

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

LA ACADEMIA ES ORGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXI

NOVIEMBRE DE 1997

NUMERO 81

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DIAZ-PIEDRAHITA



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Nota Editorial (Editorial)	391	Física (Physics)	
Astronomía (Astronomy)		Energía del estado base de átomos de la sucesión isoelectrónica del ortohelio. (Ground state energy in the isoelectric succession of orthohelium).	
On the thermal stability and the stellar plasmas dynamics.		<i>Hector R. Maya & Diógenes Campos</i>	497
<i>Mario A. Higuera G.</i>	393	Historia de la Ciencia (History of Science)	
Botánica (Botany)		Enrique Hubach (1896-1968) y la geología colombiana (Enrique Hubach [1896-1968] and Colombian Geology)	
Algunas novedades en asteráceas de Colombia (Some novelties in Colombian Asteraceae)		<i>Ricardo de la Espriella & Armando Espinosa B.</i>	503
<i>Santiago Díaz-Piedrahita & Gina Paola Méndez-Ramírez</i>	401	Matemáticas (Mathematics)	
Endemismos y otras singularidades de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. Posibles causas de origen y necesidad de conservarlas. (Endemic and other unusual plants of the Sierra Nevada de		Conectivos intuicionistas sobre espacios topológicos (Intuitionistic connectives concerning topologic spaces).	
Santa Marta, Colombia. Possible causes of origin and the necessity to conserve them).		<i>Xavier Caicedo F.</i>	521
<i>Eduino Carbonó & Gustavo Lozano-Contreras</i>	409	Química (Chemistry)	
Ciencias de la Salud (Health Sciences)		Diseño, construcción y calibración de un densímetro de flotación magnética (Design, construction, and calibration of a magnetic float densimeter).	
Evidencias de la asociación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el Fenómeno El Niño - Oscilación del Sur (Evidence of the association of epidemic outbreaks of malaria in Colombia and the phenomenon of El Niño/Southern oscillation).		<i>Carmen María Romero & Ricardo E. Munar</i>	535
<i>Germán Poveda & William Rojas</i>	421	Zoología (Zoology)	
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)		Ranas Centrolenidae de Colombia X. Los centrolénidos de un perfil del flanco Oriental de la Cordillera Central en el departamento de Caldas. (Centrolenid Frogs of Colombia X. The centrolenids of a profile of the eastern flank of the Cordillera Central in Departamento Caldas).	
¿Atractores extraños (CAOS) en la hidro-climatología de Colombia? (Strange attractors (CAOS) in the hydroclimatology of Colombia?).		<i>Pedro M. Ruiz-Carranza & John D. Lynch</i>	541
<i>Germán Poveda Jaramillo</i>	431	Una nueva especie de <i>Atelopus</i> (Amphibia: Anura: Bufonidae) de la Cordillera Central, Colombia. (A new species of <i>Atelopus</i> [Amphibia: Anura: Bufonidae] from the Cordillera Central, Colombia).	
Ecología (Ecology)		<i>Claudia Vélez-Rodríguez & Pedro M. Ruiz-Carranza</i>	555
Crecimiento de cuatro especies de los humedales forestales del litoral Pacífico colombiano. (Growth of four tree species in wet forests of coastal Pacific Colombia).		Notas Breves (Short notes)	
<i>José Ignacio del Valle-Arango</i>	445	La dinámica de las reacciones químicas ultrarrápidas en racimos moleculares iónicos (The dynamics of the very rapid chemical reactions in molecular ionic clusters)	
Una aplicación del análisis de varianza de medidas repetidas en un experimento con metales pesados (An application of analysis of variance of repeated measurements in an experiment with heavy metals).		<i>Eduardo A. Castro</i>	565
<i>Ramón Giraldo & Nestor H. Campos</i>	467	SIGBMA, Sistema de información geográfica para la determinación de biomas modificados por acción natural o antrópica. (SIGBMA, geographic information system for determining modifications of biomass by human or natural actions).	
Ecología de murciélagos antofílicos del sector La Curia, Serranía La Macarena (Colombia). (Ecology of flower-feeding bats in the La Curia region, Serranía La Macarena, Colombia).		<i>Leyla J. García</i>	569
<i>Yaneth Muñoz, A. Cadena & J.O Rangel Ch.</i>	473	Vida Académica (Academic Life)	575
Estimación del factor de retención de la red bolichera empleada en pesquería en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. (Estimation of the efficiency "boliche" net used in fishing in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribbean Colombia).		Constitución de la Academia (Members of the Academy)	581
<i>Mario E. Rueda, J.E. Mancera & J. Mendo</i>	487		

ON THE THERMAL STABILITY AND THE STELLAR PLASMAS DYNAMICS

por

Mario A. Higuera G.¹

Resumen

Higuera G., M. A.: On the thermal stability and the stellar plasmas dynamics. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(81): 393-400, 1997. ISSN: 0370-3908.

