de patogenia de *T. rangeli* para el vertebrado, lo cual podría conducir a la identificación de blancos terapéuticos y al desarrollo de drogas o de vacunas para el tratamiento de la enfermedad de Chagas.

Interacción parásito-vector en *T. rangeli*

Se han reconocido cuatro componentes en la interacción parásito-vector que son determinantes en la transmisión de los tripanosomas. Estos componentes son: i) la especie, la cepa y el genotipo del tripanosoma; ii) la especie de triatomino; iii) la respuesta inmune celular y humoral del vector, y iv) la microbiota intestinal del insecto (Schaub, 2009; García, *et al.*, 2010; García, *et al.*, 2012).

Los vectores de *T. cruzi* y *T. rangeli* se infectan cuando se alimentan de sangre de mamíferos que están parasitados. A diferencia de *T. cruzi*, que es transmitido a través de las heces del vector, *T. rangeli* pasa del intestino a la hemolinfa, invade las glándulas salivares y se transmite a través de la picadura del insecto (Groot, 1954; D'Alessandro, 1976). Aunque *T. rangeli* puede infectar el intestino de cualquier especie de triatomino, los únicos vectores en los cuales hay invasión de las glándulas salivares y producción de tripomastigotes metacíclicos infectivos para el mamífero son las 19 especies hasta ahora reconocidas del género *Rhodnius* (Abad-Franch, *et al.*, 2013; da Rosa, *et al.*, 2014). En 13 de estas 19 especies se ha verificado la infección natural o experimental por *T. rangeli* (Tabla 1).

Cuando *T. rangeli* ingresa al intestino del vector, se enfrenta a simbiontes y bacterias comensales, factores hemolíticos, factores tripanolíticos y lectinas; luego, el parásito se multiplica en el intestino produciendo formas similares a los amastigotes, los epimastigotes cortos, los epimastigotes largos, los esferomastigotes y los tripomastigotes (Vallejo, *et al.*, 1988).

Después, los epimastigotes cortos atraviesan la pared intestinal y se enfrentan en la hemolinfa del insecto a los componentes del sistema inmune como las lisozimas, el sistema de la profenoloxidasas (proFO), los factores tripanolíticos, la producción de superóxido y óxido nítrico, la fagocitosis mediada por hemocitos, entre otros (García, *et al.*, 2009). Estos epimastigotes cortos invaden los hemocitos y se multiplican dentro de ellos, y luego son reemplazados por epimastigotes largos, los cuales se adhieren a las glándulas salivares y penetran en ellas para finalmente producir los tripomastigotes metacíclicos, que son las formas infectivas para el mamífero (Figura 1).

Varios trabajos resumidos por Azambuja & García, 2005; Azambuja, *et al.*, 2005; García, *et al.*, 2009, y García, *et al.*, 2012, han demostrado que el éxito de la infección de *T. rangeli* se debe a que una vez el parásito ha alcanzado el hemocele del insecto, produce una inhibición de la respuesta inmune celular y humoral, lo que permite la multiplicación del parásito en la hemolinfa, la invasión de hemocitos, la invasión de las glándulas salivares y la producción de tripomastigotes metacíclicos o formas infectivas.

Genotipos de *T. rangeli* y su asociación con vectores del género *Rhodnius*

Existen cepas de *T. rangeli* que no logran sobrevivir a la respuesta inmune del vector o no consiguen producir formas infectivas en las glándulas salivares. También se reconoce que las especies de *Rhodnius* son susceptibles a la infección de cepas de *T. rangeli* de la misma región geográfica y no de otras regiones. En este sentido, se ha reportado que las cepas de *T. rangeli* de aislamientos procedentes de Colombia y Costa Rica no generaron tripomastigotes metacíclicos en *R. pallescens* de Panamá o *R. ecuadoriensis* de Ecuador o de

* Correspondencia:

Gustavo Adolfo Vallejo; gvallejo@ut.edu.co

Recibido: 29 de octubre de 2014

Aceptado: 9 de febrero de 2015

Tabla 1. Genotipos de *T. rangeli* aislados de glándulas salivares en infecciones naturales o experimentales en las especies de *Rhodnius*

<i>Rhodnius</i> spp	Infección natural o experimental	kADN	SSU rARN	Referencia
<i>R. amazonicus</i>	ND	ND	ND	-
<i>R. barretti</i>	ND	ND	ND	-
<i>R. brethesi</i>	N	ND	B	Maia da Silva, et al., 2007
<i>R. colombiensis</i>	N	KP1(-)	C	Vallejo, et al., 2002, 2009a
<i>R. dalessandroi</i>	N	ND	ND	D 'Alessandro & Saravia, 1999
<i>R. domesticus</i>	E	KP1(+)	A	Machado, et al., 2001
<i>R. ecuadoriensis</i>	N	KP1(-)	C	Vallejo, et al., 2003, 2009a
<i>R. milesi</i>	ND	ND	ND	-
<i>R. montenegrensis</i>	N	ND	ND	Meneguetti, et al. , 2014
<i>R. nasutus</i>	E	ND	ND	Machado, et al., 2001
<i>R. neglectus</i>	N	KP1(+)	A	Machado, et al., 2001
<i>R. neivai</i>	N	ND	ND	D 'Alessandro & Hincapié, 1986
<i>R. pallescens</i>	N	KP1(-)	C	Vallejo, et al., 2003, 2009a; Urrea, et al., 2011
<i>R. paraensis</i>	ND	ND	ND	-
<i>R. pictipes</i>	N	ND	ND	D 'Alessandro & Saravia, 1999
<i>R. prolixus</i>	N	KP1(+)	A	Vallejo, et al., 2002, 2009a; Maia da Silva, et al., 2007; Urrea, et al., 2011
<i>R. robustus</i>	N	KP1(+)	A	Maia da Silva, et al., 2007; Vallejo, et al., 2009a; Urrea, et al., 2011
<i>R. stali</i>	ND	ND	ND	-
<i>R. zeledoni</i>	ND	ND	ND	-

N = infección natural; E= infección experimental; ND = no determinada

Perú (D 'Alessandro, 1976). Asimismo, las cepas aisladas de *R. colombiensis* no infectaron a *R. prolixus* de Colombia (Vallejo, et al., 2002).

El estudio de esta restricción biológica existente entre *T. rangeli* y algunas especies de *Rhodnius* comenzó con el análisis de las cepas de *T. rangeli* aisladas de dos especies simpátricas, *R. colombiensis* y *R. prolixus*, recolectadas en el municipio de Coyaima, Tolima, en la región central de Colombia. *R. prolixus* es una especie domiciliada y *R. colombiensis* es un vector silvestre que se ha encontrado en esta región visitando las viviendas humanas sin dar lugar a colonias permanentes del insecto. Mediante la caracterización molecular del ADN del cinetoplasto se logró identificar dos genotipos de *T. rangeli* denominados *T. rangeli* KP1(+) y *T. rangeli* KP1(-) (Figura 2). Todas las cepas de *T. rangeli* aisladas de las glándulas salivares de *R. colombiensis* presentaron el perfil KP1(-) y las aisladas de *R. prolixus* fueron caracterizadas como KP1(+) (Vallejo, et al., 2002). Además, se hizo la caracterización molecular de *T. rangeli* en 815 ejemplares de *R. prolixus* de diferentes regiones

geográficas de Colombia y, mediante PCR, se detectaron en el intestino 24 cepas KP1(-) y 27 KP1(+), en tanto que las 13 aisladas de las glándulas salivares mostraron el genotipo KP1(+). Por otro lado, la caracterización molecular de *T. rangeli* en 413 ejemplares de *R. colombiensis* permitió detectar por PCR en el intestino 104 KP1(-) y 6 KP1(+), en tanto que las 22 cepas aisladas de las glándulas salivares presentaron el genotipo KP1(-) (datos no publicados). Estos resultados sugieren que ambas especies de *Rhodnius* se pueden infectar en el intestino con los genotipos KP1(+) y KP1(-), pero que *R. prolixus* solo transmite KP1(+) y *R. colombiensis* transmite KP1(-) a través de las glándulas salivares.

En nuevos aislamientos de *T. rangeli* obtenidos a partir de *R. pallescens*, *R. colombiensis*, *R. ecuadoriensis*, *R. prolixus* y *R. neglectus*, se encontró que las especies de la cordillera de los Andes (*R. pallescens*, *R. colombiensis*, *R. ecuadoriensis*) transmiten el genotipo KP1(-), mientras que *R. prolixus* y *R. neglectus*, ubicadas principalmente al oriente de la cordillera de los Andes, transmiten el genotipo KP1(+) (Urrea, et al., 2005).