Se llevó a cabo una aproximación al conjunto de ecuaciones obtenidas del análisis de estabilidad de un plasma con abundancias solares, **Ibáñez, Steele, and Higuera (1995), Higuera (1995)**. Esta consistió en hacer que el coeficiente $\tilde{N} = 0$ (factor de estabilidad o inestabilidad) en el conjunto de ecuaciones obtenidas sea igual a cero (estado marginal), esto permite ejecutar un algoritmo que soluciona dicho sistema. La integración numérica realizada muestra el comportamiento de la temperatura del centro T_c con respecto a la temperatura de borde T_b , así como la dependencia entre el parámetro ϵ_* con T_c en la estructura laminar bajo estudio.

Palabras clave: hidrodinámica - inestabilidades - plasmas.

Abstract

It was carried out an approximation to the joint of equations obtained from the stability analysis of a plasma with solar abundance **Ibáñez, Steele, and Higuera (1995), Higuera (1995)**. Theses consisted in make the coefficient \tilde{N} (stability or instability factor) equal to zero (marginal state) permitting to execute an algorithm that solves the equations derived. The numerical integration shows the behavior of the center temperature T_c with respect to the boundary temperature T_b , as well as the dependency between the parameter ϵ_* with T_c in the laminar structure.

Key Words: hydrodynamics - instabilities - plasmas.

Introducción

During the past few years, both theoretical models, and numerical codes have substantially modified our knowledge about the thermal stability of a plasma with solar abundance. In a previous paper **Ibáñez, Parra-vano & Mendoza (1992)**. The generalized problem

Observatorio Astronómico Nacional
 Facultad de Ciencias
 Universidad Nacional de Colombia.
 Apartado Aéreo 2584.
 E-Mail:1.- ahiguera@ciencias.ciencias.unal.edu.co
 Santafé de Bogotá, Colombia.

(with cooling and heating terms included at the same time) were analyzed and they have been established that exist steady solutions which depends of three parameters: θ_o , θ_b and λ_* , the central and boundary temperatures and the dimensional parameter, respectively. A non-linear analysis were carried out **Ibáñez, et al** (1993) applying the **Landau** (1944) method, in a slablike systems. The second order approximation permitted them to derive some general conclusions about the nature and stability of nonhomogeneous thermal structures. On the other hand it was found that the nature of the thermal instability depends on a eigenvalue a_1 (linear approximation) and on a Landau constant a_2 , which is equal to $a_2 = \pi(m + n - 1 - k)/3$, if the system is found nearby marginal state ($a_1 \sim 0$). Furthermore under the no-linear analysis, they found that the values m , n and k , in conjunction with the direction of the disturbance are determinant to observe the evolution of the system.

In the present paper the above work will be generalized when one introduces dynamics. The object under study is a plasma with solar abundance, enclosed in a slablike thermal structure, which at the same time is affected by a warming-cooling function and a thermal diffusion of heat, dependent both of the temperature and density. The structure will be assumed to be initially in a steady-state at constant pressure with a given boundary temperature. Numerical results for particular cases are obtained.

Dynamic equations

Ideal gases with a ratio of specific heats, γ , and a mean molecular weight, μ are governed by

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} + \nabla p = 0, \quad (2)$$

$$\frac{R}{\mu} \left(\frac{1}{\gamma - 1} \rho \frac{DT}{Dt} - T \frac{D\rho}{Dt} \right) + \rho L(\rho, T) - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = 0, \quad (3)$$

$$p = \frac{R}{\mu} \rho T. \quad (4)$$

The previous four relations are the known gas dynamic equations, where ρ , v , p , T , κ , and R are: mass density, velocity, pressure, temperature, coefficient of thermal conductivity, and a gas constant, respectively. On the other hand $L(\rho, T)$ is the heat-loss function per unit mass and time which is defined as

$$\rho L(\rho, T) = \Lambda(\rho, T) - \Gamma(\rho, T), \quad (5)$$

being Γ , the heat liberated per unit volume and time by processes of an irreversible character and/or heat absorbed from and external source, and Λ , the heat loss rate per unit volume and time.

The relationships for the warming and cooling functions are given by,

$$\Gamma(\rho, T) = C \rho^a T^b, \quad (\text{erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}). \quad (6)$$

where C , a , b are constants given (**Rosner et al.**, 1978; **Dahlburg & Mariska**, 1988); and

$$\Lambda(\rho, T) = \rho^2 \Lambda_i \left(\frac{T}{T_i} \right)^\nu, \quad (\text{erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}), \quad (7)$$

(**Vesecky et al.**, 1979).

Furthermore the thermal conduction coefficient is taken under the form

$$\kappa(\rho, T) = \kappa_1 \rho^c T^q, \quad (8)$$

where κ_1 , c and q are given constants (**Parker**, 1953, **Spitzer**, 1962, **Ibáñez & Plachco**, 1991).

If is eliminated from the problem the temporary dependency, that is to say the derivatives with respect to the time are made equal to zero in the relations (1) - (4), is derived the stationary case studied by **Ibáñez, et al** (1992).

The geometry of the problem is a pair of parallel plates to constant pressure, in which the different functions (warming, cooling,) are evaluated point to point. **Higuera** (1995)

If for the thermodynamic variables involved in the problem, are introduced solutions of the form,

$$\Psi(x, y, z, t) = \Psi_o(x, y, z) + \delta\Psi(x, y, z, t), \quad (9)$$

to the joint of equations (1) - (4) (neglects non-linear terms in $\delta\Psi$) the system is reduced to

$$\frac{\partial}{\partial t}(\delta\rho) + \nabla \cdot (\rho_o \delta v) = 0, \quad (10)$$

$$\rho_o \frac{\partial}{\partial t}(\delta v) + \nabla \delta p = 0, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{R}{\mu} \left[\frac{\gamma}{\gamma-1} \rho_o \nabla T_o \cdot (\delta v) + \frac{\rho_o}{\gamma-1} \frac{\partial}{\partial t} (\delta T) - T_o \frac{\partial}{\partial t} (\delta \rho) \right] \\ + [\rho_o L_\rho + L_o - \nabla \kappa_\rho \cdot \nabla T_o - \kappa_\rho \nabla^2 T_o] \delta \rho \\ + [\rho_o L_T - \nabla T_o \cdot \nabla \kappa_T - \kappa_T \nabla^2 T_o] (\delta T) - \kappa_o \nabla^2 (\delta T) \\ - \kappa_\rho \nabla \delta \rho \cdot \nabla T_o - (\nabla \kappa_o + \kappa_T \nabla T_o) \cdot \nabla (\delta T) = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

where $Y_\xi = \partial Y / \partial \xi$.

If furthermore they are considered solutions in terms of normal modes (Chandrasekhar, 1961), i.e.

$$\begin{aligned} \frac{\delta \rho}{\rho_o} &= \eta(z) \exp[i(k_x x + k_y y) + \mathcal{N}t], \\ \frac{\delta T}{T_o} &= \theta(z) \exp[i(k_x x + k_y y) + \mathcal{N}t], \\ v &= v^1(z) \exp[i(k_x x + k_y y) + \mathcal{N}t], \\ \frac{\delta p}{p_o} &= \beta(z) \exp[i(k_x x + k_y y) + \mathcal{N}t], \end{aligned} \quad (13)$$

where $k_\perp \equiv (k_x, k_y)$ is the wave number normal to z and \mathcal{N} is the growth rate, one may simplify the problem into the following three differential equations

$$- \mathcal{N} \mathfrak{S} v_z^1 + \mathcal{N} \frac{dv_z^1}{dz} + (\mathcal{N}^2 + c_o^2 k_\perp^2) \eta + c_o^2 k_\perp^2 \theta = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\mathcal{N}}{c_o^2} v_z^1 + \frac{d\eta}{dz} + \frac{d\theta}{dz} = 0, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} v_z^1 \mathfrak{S} - c \chi_o \mathfrak{S} \frac{d\eta}{dz} - [2(q+1) - c] \chi_o \mathfrak{S} \frac{d\theta}{dz} \\ - \left[\frac{\gamma-1}{\gamma} \mathcal{N} - \frac{\gamma-1}{\gamma c_o^2} (\rho_o L_\rho + L_o) + \right. \\ \left. c(q+1-c) \chi_o \mathfrak{S}^2 + c \chi_o \delta \mathfrak{S} \right] \eta \\ - \chi_o \frac{d^2 \theta}{dz^2} + \left\{ \frac{1}{\gamma} \mathcal{N} + \chi_o k_\perp^2 + \frac{\gamma-1}{\gamma c_o^2} [T_o L_T - \right. \\ \left. (q+1) L_o] \right\} \theta = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

where $\mathfrak{S} = \frac{d \ln T_o}{dz}$, $\delta \mathfrak{S} = \frac{d^2 \ln T_o}{dz^2}$; $\chi_o \equiv \kappa_o / \rho_o c_p$ (thermometric conductivity), and c_o (the isothermal sound velocity, $c_o^2 \equiv RT_o / \mu$).