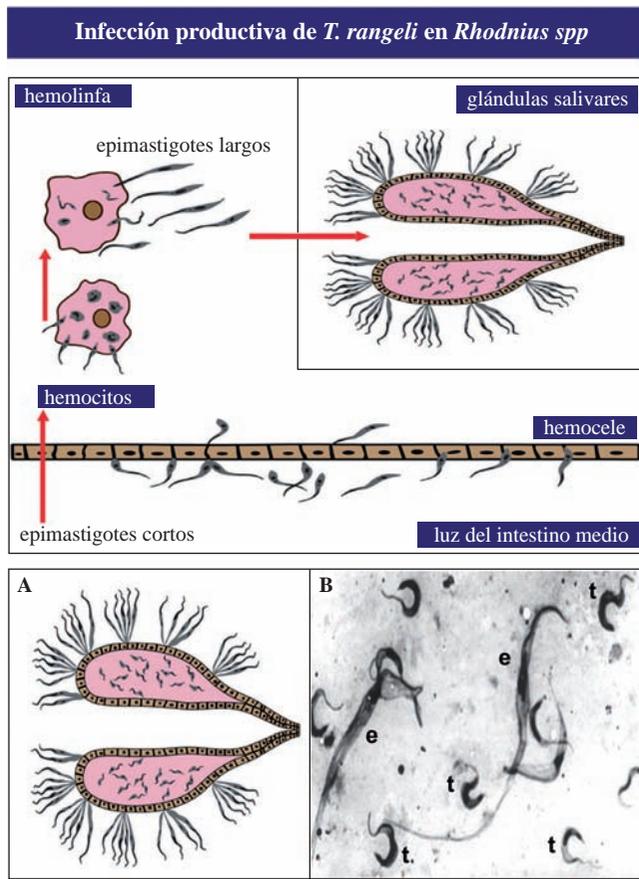


Figura 1. A. Diagrama esquemático que muestra los epimastigotes largos (e) de *T. rangeli* adheridos a la superficie de las glándulas salivares y los tripomastigotes metacíclicos (t) en la luz de las glándulas salivares. B. Epimastigotes largos (e) y tripanomastigotes metacíclicos (t) coloreados con Giemsa (x1500) (Vallejo, 1984)

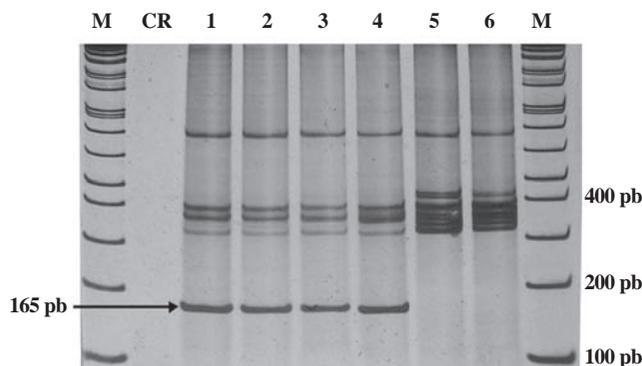


Figura 2. Genotipos de *T. rangeli* obtenidos mediante amplificación del kADN utilizando PCR dúplex (Vallejo, et al., 2002). Canaletas 1-4: cepas de *T. rangeli* KP1(+) aisladas de glándulas salivares de *R. prolixus*. Canaletas 5-6: *T. rangeli* KP1(-) aisladas de glándulas salivares de *R. colombiensis*. Nótese que el genotipo KP1(-) carece de la banda inferior de 165 pb derivada del minicírculo KP1, banda que solo está presente en el genotipo KP1(+). CR: control de reacción sin ADN. M: marcador de tamaño molecular, 1 Kb Plus DNA Ladder.

En los años siguientes, el estudio de la variabilidad de diferentes marcadores moleculares generó un aumento en la nomenclatura de *T. rangeli*. Así, la variabilidad del minicélex o líder de empalme (*Spliced Leader*) permitió describir nuevos genotipos denominados A, B, C, D y E (Maia da Silva, et al., 2004a, 2004b, 2007, 2009). El análisis de 101 cepas de *T. rangeli* correspondientes a diferentes genotipos, y su asociación con especies de *Rhodnius*, confirmó que el genotipo C corresponde a KP1(-), habiéndose aislado de *R. pallescens*, *R. colombiensis* y *R. ecuadoriensis*. El genotipo B fue aislado de *R. brethesi*, pero no se ha verificado si es KP1(+) o KP1(-). El genotipo A corresponde a KP1(+) y fue aislado de *R. prolixus*, *R. robustus* y *R. neglectus* (Vallejo, et al., 2002, 2003; Vallejo, et al., 2009a; Vallejo, et al., 2009b; Urrea, et al., 2005, 2011) (Figura 3). En Centroamérica las cepas de *T. rangeli* KP1(+) se aislaron en áreas de distribución de *R. prolixus* y las cepas de *T. rangeli* KP1(-), en áreas de distribución de *R. pallescens* (Salazar-Antón, et al., 2009).

De acuerdo con Schofield & Dujardin (1999) y Abad-Franch, et al., (2009), se han reconocido dos líneas filogenéticas principales en las especies de *Rhodnius*, denominadas la línea Pallescens y la línea Robustus. El genotipo KP1(-) se encuentra asociado a *R. pallescens*, *R. colombiensis* y *R. ecuadoriensis* (línea Pallescens) y el genotipo KP1(+), a *R. prolixus*, *R. robustus*, *R. neglectus* (línea Robustus), lo que indica la ocurrencia de procesos coevolutivos entre los genotipos de los parásitos y los vectores (Urrea, et al., 2005, 2011). Se espera que *T. rangeli* KP1(+) se detecte en infecciones naturales en *R. domesticus* y en *R. nasutus*, especies pertenecientes a la línea Robustus. Aún deben identificarse los genotipos de *T. rangeli* transmitidos naturalmente por 11 de las 19 especies de *Rhodnius*, lo cual contribuiría a confirmar la presencia de procesos coevolutivos en estas especies de vectores. La tabla 1 muestra la caracterización molecular de las cepas de *T. rangeli* aisladas de glándulas salivares en infecciones naturales o experimentales de *Rhodnius* spp.

Actividad tripanolítica de la hemolinfa de *R. prolixus* y *R. robustus* contra genotipos de *T. rangeli*

Después de analizar más de 100 cepas de *T. rangeli* aisladas de glándulas salivares de *Rhodnius* spp, nunca se encontró a *R. prolixus* con *T. rangeli* KP1(-) ni a *R. pallescens*, *R. colombiensis* o *R. ecuadoriensis* con KP1(+). Esto llevó a sospechar la existencia de factores inhibitorios contra genotipos de *T. rangeli* presentes en la hemolinfa o en las glándulas salivares de los vectores.

La hemolinfa de *R. prolixus* y *R. robustus*, libre de hemocitos, se ha incubado con los genotipos de *T. rangeli*, encontrándose actividad tripanolítica contra epimastigotes de KP1(-) aislados de *R. colombiensis*, *R. pallescens* y *R. ecuadoriensis*, pero no contra epimastigotes KP1(+) (Pulido, et al., 2008). Recientemente hemos encontrado en

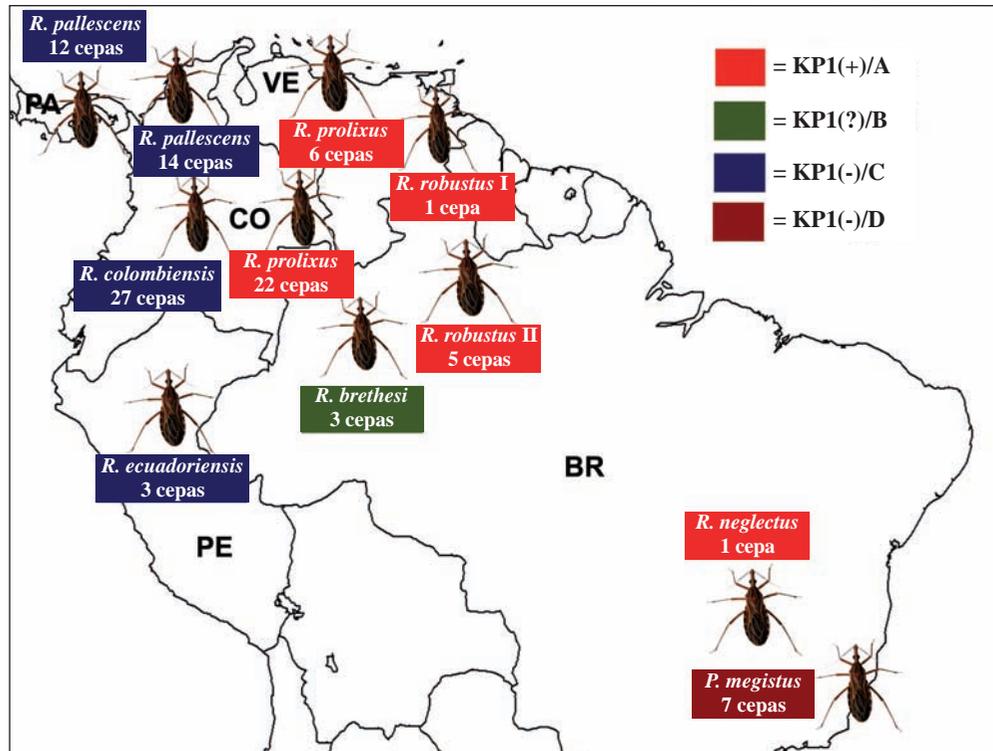


Figura 3. Distribución geográfica de los genotipos de 101 cepas de *T. rangeli* aisladas de glándulas salivares de diferentes especies de *Rhodnius*. El genotipo C, aislado de las especies de la cordillera de los Andes *R. pallescens*, *R. colombiensis* y *R. ecuadoriensis*, corresponde al genotipo KP1(-) (KP1(-)/C), mientras que las especies aisladas al oriente de la cordillera de los Andes, *R. prolixus*, *R. robustus* y *R. neglectus*, presentan el genotipo A correspondiente a KP1(+) (KP1+/A). Se desconoce el perfil de kADN del genotipo B. Las cepas de *T. rangeli* aisladas del intestino de *Panstrongylus megistus* en el suroriente del Brasil correspondieron al genotipo KP1(-) o D (KP1-/D). (Vallejo, *et al.*, 2002, 2003, 2009a, 2009b; Urrea, *et al.*, 2005, 2011).

nuestro laboratorio que los epimastigotes cortos de las cepas de *T. rangeli* KP1(-) son sensibles a la lisis de la hemolinfa de *R. prolixus*, en contraste con los epimastigotes largos, los cuales son resistentes. Las hemolinfas de *R. pallescens*, *R. colombiensis*, *R. ecuadoriensis*, *Triatoma dimidiata* y *Triatoma maculata* no presentaron actividad tripanolítica contra los genotipos KP1(+) o KP1(-).

La presencia de factores tripanolíticos no es el único factor que limita el desarrollo de *T. rangeli*, pues el control para generar una infección productiva de tripomastigotes metacíclicos probablemente se encuentra asociado a la presencia o ausencia de lectinas en la superficie del parásito o en las glándulas salivares que impiden la adhesión, el ingreso y la producción de las formas infectivas (Basseri, *et al.*, 2002). En estudios recientes se ha demostrado que la infección exitosa de *T. rangeli* para generar tripomastigotes metacíclicos está asociada con la producción de ectofosfatasa en el parásito (Gomes, *et al.*, 2008; Dos-Santos, *et al.*, 2012; Dos-Santos, *et al.*, 2013; Freitas-Mesquita & Meyer-Fernández, 2014).

La figura 4 muestra el curso de la infección de *T. rangeli* KP1(+) y *T. rangeli* KP1(-) en diferentes especies de triatominos. Se ha observado que cuando *T. rangeli* KP1(+) infecta

a *R. prolixus*, *R. robustus* o *R. neglectus*, los epimastigotes cortos atraviesan la pared intestinal e ingresan al hemocele, invaden los hemocitos y se multiplican dentro de ellos, y que los epimastigotes cortos luego son reemplazados por epimastigotes largos, los cuales se adhieren a las glándulas salivares y penetran en ellas para finalmente producir los tripomastigotes metacíclicos, que son las formas infectivas para el mamífero (Figura 4B). Otras observaciones inéditas en nuestro laboratorio mostraron que cuando *T. rangeli* KP1(+) infecta a *R. pallescens* y *R. colombiensis*, los epimastigotes cortos atraviesan la pared intestinal e ingresan al hemocele, invaden los hemocitos y se multiplican dentro de ellos, y luego se producen epimastigotes largos, que, sin embargo, son incapaces de adherirse a la superficie de las glándulas salivares y, por ende, no se producen tripomastigotes metacíclicos, probablemente por ausencia de lectinas específicas para facilitar la adhesión o por la ausencia de sustratos para las ectofosfatasa del parásito (Figura 4C). En contraste, cuando *T. rangeli* KP1(-) infecta a *R. pallescens*, *R. colombiensis* y *R. ecuadoriensis*, los epimastigotes cortos atraviesan la pared intestinal e ingresan al hemocele, invaden los hemocitos y se multiplican dentro de ellos, y luego los epimastigotes cortos son reemplazados por epimastigotes largos, los cuales se adhieren a las glándulas

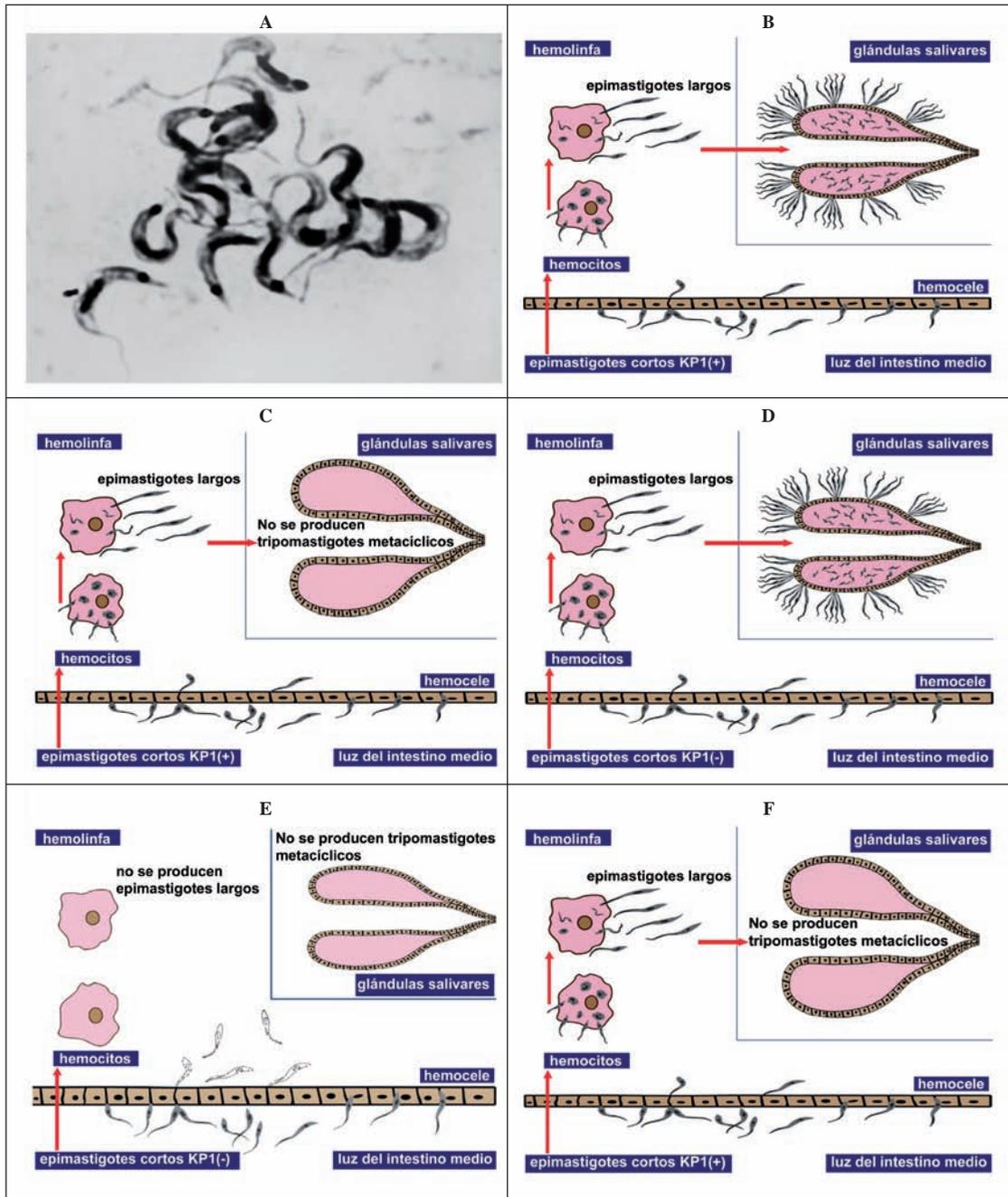


Figura 4. Desarrollo de las infecciones de *T. rangeli* KP1(+) y *T. rangeli* KP1(-) en diferentes especies de triatomíneos. **4A.** Tripomastigotes metacíclicos en glándulas salivares de *R. prolixus*, coloreados con Giemsa (x3.000) (Vallejo, 1984). **4B.** Infección de *T. rangeli* KP1(+) con producción de tripomastigotes metacíclicos en *R. prolixus*, *R. robustus* y *R. neglectus*. **4C.** Infección de *T. rangeli* KP1(+) en *R. pallidus* y *R. colombiensis* sin producción de tripomastigotes metacíclicos. **4D.** Infección de *T. rangeli* KP1(-) con producción de tripomastigotes metacíclicos en *R. pallidus*, *R. colombiensis* y *R. ecuadoriensis*. **4E.** Infección de *T. rangeli* KP1(-) en *R. prolixus* y *R. robustus* sin producción de tripomastigotes metacíclicos debido a que los epimastigotes cortos son lisados inmediatamente después de penetrar en la hemolinfa. **4F.** Infección de *T. rangeli* KP1(+) sin producción de tripomastigotes metacíclicos en *Triatoma infestans*, *Triatoma braziliensis*, *Triatoma sordida*, *Triatoma vitticeps* y *P. megistus* (De Stefani- Márquez, et al., 2006).

salivares, penetran en ellas para finalmente producir los tripomastigotes metacíclicos (Figura 4D). Cuando *T. rangeli* KP1(-) infecta a *R. prolixus* y *R. robustus*, los epimastigotes cortos atraviesan la pared intestinal e ingresan al hemocele

e inmediatamente son lisados por factores tripanolíticos presentes en la hemolinfa, de manera que no hay invasión de los hemocitos ni multiplicación dentro de ellos, y no se producen epimastigotes largos ni tripomastigotes metacíclicos

(Figura 4E). De Stefani-Márquez, *et al.*, (2006) infectaron *Triatoma infestans*, *Triatoma braziliensis*, *Triatoma sordida*, *Triatoma vitticeps* y *Panstrongylus megistus* con *T. rangeli* KPI(+) y observaron que los epimastigotes cortos atraviesan la pared intestinal, ingresan al hemocele, invaden los hemocitos y se multiplican dentro de ellos, y luego se producen epimastigotes largos, que, sin embargo, son incapaces de adherirse a la superficie de las glándulas salivares y no producen tripomastigotes metacíclicos (Figura 4F).

El conocimiento sobre los mecanismos bioquímicos o moleculares de la interacción de los tripanosomas y los vectores es aún incompleto, por lo tanto, es necesario identificar los genotipos de *T. rangeli* que son transmitidos por el resto de las 19 especies de *Rhodnius*, reconocer la estructura química del factor o factores tripanolíticos y comparar la expresión de los factores inmunes en las especies que presentan actividad tripanolítica o impiden la formación de tripomastigotes metacíclicos en las glándulas salivares. También deberá estudiarse el proteoma de las hemolinfas con actividad lítica y sin esta, así como el proteoma de las cepas sensibles o resistentes a la actividad lítica, para confirmar si la transmisión selectiva se extiende a todas las 19 especies de *Rhodnius*. Nuestro grupo de investigación está adelantando la identificación de proteínas en la hemolinfa de los vectores que podrían estar involucradas en la lisis de los genotipos de *T. rangeli* (Suárez, *et al.*, 2013). Igualmente, será necesario estudiar si existe alguna relación entre los factores tripanolíticos y la microbiota presente en el intestino del vector.