With the help of equation (15) the velocity may be eliminated, and reduce the set of equations (14)-(16) to two coupled ordinary differential equations. These equations can be written in a dimensional form as

$$\frac{d^2 \eta}{dz^2} - \left(\frac{\tilde{\mathcal{N}}^2}{\tilde{T}_o} + \tilde{k}_\perp^2 \right) \eta + \frac{d^2 \theta}{dz^2} - \tilde{k}_\perp^2 \theta = 0, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{S} \left\{ [2(q+1) - c] \tilde{\alpha} \tilde{T}_o^{q-c} \tilde{\mathcal{N}} + 1 \right\} \frac{d\theta}{dz} \\ + \tilde{\mathcal{N}} \left[\frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\tilde{\mathcal{N}}}{\tilde{T}_o} - \tilde{\alpha} \epsilon_* (2\tilde{T}_o^{-1} - a\tilde{T}_o^{m-1}) + \right. \\ \left. c(q+1-c) \tilde{\alpha} \tilde{T}_o^{q-c} \mathfrak{S}^2 + c \tilde{\alpha} \tilde{T}_o^{q-c} \delta \mathfrak{S} \right] \eta \\ \mathfrak{S} \left(c \tilde{\alpha} \tilde{T}_o^{q-c} \tilde{\mathcal{N}} + 1 \right) \frac{d\eta}{dz} + \tilde{\alpha} \tilde{T}_o^{q-c} \tilde{\mathcal{N}} \frac{d^2 \theta}{dz^2} + \\ - \tilde{\mathcal{N}} \left\{ \frac{1}{\gamma} \frac{\tilde{\mathcal{N}}}{\tilde{T}_o} + \tilde{\alpha} \tilde{T}_o^{q-c} \tilde{k}_\perp^2 + \tilde{\alpha} \epsilon_* [(\nu - q - 1) \tilde{T}_o^{n-1} - \right. \\ \left. (b - q - 1) \tilde{T}_o^{m-1}] \right\} \theta = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

where

$$\begin{aligned} \tilde{z} = \frac{z}{l}, \quad \tilde{T}_o = \frac{T_o}{T_*}, \quad \tilde{k}_\perp^2 = (lk_x)^2 + (lk_{and})^2, \\ \tilde{\mathcal{N}} = \tau_* \mathcal{N}, \quad \tau_* = \frac{l}{c_*}, \quad \tau_\chi = \frac{l^2}{\chi_*}, \quad \tilde{\alpha} = \frac{\tau_*}{\tau_\chi}, \\ \epsilon_* = \frac{l^2 \Gamma_1 T_*^{m-1}}{\kappa_*} = \frac{l^2 \Lambda_1 T_*^{n-1}}{\kappa_*}. \end{aligned} \quad (19)$$

In the above equations the subindex (*) refers to the respective quantity evaluated at the temperature T_* . In particular, c_* is the isothermal sound speed at T_* . Additionally, due to the fact that the steady pressure is a constant p_o , the heating and cooling functions were expressed in identical form as in Ibáñez, et al (1992), i.e. $\Gamma = \Gamma_1 T_*^m$, $\Lambda = \Lambda_1 T_*^n$, Γ_1 and Λ_1 being constants, and $m = b - a$, $n = \nu - 2$.

At this stage, the problem at hand has been reduced to finding the functions $\eta(z)$, $\theta(z)$ and the eigenvalues $\tilde{\mathcal{N}}$ for which the two equations (17) and (18) are compatible to each other for a given steady solutions $\tilde{T}_o(z)$ and for particular plasma conditions (i.e. for given values of c , q , a , b , and ν). Obviously, appropriate boundary conditions for free, or rigid bounding surfaces also have to be provided. Generally, the above problem has to be solved numerically. However, analytical solutions are possible for the steady trivial solution $\tilde{T}_o = 1$ which physically corresponds to the solution for thermal equilibrium. ($L_o = 0$). **Higuera.G.M.A (1994)**