***T. cruzi*: interacción parásito-vector**

Debido a que en los últimos años se han acumulado evidencias acerca de la transmisión selectiva de los genotipos de *T. rangeli* en los vectores del género *Rhodnius*, ha surgido interés en la búsqueda de mecanismos similares en los vectores de *T. cruzi*, los cuales incluyen 148 especies de diferentes géneros de triatomíneos (Justi, *et al.*, 2014). A diferencia de *T. rangeli*, *T. cruzi* se desarrolla solamente en el intestino del vector y, por lo tanto, se enfrenta a factores propios del intestino como enzimas, hemolisinas y factores derivados de la microbiota. Aunque *T. cruzi* no circula por la hemolinfa del vector, estudios previos publicados por Mello, *et al.* (1996) mostraron factores tripanolíticos contra *T. cruzi* en la hemolinfa de *R. prolixus*. Por esta razón, nuestro grupo decidió explorar si en la hemolinfa de *R. prolixus* era posible detectar factores tripanolíticos contra las diferentes genotipos de *T. cruzi* (I-VI) previamente descritos por Zingales, *et al.* (2009, 2012). Utilizando la misma metodología usada para *T. rangeli*, se observó que la hemolinfa de *R. prolixus* presentó actividad lítica contra *T. cruzi* II y *T. cruzi* V (Zabala, *et al.*, 2011; Suárez, *et al.*, 2011). Esta actividad tripanolítica también se ha observado en *R. robustus* y se sospecha que está presente en las restantes especies del grupo Robustus: *R. neglectus*, *R. domesticus* y *R. nasutus*. Un factor tripanolítico con actividad para los

mismos genotipos de *T. cruzi* se detectó en el estómago de *R. prolixus* (Suárez, *et al.*, 2012). Llama la atención el hecho de que en las áreas geográficas en donde está presente *R. prolixus* predomina el genotipo *T. cruzi* I, el cual es resistente al factor tripanolítico, mientras que *T. cruzi* II, que es sensible, presenta muy baja prevalencia en estas áreas.

Además, en los últimos años se ha logrado identificar el papel de la microbiota del intestino de los vectores como reguladora de la respuesta inmune y de la infección por *T. cruzi* y por *T. rangeli* (Castro, *et al.*, 2012; Vallejo, *et al.*, 2009a). Se ha demostrado que la microbiota de *R. prolixus* produce lisis de *T. cruzi* II pero no de *T. cruzi* I. Se desconoce si existe alguna relación entre el factor tripanolítico detectado en la hemolinfa de *R. prolixus* y la microbiota intestinal, por lo tanto, es necesario realizar nuevos estudios en esta dirección. En concordancia con lo anterior, en Colombia se ha visto que en las infecciones naturales de *Rhodnius* predomina *T. cruzi* I sobre *T. cruzi* II (Vallejo, *et al.*, 2009b). Incluso en las infecciones generales en vectores y vertebrados existe predominio de *T. cruzi* I sobre *T. cruzi* II.

Durante el ciclo de vida de *T. cruzi* el parásito no llega a la hemolinfa del vector, por lo tanto, el factor tripanolítico de la hemolinfa de *R. prolixus* no tendría ningún efecto sobre el parásito. No obstante, se cree que este factor tripanolítico detectado en la hemolinfa podría ser un remanente de la inmunidad innata generada en otros tejidos, como el intestino o el cuerpo graso del vector, contra genotipos de *T. cruzi*. Estos resultados apoyan la hipótesis sobre la distribución geográfica de los genotipos de *T. cruzi* y *T. rangeli*, la cual dependería de la distribución geográfica de los vectores en América Latina.

Análisis del transcriptoma y del genoma de *T. rangeli*

La variabilidad genética de *T. rangeli*, su patogenia para el vector, y el hecho de ser infectivo pero no patógeno para el humano, ha estimulado los estudios de transcripción genómica de este parásito con el objetivo de compararlo con *T. cruzi*, *T. brucei* y *Leishmania* spp y así entender las bases moleculares de la patogenia de estas últimas especies y la ausencia de patogenia de *T. rangeli* para el vertebrado. Grisard, *et al.*, (2010) determinaron el perfil de expresión de *T. rangeli* a partir de la generación de etiquetas de secuencias expresadas (*expressed sequence tag*, EST) y una técnica denominada ORESTES, que combina los marcos abiertos de lectura (*open reading frame*, ORF) y las EST. Se analizaron 4.208 secuencias a partir de epimastigotes y tripomastigotes de la cepa SC-58, aislada de Santa Catarina (Brasil) y la Choachí, aislada de Cundinamarca (Colombia), representantes de los genotipos KPI(-) y KPI(+), respectivamente. El análisis comparativo de *T. cruzi*, *T. brucei* y *Leishmania major* permitió asignar las funciones biológicas putativas a la mayoría de las secuencias generadas y la organización de una base de genes anotados de *T. rangeli*. Aunque no es patógeno para los mamíferos,

varios genes asociados con virulencia en otras especies de cinetoplastidos patógenos se encontraron en *T. rangeli*, de manera que el significado biológico de la transcripción de estos genes requiere nuevos estudios. **Grisard, et al.**, (2010) estimaron en 8.500 el número de genes de *T. rangeli*, confirmaron la cercanía filogenética entre *T. cruzi* y *T. rangeli* e identificaron varios elementos transponibles, genes asociados a la expresión mitocondrial y genes específicos de la edición de ARN.

La genómica comparativa es una poderosa herramienta que al ser utilizada entre organismos patógenos filogenéticamente relacionados permite entender los fundamentos bioquímicos relacionados con sus ciclos de vida y las bases moleculares de las enfermedades que causan en el humano. En la actualidad se han secuenciado 25 especies del orden Kinetoplastida, incluidas especies de diferentes géneros de parásitos que infectan insectos y mamíferos, de los cuales los genomas de *T. brucei*, *T. cruzi* y *L. major* se han considerado como modelos. A estos se han añadido nuevas secuencias de genomas de *Leishmania* y *Trypanosoma* para estudiar comparativamente la biología compleja de las especies que infectan al humano. La secuenciación reciente del genoma de la cepa SC-58 de *T. rangeli* KP1(-), o genotipo D, es la primera lograda en esta especie infectiva, no patógena para el humano pero sí para el insecto vector (**Stoco, et al.**, 2014). El genoma haploide de *T. rangeli* es hasta hoy el más pequeño y menos variable de los tres genomas de tripanosomas que infectan al hombre: *T. cruzi*, 89,9 Mb, *T. brucei*, 26 Mb, y *T. rangeli*, 24 Mb. El genoma de *T. rangeli* fue comparado con el de *T. cruzi*, agente causal de la enfermedad de Chagas, y se encontraron diferencias entre las cuales se destacan las siguientes: 1) *T. rangeli* posee en su genoma menor número de copias de las familias multigénicas consideradas como factores de virulencia en *T. cruzi*, tales como las proteínas de superficie asociadas a mucinas (*mucin-associated surface proteins*, MASP), trans-sialidasas y mucinas. Las trans-sialidasas en *T. cruzi* remueven el ácido siálico de la superficie de las células del huésped y lo colocan sobre las moléculas de mucina de la superficie del parásito (**Frasch**, 2000). Esta transferencia de ácido siálico confiere protección al parásito frente a la activación de la cascada del complemento del huésped. Por el contrario, la sialidasa de *T. rangeli* no permanece unida a la superficie celular del parásito, sino que es liberada abundantemente en el medio de cultivo o en el intestino del vector, razón por la cual se sospecha que esta enzima podría alterar la microbiota intestinal y estar involucrada en la patogenia comprobada de *T. rangeli* para las especies de *Rhodnius* (**Pereira & Moss**, 1985; **Vallejo & Marinkelle**, 1992; **Stoco, et al.**, 2014); 2) *T. rangeli* posee en su genoma un reducido repertorio de genes que codifican enzimas de defensa antioxidante, de manera que *T. rangeli* es altamente susceptible al estrés oxidativo debido a la presencia de un pequeño número de estas enzimas y proteínas de choque térmico; 3) *T. rangeli* posee ortólogos vestigiales de la maquinaria de ARNi, la cual

es insuficiente para constituir una vía bioquímica funcional. Además, el análisis filogenético de genes mitocondriales y nucleares indicó que *T. rangeli* y *T. cruzi* son equidistantes de *T. brucei* (**Stoco, et al.**, 2014). En general, el análisis comparativo del genoma de *T. rangeli* permitirá un mayor entendimiento de la identidad, evolución, regulación y funcionamiento de los determinantes de la virulencia de los tripanosomas patógenos para los hospederos vertebrados y para los vectores; permitirá, igualmente, desarrollar mejores métodos de diagnóstico, así como la identificación de blancos terapéuticos para el tratamiento y el control de los tripanosomátidos patógenos.

Conclusiones

Después de la descripción de *T. rangeli* por Enrique Tejera en Venezuela en 1920, eminentes parasitólogos de Colombia y de América Latina han estudiado durante los últimos 94 años a este fascinante parásito infectivo y no patógeno para los humanos, pero patógeno para los insectos vectores. Los estudios bioquímicos y moleculares realizados en los últimos 25 años han revelado una extensa variabilidad genética del parásito y han mostrado la existencia de diversos genotipos que han evolucionado concertadamente con las especies de *Rhodnius*, de manera que los vectores han desarrollado mecanismos que impiden la transmisión de algunos genotipos pero permiten la transmisión de otros. Es así como *T. rangeli* KP1(-) circula en la línea evolutiva Pallescens (*R. pallescens*, *R. colombiensis*, *R. ecuadoriensis*) y *T. rangeli* KP1(+) circula en la línea Robustus (*R. prolixus*, *R. robustus*, *R. neglectus*). Nuestro grupo de investigación describió la existencia de factores tripanolíticos presentes en la hemolinfa de *R. prolixus* y *R. robustus* que eliminan las cepas de *T. rangeli* KP1(-), pero permiten la transmisión de *T. rangeli* KP1(+). Los factores tripanolíticos en la hemolinfa de *R. prolixus* y *R. robustus* también afectan la transmisión de algunos genotipos de *T. cruzi*, lo que sugiere que la dinámica de transmisión de los genotipos de *T. cruzi* y de *T. rangeli* depende fundamentalmente de las especies de vectores existentes en las diferentes áreas geográficas endémicas para estas dos especies de tripanosomas en América Latina.

Durante los últimos 10 años se han abordado los estudios genómicos y de transcripción de *T. rangeli* con la finalidad de comparar esta información con estudios similares en parásitos patógenos como *T. cruzi*, *T. brucei* y *Leishmania trópica*. Se encontró que el genoma de *T. rangeli* es el más pequeño y el menos repetitivo de los genomas de las tres especies de tripanosomas que infectan al hombre, lo que indica que las familias génicas que responden por la patogenia de *T. cruzi* para el vertebrado, se expresan en muy baja proporción en el genoma de *T. rangeli*, de forma que este carece del suficiente arsenal de proteínas y enzimas como las MASP y las trans-sialidasas, necesarias para invadir las células del mamífero. A diferencia de *T. cruzi*, *T. rangeli* secreta copiosamente las sialidasas en el intestino de

los vectores, lo cual podría afectar la microbiota bacteriana del insecto y generar un efecto patógeno para el vector (Stoco, *et al.*, 2014). Algunos investigadores consideran que en las regiones donde *T. rangeli* coexiste con *T. cruzi* en los mismos vectores y vertebrados, las infecciones de *T. rangeli* podrían alterar el curso de la enfermedad de Chagas en los vertebrados (Paláu, *et al.*, 2003), pues se ha observado que la vacunación de ratones, cobayos y perros con *T. rangeli* induce protección inmunitaria contra cepas virulentas de *T. cruzi* (Basso, *et al.*, 2007; Basso, *et al.*, 2008, 2014), lo que abre nuevas perspectivas para el control de la enfermedad de Chagas en los reservorios domésticos y, probablemente, en los humanos.

Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a la memoria del Dr. Cornelis Johannes Marinkelle (q.e.p.d.), bajo cuya dirección Gustavo Adolfo Vallejo, autor principal del presente artículo, inició en 1981 los estudios de *T. rangeli* en el CIMPAT de la Universidad de los Andes de Bogotá, y con quien mantuvo durante los siguientes 31 años estimulantes discusiones que motivaron y orientaron la búsqueda de respuestas al enigmático comportamiento de este parásito infeccioso y no patógeno para el humano.

Información suplementaria de agradecimientos, <http://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/143/623>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses relacionados con el contenido del presente artículo.

Bibliografía

- Abad-Franch, F., Monteiro, F.A., Jaramillo, O. N., Gurgel-Gonçalves, R., Dias, F.B., Diotaiuti, L. 2009. Ecology, evolution, and the long-term surveillance of vector-borne Chagas disease: A multi-scale appraisal of the tribe Rhodniini (Triatominae). *Acta Tropica*. **110** (2-3): 159-177. doi: 10.1016/j.actatropica.2008.06.005.
- Abad-Franch, F., Pavan, M.G., Jaramillo-O, N., Palomeque, F.S., Dale, C., Chaverra, D., Monteiro, F.A. 2013. *Rhodnius barretti*, a new species of Triatominae (Hemiptera: Reduviidae) from western Amazonia. *Mem Inst Oswaldo Cruz*. **108** Suppl 1: 92-99. doi: 10.1590/0074-0276130434.
- Azambuja, P. & García, E.S. 2005. *Trypanosoma rangeli* interactions within the vector *Rhodnius prolixus*: A mini review. *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*. **100** (5): 567-572.
- Azambuja, P., Ratcliffe, N.A., García, E.S. 2005. Towards an understanding of the interactions of *Trypanosoma cruzi* and *Trypanosoma rangeli* within the reduviid insect host *Rhodnius prolixus*. *Acad Bras Cienc*. **77** (3): 397-404.
- Basseri, H.R., Tew, I.F., Ratcliffe, N.A. 2002. Identification and distribution of carbohydrate moieties on the salivary glands of *Rhodnius prolixus* and their possible involvement in attachment/invasion by *Trypanosoma rangeli*. *Experimental Parasitology*. **100**: 226-234.
- Basso, B., Castro, I., Introini, V., Gil, P., Truyens, C., Moretti, E. 2007. Vaccination with *Trypanosoma rangeli* reduces the infectiousness of dogs experimentally infected with *Trypanosoma cruzi*. *Vaccine*. **25** (19): 3855-3858.
- Basso, B., Moretti, E., Fretes, R. 2008. Vaccination with epimastigotes of different strains of *Trypanosoma rangeli* protects mice against *Trypanosoma cruzi* infection. *Mem Inst Oswaldo Cruz*. **103** (4): 370-374.
- Basso, B., Moretti, E., Fretes, R. 2014. Vaccination with *Trypanosoma rangeli* induces resistance of guinea pigs to virulent *Trypanosoma cruzi*. *Vet Immunol Immunopathol*. **157** (1-2): 119-123. doi: 10.1016/j.vetimm.2013.10.011.
- Castro, D.P., Moraes, C.S., González, M.S., Ratcliffe, N.A., Azambuja, P., García, E.S. 2012. *Trypanosoma cruzi* Immune Response Modulation Decreases Microbiota in *Rhodnius prolixus* Gut and Is Crucial for Parasite Survival and Development. *PLoS ONE*. **7** (5): e36591.
- D'Alessandro, A. 1976. Biology of *Trypanosoma (Herpetosoma) rangeli* Tejera, 1920. In WHR Lumsden & DA Evans (editors), *Biology of Kinetoplastida*, Vol. 1, Academic Press, London, New York and San Francisco, pp. 327-493.
- D'Alessandro, A., Hincapié, O. 1986. *Rhodnius neivai*: A new experimental vector of *Trypanosoma rangeli*. *Am J Trop Med Hyg*. **35**: 512-514.
- D'Alessandro-Bacigalupo, A., Gore-Saravia, N. 1999. *Trypanosoma rangeli*. In: Gilles Herbert, M. (Ed.), *Protozoal Diseases*. Oxford University Press, Oxford, pp. 398-412.
- da Rosa, J.A., Mendonça, V.J., Gardim, S., de Carvalho, D.B., de Oliveira, J., Nascimento, J.D., Pinotti, H., Pinto, M.C., Cilense, M., Galvão, C., Barata, J.M. 2014. Study of the external female genitalia of 14 *Rhodnius* species (Hemiptera, Reduviidae, Triatominae) using scanning electron microscopy. *Parasit Vectors*. **7**: 17. doi: 10.1186/1756-3305-7-17.
- De Stefani-Márquez, M.D., Rodrigues-Ottaiano, C., Mônica Oliveira, R., Pedrosa, A.L., Cabrine-Santos, M., Lages-Silva, E., Ramírez, L.E. 2006. Susceptibility of different triatomine species to *Trypanosoma rangeli* experimental infection. *Vector Borne Zoonotic Dis*. **6** (1): 50-56.
- Dos-Santos, A.L.A., Dick, C.F., Alves-Bezerra, M., Silveira, T.S., Paes, L.S., Gondim, K.C., Meyer-Fernandes, J.R. 2012. Interaction between *Trypanosoma rangeli* and the *Rhodnius prolixus* salivary gland depends on the phosphotyrosine ecto-phosphatase activity of the parasite. *International Journal for Parasitology*. **42**: 819-827.
- Dos-Santos, A.L.A., Dick, C.F., Silveira, T.S., Fonseca-de-Souza, A.L., Meyer-Fernandes, J.R. 2013. *Trypanosoma rangeli*: An alkaline ecto-phosphatase activity is involved with survival and growth of the parasite. *Experimental Parasitology*. **135**: 459-465.
- Frasch, A.C.C. 2000. Functional diversity in the trans-sialidase and mucin families in *Trypanosoma cruzi*. *Parasitol Today*. **16**: 282-286.

- Freitas-Mesquita, A.L., & Meyer-Fernandes, J.R.** 2014. Ecto-nucleotidases and ecto-phosphatases from *Leishmania* and *Trypanosoma* Parasites. Proteins and proteomics of *Leishmania* and *Trypanosoma* Subcellular Biochemistry. **74**: 217-252.
- Garcia, E.S., Castro, D.P., Figueiredo, M.B., Genta, F.A., Azambuja, P.** 2009. *Trypanosoma rangeli*: A new perspective for studying the modulation of immune reactions of *Rhodnius prolixus*. Parasit Vectors. **2** (1): 33. doi: 10.1186/1756-3305-2-33
- Garcia, E.S., Genta, F.A., de Azambuja, P., Schaub, G.A.** 2010. Interactions between intestinal compounds of triatomines and *Trypanosoma cruzi*. Trends Parasitol. **26** (10): 499-505. doi: 10.1016/j.pt.2010.07.003
- Garcia, E.S., Castro, D.P., Figueiredo, M.B., Azambuja, P.** 2012. Parasite-mediated interactions within the insect vector: *Trypanosoma rangeli* strategies. Parasit Vectors. **5**: 105. doi: 10.1186/1756-3305-5-105
- Gomes, S.A.O., Fonseca de Souza, A.L., Kiffer-Moreira, T., Dick, C.F., dos Santos, A.L.A., Meyer-Fernandes, J.R.** 2008. Ecto-phosphatase activity on the external surface of *Rhodnius prolixus* salivary glands: Modulation by carbohydrates and *Trypanosoma rangeli*. Acta Tropica. **106**: 137-142.
- Grisard, E.C., Stoco, P.H., Wagner, G., Sincero, T.C.M., Rotava, G., Rodrigues, J.B., Snoeijs, C.Q., Koerich, L.B., Sperandio, M.M., Bayer-Santos, E., Fragoso, S.P., Goldenberg, S., Triana, O., Vallejo, G.A., Tyler, K.M., Dávila, A.M.R., Steindel, M.** 2010. Transcriptomic analyses of the avirulent protozoan parasite *Trypanosoma rangeli*. Molecular and Biochemical Parasitology. **174**: 18-25.
- Groot, H., Renjifo, S., Uribe, C.** 1950. Nota preliminar sobre inoculación a un voluntario humano con *Trypanosoma* sp. (Ariarii). An. Soc. Biol. Bogotá. **4**: 99-103.
- Groot, H., Renjifo, S., Uribe, C.** 1951. *Trypanosoma ariarii*. N. sp. from man, found in Colombia. Am. J. Trop. Med. **31**: 673-691.
- Groot, H.** 1952. Further observations on *Trypanosoma ariarii* in Colombia. Am. J. Trop. Med. Hyg. **1** (4): 585-592.
- Groot, H.** 1954. Estudios sobre los tripanosomas humanos clasificados como *T. rangeli* con especial referencia a su evolución en *Rhodnius prolixus* y a su comparación con *T. ariarii*. An. Soc. Biol. Bogotá. **6** (3): 109-126.
- Guhl, F. & Marinkelle, C.J.** 1982. Antibodies against *Trypanosoma cruzi* in mice infected with *T. rangeli*. Ann. Trop. Med. Parasitol. **76**: 361.
- Guhl, F., Hudson, L., Marinkelle, C.J., Morgan, S., Jaramillo, C.** 1985. Antibody response to experimental *Trypanosoma rangeli* infection and its implications for immunodiagnosis of South American trypanosomiasis. Acta Trop **42**: 311-318.
- Guhl, F. & Vallejo, G.A.** 2003. *Trypanosoma* (Herpetosoma) *rangeli* Tejera, 1920: An updated review. Memorias do Instituto Oswaldo Cruz. **98** (4): 435-442.
- Justi, S.A., Russo, C.A., Mallet, J.R., Obara, M.T., Galvão, C.** 2014. Molecular phylogeny of Triatomini (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae). Parasit. Vectors. **7**: 149. doi: 10.1186/1756-3305-7-149
- Machado, P.E., Eger-Mangrich, I., Rosa, G., Koerich, L.B., Grisard, E.C., Steindel, M.** 2001. Differential susceptibility of triatominae of the genus *Rhodnius* to *Trypanosoma rangeli* strains from different geographical origins. Int J Parasitol. **31**: 631- 633.
- Maia da Silva, F., Rodrigues, A.C., Campaner, M., Takata, C.S.A., Brígido, M.C., Junqueira, A.C.V., Coura, J.R., Takeda, G.F., Shaw, J.J., Teixeira, M.M.G.** (2004a). Randomly amplified polymorphic DNA analysis of *Trypanosoma rangeli* and allied species from human, monkeys and other sylvatic mammals of the Brazilian Amazon disclosed a new group and a species-specific marker. Parasitology. **128**: 283-294.
- Maia da Silva, F., Noyes, H., Campaner, M., Junqueira, A.C.V., Coura, J.R., Añez, N., Shaw, J.J., Stevens, J.R., Teixeira, M.M.G.** 2004b. Phylogeny, taxonomy and grouping of *Trypanosoma rangeli* isolates from man, triatomines and sylvatic mammals from widespread geographical origin based on SSU and ITS ribosomal sequences. Parasitology. **129**: 549-561.
- Maia da Silva, F., Junqueira, A.C., Campaner, M., Rodrigues, A.C., Crisante, G., Ramírez, L.E., Caballero, Z.C., Monteiro, F.A., Coura, J.R., Añez, N., Teixeira, M.M.** 2007. Comparative phylogeography of *Trypanosoma rangeli* and *Rhodnius* (Hemiptera: Reduviidae) supports a long coexistence of parasite lineages and their sympatric vectors. Mol. Ecol. **16**: 3361-3373.
- Maia da Silva, F., Marcili, A., Lima, L., Cavazzana Jr., M., Ortiz, P.A., Campaner, M., Takeda, G.F., Paiva, F., Nunes, V.L.B., Camargo, E.P., Teixeira, M.M.G.** 2009. *Trypanosoma rangeli* isolates of bats from Central Brazil: Genotyping and phylogenetic analysis enable description of a new lineage using spliced-leader gene sequences. Acta Trop. **109**: 199-207.
- Marinkelle, C.J.** 1968a. *Triatoma dimidiata capitata*, a natural vector of *Trypanosoma rangeli* in Colombia. Rev Biol Trop. **15**: 203-205.
- Marinkelle, C.J.** 1968b. Pathogenicity of *Trypanosoma rangeli* for *Rhodnius prolixus* Stal in nature. J Med Entomol **5**: 497- 499.
- Mello, C.B., Azambuja, P., Garcia, E.S., Ratcliffe, N.A.** 1996. Differential *in vitro* and *in vivo* behavior of three strains of *Trypanosoma cruzi* in the gut and hemolymph of *Rhodnius prolixus*. Exp Parasitol. **82** (2): 112-121.
- Meneguetti, D.U.O., Soares, E.B., Campaner, M., Camargo, L.M.A.** 2014. First report of *Rhodnius montenegrensis* (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) infection by *Trypanosoma rangeli*. Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical. **47** (3): 374-376. doi:10.1590/0037-8682-0179-2013
- Organización Panamericana de Salud.** 2007. Estimación cuantitativa de la enfermedad de Chagas en las Américas. Montevideo: (OPS/HDM/CD/425-06); pp. 6-17.
- Organización Mundial de la Salud.** 2014. La enfermedad de Chagas (Tripanosomiasis Americana). Nota descriptiva N° 340. 2014. Fecha de consulta: 4 de septiembre de 2014. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs340/es/index.html>

- Paláu, M.T., Mejía, A.J., Vergara, U. Zúñiga, C.A.** 2003. Action of *Trypanosoma rangeli* in Infections with virulent *Trypanosoma cruzi* populations. Memorias do Instituto Oswaldo Cruz. **98** (4): 543-548.
- Pereira, M.E.A. & Moss, D.** 1985. Neuraminidase activity in *Trypanosoma rangeli*. Molecular and Biochemical Parasitology. **15**: 95-103.
- Pulido, X.C., Pérez, G., Vallejo, G.A.** 2008. Preliminary characterization of a *Rhodnius prolixus* hemolymph trypanolytic protein, this being a determinant of *Trypanosoma rangeli* KP1(+) and KP1(-) subpopulations' vectorial ability. Memorias do Instituto Oswaldo Cruz. **103** (2): 172-179.
- Salazar-Antón, F., Urrea, D.A., Guhl, F., Arévalo, C., Azofeifa G., Urbina A., Blandón-Naranjo, M. Sousa, O.E., Zeledón, R., Vallejo, G.A.** 2009. *Trypanosoma rangeli* genotypes association with *Rhodnius prolixus* and *R. pallidus* allopatric distribution in Central America. Infection, Genetics and Evolution. **9**: 1306-1310.
- Schaub, G.A.** 2009. Interactions of Trypanosomatids and Triatomines. In Stephen J. Simpson and Jerome Casas: Advances in Insect Physiology, Vol. 37, Burlington: Academic Press. pp.177-242. ISBN: 978-0-12-374829-4.
- Schofield, C.J. & Dujardin, J.P.** 1999. Theories on the evolution of *Rhodnius*. Actualidades Biológicas. **21**: 183-197.
- Stoco, P.H., Wagner, G., Talavera-Lopez, C., Gerber, A., Zaha, A., Thompson, C.E., Bartholomeu, D.C., Lückemeyer, D.D., Bahia, D., Loreto, E., Prestes, E.B., Lima, F.M., Rodrigues-Luiz, G., Vallejo, G.A., Filho, J.F., Schenkman, S., Monteiro, K.M., Tyler, K.M., Almeida, L.G., Ortiz, M.F., Chiurillo, M.A., Moraes, M.H., Cunha Ode. L., Mendonça-Neto, R., Silva, R., Teixeira, S.M., Murta, S.M., Sincero, T.C., Mendes, T.A., Urmenyi, T.P., Silva, V.G., Da Rocha, W.D., Andersson, B., Romanha, A.J., Steindel, M., Vasconcelos, A.T., Grisard, E.C.** 2014. Genome of the Avirulent Human-Infective Trypanosome-*Trypanosoma rangeli*. PLoS Negl. Trop. Dis. **8** (9): e3176. doi: 10.1371/journal.pntd.0003176
- Suárez, Y., Vega, N., Zabala, D., Granada, Y., Roa, L., Gaitán X., Alvarado, U., Serrato C., Montilla, M., Teixeira, M., Urrea, D., Villa, L., Carranza, J.C., Vallejo G.A.** 2011. Factores tripanolíticos de la hemolinfa de *Rhodnius prolixus* que actúan sobre *Trypanosoma cruzi* II, V y VI, pero no sobre *T. cruzi* I, sugieren una transmisión selectiva de genotipos en Colombia, Venezuela y Centroamérica. Memorias del XX Congreso Latinoamericano de Parasitología Tropical y XV Congreso de Parasitología y Medicina Tropical. Biomédica. Bogotá Colombia. Octubre de 2011.
- Suárez, Y., Gaitán, X., Roa, L.A., Carranza, J.C., Vallejo, G.A.** 2012. La presencia de factores tripanolíticos en el estómago de *Rhodnius prolixus* contribuye a la transmisión selectiva de genotipos de *Trypanosoma cruzi* y *T. rangeli* en América Latina. Memorias del XLVII Congreso Nacional de Ciencias Biológicas. Santiago de Cali, Colombia, octubre de 2012.
- Suárez Y., González C.I., Díaz, M.L., Olaya, J.L., Gutiérrez, S., Carranza, J.C., Vallejo, G.A.** 2013. Análisis proteómico de diferentes especies de triatomíneos para identificar factores asociados a la transmisión selectiva de genotipos de *Trypanosoma cruzi* y *T. rangeli* en América Latina. Memorias del XXI Congreso de la Federación Latinoamericana de Parasitología (FLAP), Guayaquil, Ecuador. Octubre de 2013.
- Urbe, C.** 1929. Infección del *Rhodnius prolixus* Stahl por *Trypanosoma cruzi* y *Trypanosoma rangeli*. Revista Médico-Quirúrgica de los Hospitales. Bogotá. **3** (20): 133-137.
- Urrea, D.A., Carranza, J.C., Cuba-Cuba, C.A., Gurgel-Gonçalves, R., Guhl, F., Schofield, C.J., Triana O., Vallejo, G.A.** 2005. Molecular characterisation of *Trypanosoma rangeli* strains isolated from *Rhodnius ecuadoriensis* in Perú, *R. colombiensis* in Colombia and *R. pallidus* in Panamá, supports a co-evolutionary association between parasites and vectors. Infection, Genetics and Evolution. **5** (2): 123-129.
- Urrea, D.A., Herrera, C.P., Falla, A., Carranza, J.C., Cuba-Cuba, C., Triana-Chávez, O., Grisard, E.C., Guhl, F., Vallejo, G.A.** 2011. Sequence analysis of the spliced-leader intergenic region (SL-IR) and random amplified polymorphic DNA (RAPD) of *Trypanosoma rangeli* strains isolated from *Rhodnius ecuadoriensis*, *R. colombiensis*, *R. pallidus* and *R. prolixus* suggests a degree of co-evolution between parasites and vectors. Acta Tropica. **120**: 59-66.
- Vallejo, G.A.** 1984. Diferenciación entre las formas de desarrollo de *Trypanosoma cruzi* y las formas de desarrollo de *Trypanosoma rangeli* en el intestino del vector *Rhodnius prolixus*. Tesis para optar el título de Magister en Microbiología. Universidad de los Andes de Bogotá. 335 pp.
- Vallejo, G.A., Marinkelle, C.J., Guhl, F., de Sánchez, N.** 1988. Comportamiento de la infección y diferenciación morfológica entre *Trypanosoma cruzi* y *T. rangeli* en el intestino del vector *Rhodnius prolixus*. Revista Brasileira de Biología. **48** (3): 577-587.
- Vallejo, G.A. & Marinkelle, C.J.** 1992. Estudio sobre la presencia de neuraminidasa en *Rhodnius prolixus* infectado con *Trypanosoma rangeli*. Revista Latinoamericana de Microbiología. **34**: 91-94.
- Vallejo, G.A., Guhl, F., Carranza, J.C., Lozano, L.E., Sánchez, J.L., Jaramillo, J.C., Gualtero, D., Castañeda, N., Silva, J.C., Steindel, M.** 2002. KDNA markers define two major *Trypanosoma rangeli* lineages in Latin-America. Acta Tropica. **81** (1): 77-82.
- Vallejo, G.A., Guhl, F., Carranza, J.C., Moreno, J., Triana, O., Grisard, E.** 2003. Parity between kinetoplast DNA and minixon gene sequences supports either clonal evolution or speciation in *Trypanosoma rangeli* strains isolated from *Rhodnius colombiensis*, *R. pallidus* and *R. prolixus* in Colombia. Infection, Genetics and Evolution. **3** (1): 39-45.
- Vallejo, G.A., Guhl, F., Schaub, G.A.** 2009a. Triatominae-*Trypanosoma cruzi*/*T. rangeli*: Vector-Parasite Interactions. Acta Tropica. **110**: 137-147.
- Vallejo, G.A., Guhl, F., Carranza, J.C., Herrera, C., Urrea, D.A., Falla, A., Zabala, D., Villa, L.M.** 2009b. *Trypanosoma cruzi* population variability in Colombia: Possible co-evolution in different vector species. Revista de la Sociedad Brasileira de Medicina Tropical. **42** (Suplemento II): 27-34.

Zabala, D., Carranza, J.C., Urrea, D.A., Guhl, F., Jaramillo, N., Teixeira, M.M., Vallejo, G.A. 2011. Respuesta inmune diferencial de triatomíneos contra *Trypanosoma cruzi* y *T. rangeli*. Rev. Asoc. Col. Cienc. Biol. (Col.). **23**: 134-143.

Zingales, B., Andrade, S.G., Briones, M.R., Campbell, D.A., Chiari, E., Fernandes, O., Guhl, F., Lages-Silva, E., Macedo, A.M., Machado, C.R., Miles, M.A., Romanha, A.J., Sturm, N.R., Tibayrenc, M., Schijman, A.G. 2009. A new consensus for *Trypanosoma cruzi* intraspecific

nomenclature: Second revision meeting recommends TcI to TcVI. Mem Inst Oswaldo Cruz **104**:1051-1054.

Zingales, B., Miles, M.A., Campbell, D.A., Tibayrenc, M., Macedo, A.M., Teixeira, M.M., Schijman, A.G., Llewellyn, M.S., Lages-Silva, E., Machado, C.R., Andrade, S.G., Sturm, N.R. 2012. The revised *Trypanosoma cruzi* subspecific nomenclature: Rationale, epidemiological relevance and research applications. Infect. Genet. Evol. **12** (2): 240-53. doi: 10.1016/j.meegid.2011.12.009.

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN) 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 físicas (física, físico-química, materiales y matemáticas); ciencias naturales (biología, botánica, zoología, ecología, bioquímica, química); ciencias de la tierra (geología, medio ambiente); ciencias humanas (filosofía, psicología, antropología, sociología); ciencias biomédicas y ciencias químicas, 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, Online Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

La página web de la Revista (www.racefyn.co) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, al acceso y a la difusión de la producción científica.

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 37 volúmenes.

Criterios para publicar

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales en inglés o español y de alto nivel sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedan 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 internet (Ver transferencia de derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia debe aceptar mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original y no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado por otra publicación impresa o electrónica y que ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista y que los derechos de

autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad (Ver formato 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 debe ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad de los aportes de cada uno. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, que deben ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplen los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deben aparecer en la sección de agradecimientos, pero no ser citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deben aparecer en los agradecimientos.
5. La terminología física, química y bioquímica, debe seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deben usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos se deben escribir con la forma recomendada por “International Code of Botanical Nomenclature”

Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deben enviarse a través de <http://www.racefyn.co>

El manuscrito, incluyendo además de la página del título, el resúmenes, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de figuras, deben estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No olvide usar la numeración en todo el manuscrito.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo y apellido, 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.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés.
3. Título corto
4. Resumen en español y en inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis.

6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras.
9. Figuras en formato jpg o tiff.

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 la metodología empleada en el estudio.

Análisis estadístico: señalar los métodos estadísticos utilizados y cómo se han analizado los datos.

Resultados: deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y 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 la 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: Resumen de la investigación y su estado actual. Aquí se pueden plantear objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

Citación: todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre el apellido del autor o autores y el año de publicación entre paréntesis. 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 son tres, cuatro o cinco autores se pondrán los apellidos de todos los autores la primera vez que se referencian en el texto, y después sólo se pondrá el apellido del primer autor seguido de *et al.* Si son seis o más autores sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo "*et al.*", desde la primera vez que se referencian. Si existieran varias referencias de un autor en un mismo año se consignarán con las letras a, b, c, etc., después del año.

Cita directa o textual

Si la cita textual tiene menos de 40 palabras se presenta entre comillas dentro del texto y al final se incluye entre paréntesis el apellido, año de publicación y la página de donde se extrajo.

Ejemplo:

El objetivo de los estudios explicativos es "responder a las causas de los eventos físicos o sociales" (Hernández, Fernández y Baptista, 1991, p.66).

Si la cita comprende más de 40 palabras se ubica en un bloque independiente del texto, sin comillas y dejando una sangría al lado izquierdo.

Ejemplo:

Las revistas científicas son sistemas contextuales de comunicación, de difusión académico investigativa y fortalecimiento de competencias científicas (escritura, investigación, evaluación, edición), en los cuales la comunidad académica comparte creencias, orientaciones y el compromiso de contribuir, utilizar y hacer avanzar el conocimiento de forma colaborativa y cooperativa. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4).

Parafraseo o resumen

Se debe mencionar al autor y la fecha.

Ejemplo:

Según Sánchez (1991), el cemento es uno de los materiales más populares e indispensables en la construcción actual.

Existen dos tipos de aprendizaje: la recepción pasiva de conocimientos y el redescubrimiento de la realidad (Piaget, 1980).

Si se cita un documento escrito entre tres y cinco autores, deben escribirse los apellidos de todos la primera vez que se citen y después incluir el apellido del primer autor seguido de "*et al.*" (sin cursiva y con punto después del "al.>").

Si se cita un documento escrito por seis o más autores, se presenta la primera cita con el apellido del primer autor seguido de "*et al.*". En la lista de referencias escriba las iniciales y apellidos de los primeros seis autores y para los restantes utilice "*et al.*"

Lista de referencia

Es el listado alfabético (según el primer apellido de los autores citados en negrilla) de las fuentes consultadas y citadas durante la redacción de un trabajo. La lista de referencias es obligatoria. Se deben citar de la siguiente manera:

Libros

Autor. Año. Título completo. Edición. Editorial, lugar de publicación, página

Ejemplo:

Ramírez J. E., S.J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

Revista seriada

Autor, A.A., B.B. Año. Título del artículo. Título de la revista publicación seriada, volumen (número entre paréntesis), páginas del artículo.

Ejemplo:

Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L. 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la Rev. Acad. Colomb. Cienc. 38(147):218-22.

Artículo de revista electrónica

Ejemplo:

Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M. 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Fecha de consulta. Disponible en: <http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239714>

Artículo de periódico impreso:

Ejemplo:

Duque, J. G. 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

Tesis

Ejemplo:

Gómez Capera A.A. 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Congresos y simposios

Ejemplo:

Sánchez Upegui, A. A. Octubre 2010. *Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos*. En Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

Trabajos inéditos o publicaciones informales

Si el trabajo está disponible en un sitio web institucional o personal agregue el nombre de la institución y URL.

Ejemplo:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Disponible en: <http://..>

Materiales legales

En cuanto a las citas en el texto se proporcionan los mismos datos de cualquier referencia, autor, año y en lo posible

número de página, si no hay un autor identificado, se anotan las primeras palabras del título y la fecha.

Ejemplo:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

Tablas y figuras

Las tablas y cuadros se denominan tablas y llevan numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilice 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 figuras, se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se escriben 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 de lo contrario 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 a 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 apoya económicamente.

Proceso de revisión por pares

Se recibirán solo los artículos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los artículos serán evaluados en primera instancia por el Editor y el Comité Editorial de la Revista.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, que evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración de 20 días.

El editor informará a cada uno de los autores el avance de su trabajo en el proceso de evaluación.

Los pares académicos adoptan 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 una tercera evaluación.

En cualquiera de las opciones, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo en las cuatro semanas siguientes. Además deberá enviar un documento en el que responda a todas las observaciones hechas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, el artículo no será considerado para publicación en el siguiente número de la revista. En caso de sobrepasar dicho plazo, se entenderá que los autores retiran el trabajo en su forma actual y, si se remite de nuevo, el Comité Editorial de la Revista podrá considerar que se trata de un nuevo trabajo.

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

Aceptados los artículos estos se enviarán a corrección ortotipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará registro de cada una de las sugerencias realizadas y los comentarios o dudas para que el autor o autores aprueben y contesten.

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 y el número del volumen en que 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 ortotipográficos, de manejo visual de la información o imprecisiones involuntarias, el (los) autor(es) podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan realizarse en las versiones electrónicas de la Revista.

Falsificaciones 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 interés que pueda de alguna manera

influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, éste 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, etc.

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, etc.

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 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 y/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 a revisión junto con los manuscritos.

e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN).

Criteria for publication

Information for Authors

The authors must adhere to the following requirements:

1. The works submitted must be original, in English or Spanish, and of high quality 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 author submitting the work must confirm via written and signed communication that the manuscript represents original work and that it has not been published in any form, and that it is not under review by any other publisher for publication in hard copy or in electronic format and that publication in the Revista has been agreed by all authors, and the authors' rights have not been previously granted to a third party. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. The participation of the authors in the submitted work must be materially sufficient so as to share in the public responsibility of its contents. The order of appearance of the each of the authors of the publication must reflect a decision shared by all the co-authors, each of whom must be prepared to justify the order in which his name appears.
4. In accordance with the ICMJE (www.raccefyn.co), all collaborators who do not comply with the criteria for authorship, or who have realized minor contributions must be included in the Acknowledgement Section, and must not be cited as authors. The Acknowledgement Section must also include reference to any financial and economic assistance.
5. The terminology must adhere to the International Code for Botanical Nomenclature. The physical, chemical or biochemical terminology norms of the Nomenclature Committee of International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC). The abbreviations must follow the international conventions as well as the units must conform to the International System (SI). The scientific names must be written in the format recommended by the "International Code of Botanical Nomenclature".

Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.accefyn.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 Areal font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name , first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions, and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or tiff format.

Manuscript Structure

Introduction: there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

Materials and methods: a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

Statistical analysis: indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

Results: these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

Discussion: emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies.

The results and the discussion may also be presented in a combined form.

Conclusion: an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

Bibliography: these citations must be verifiable, enumerated and referred to in the body of the article enclosing each number with square brackets. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way:

Direct or textual quotation

If the textual citation has under 40 words it should be given in between quotation marks within the text and at the end it should include in parenthesis the surname, the year of publication and the page from which it was extracted.

Example:

The objective of the explicative studies is “to respond to the causes of the physical or social events” (Hernández, Fernández and Baptista, 1991, p.66)

If the citation goes over 40 or more words it must be placed in a separate block independent of the text, without quotation marks allowing for bleeding on the left margin.

Example:

The scientific journals are contextual system of communication, of academic or investigative diffusion and strengthening of scientific competence (writing, investigation, evaluation, editing), in which the academic community shares beliefs, orientation and the commitment to contribute, use and advance the formal knowledge of collaboration and cooperation. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4)

Paraphrase or summary

Mention must be made of the author and the date.

Example:

According to Sánchez (1991), cement is one of the most popular and indispensable materials in today’s construction.

There exist two types of learning: the passive reception of knowledge and the rediscovery of reality (Piaget, 1980)

If a cited document has between three or five authors, the surnames of all the authors must be given the first time they are cited and afterwards include the surname of the first author followed by “et al.” (not in italics and with a period after the “al.”).

If a cited document has six or more authors, place the first citation with the surname of the first author followed by “et al.” In the bibliographical list write the initials and surnames of the first six authors and for the rest use “ et al.”

Bibliographical list

It is the list, in alphabetical order (according to the first surname of the cited authors, which should be in bold) of the sources consulted and cited in the text of the article. It is mandatory to include the bibliographical list. It should be cited in the following way:

Books

Author. Year of publication. Title of the book. Edition. Publisher, place of publication, page(s).

Example:

Ramírez J. E., S.J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

Article from periodical journal

Author, A.A., Author, B.B. Year. Title of the article. Title of the journal, volume (number in parenthesis), pages.

Example:

Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L. 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la en la región nororiental del Perú. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 38(147):218-22.

On line periodical article

Example:

Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M. 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Date of query: (day, month, year). Available at: <http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239714>

Newspaper article

Example:

Duque, J. G. 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

Thesis

Example:

Gómez Capera A.A. 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Congresses and symposia

Example:

Sánchez Upegui, A. A. Octubre 2010. *Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos*. In: Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

Unpublished manuscript or informal publications

If the work is available at an institutional or personal web site, please add the name and URL of the institution.

Example:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Recuperado de <http://...>

Legal documents

Regarding the citations in the text, the same data included in all other references should be provided (author, year, and if available, the same page number). If there is no identifiable author, the first words of the title should be noted, as well as the date.

Example:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

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.

The peer-review process

Only articles which comply with the requirements mentioned in the information for authors will be accepted. The articles

will be given their first evaluation by the Editor and the Editorial Committee of the Revista.

Each manuscript will be sent to two experts on the topic who will provide recommendations after review and evaluation. This process of revision will have a duration of 30 days.

The editor will inform each of the authors of the status of the process of evaluation of their work.

The academic peers will adopt one of three options: a) acceptance without modifications; b) acceptance with corrections; c) Deny acceptance. In case of disagreement among the peers, the original manuscript will be sent out for a third evaluation.

Under any of the three options, the author will be informed and must follow the corresponding modifications of the manuscript and return it within the following four weeks. In addition, the author(s) must provide a written document with answers to all the peers observations.

If the author takes more than 30 days to respond to the suggestions from the reviewers, the article will not be considered for publication in the next issue of the Revista. In case the response from the author takes longer than the allocated time, it is understood that the authors will retrieve the work in its present form and, if a new submission is made, the Editorial Committee of the Revista may treat it as a new work.

The works accepted for publication become property of the Revista ACCEFYN and may be reproduced in their entirety or partially by the Revista.

The Revista does not assume responsibility for the scientific content, nor for the legal implications of any of the published articles.

Publication of the manuscript

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.

Conflicts of interest

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).

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 (ACCEFYN), except in the following cases:

a) 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, as long as the corresponding credit is given to the Revista of ACCEFYN. 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 of ACCEFYN.

b) 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.

c) If the Revista of ACCEFYN were approached for permission by a third party for using, printing or publishing specifically articles already published, the Revista of ACCEFYN must obtain the express permission of the author and co-authors of the work and/or of the employer with the exception of use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work.

d) The Revista of ACCEFYN reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

e) No other right, other than the author's right, can be claimed by the Revista of ACCEFYN.