On the other hand, the equations (17)-(18) also can be expressed in a matricial way:

$$\begin{pmatrix} \frac{d^2}{dz^2} & \frac{d}{dz} \\ E \frac{d}{dz} & F \frac{d}{dz} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \eta \\ \theta \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \eta \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{20}$$

where

$$A = - \left(\frac{\tilde{N}^2}{\tilde{T}_0} + \tilde{k}_\perp^2 \right) \tag{21}$$

$$B = -\tilde{k}_\perp^2 \tag{22}$$

$$C = \tilde{N} \left[\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\tilde{N}}{\tilde{T}_0} - \tilde{\alpha} \epsilon_* (2\tilde{T}_0^{n-1} - \alpha \tilde{T}_0^{m-1}) + c \tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} \right. \\ \left. \{ (q+1-c)\mathfrak{S}^2 + d\mathfrak{S} \} \right] \tag{23}$$

$$D = -\tilde{N} \left[\frac{1}{\gamma} \frac{\tilde{N}}{\tilde{T}_0} + \tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} \tilde{k}_\perp^2 + \tilde{\alpha} \epsilon_* \{ (\gamma-q-1)\tilde{T}_0^{n-1} - \right. \\ \left. (b-q-1)\tilde{T}_0^{m-1} \} \right] \tag{24}$$

$$E = \mathfrak{S} \left(c \tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} \tilde{N} + 1 \right) \tag{25}$$

$$F = \tilde{\alpha} \tilde{T}_0 \tilde{N} + \mathfrak{S} \left[(2(q+1)-c) \tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} \tilde{N} + 1 \right] \tag{26}$$

Marginal states

Independently of the boundary conditions, exists a non-trivial solution for the equation system (20) that corresponds to $\tilde{N} = 0$. This root identifies a shift of the static equilibrium values at constant pressure, where the change in density just equalizes the change in temperature.

If is replaced the value $\tilde{N} = 0$ in the equation (17) we obtain,

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \eta}{dz^2} + \tilde{k}_\perp^2 \eta &= - \left[\frac{d^2 \theta}{dz^2} + \tilde{k}_\perp^2 \theta \right] \\ \eta &= \theta \end{aligned} \tag{27}$$

On the other hand, if is replaced the previous resulted in the equation (18) and are reorganized the remaining terms, one obtained,

$$\begin{aligned} &\frac{d^2 \theta}{dz^2} \left(\tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} \right) + \frac{d\theta}{dz} \left[2(q+1-c) \tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} \right] \mathfrak{S} + \\ &\theta \left\{ \begin{aligned} & - \left[\frac{1}{\gamma} \frac{\tilde{N}}{\tilde{T}_0} + \tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} \tilde{k}_\perp^2 + \tilde{\alpha} \epsilon_* [(\nu-q-1)\tilde{T}_0^{n-1} - (b-q-1)\tilde{T}_0^{m-1}] \right] \\ & - \left[\frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\tilde{N}}{\tilde{T}_0} - \tilde{\alpha} \epsilon_* (2\tilde{T}_0^{n-1} - \alpha \tilde{T}_0^{m-1}) + c \tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} [(q+1-c)\mathfrak{S}^2 + \delta\mathfrak{S}] \right] \end{aligned} \right\} = 0, \end{aligned} \tag{28}$$

now if $\tilde{N} = 0$ finally one obtain,

$$\begin{aligned} &\frac{d^2 \theta}{dz^2} \left(\tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} \right) + \frac{d\theta}{dz} \left[2(q+1-c) \tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} \right] \mathfrak{S} + \\ &\theta \left\{ \begin{aligned} & \left[-\tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} \tilde{k}_\perp^2 - \tilde{\alpha} \epsilon_* [(\nu-q-1)\tilde{T}_0^{n-1} - (b-q-1)\tilde{T}_0^{m-1}] \right] \\ & + \left[\tilde{\alpha} \epsilon_* (2\tilde{T}_0^{n-1} - \alpha \tilde{T}_0^{m-1}) - c \tilde{\alpha} \tilde{T}_0^{q-c} [(q+1-c)\mathfrak{S}^2 + \delta\mathfrak{S}] \right] \end{aligned} \right\} = 0 \end{aligned} \tag{29}$$

Table 1
HEATING FUNCTIONS

Case	Description	a	b
A	Constant per unit volume heating	0	0
B	Constant per unit mass heating	1	0
C	Heating by coronal current dissipation	1	1
D	Heating by Alfvén mode/mode conversion	7/6	7/6
E	Heating by Alfvén mode anomalous conduction damping	1/2	-1/2

Five dominant heating processes in astrophysical plasmas.

Figure 1 is a plot of the previous heating mechanisms. In all cases the value of density was $\rho = 4.96$

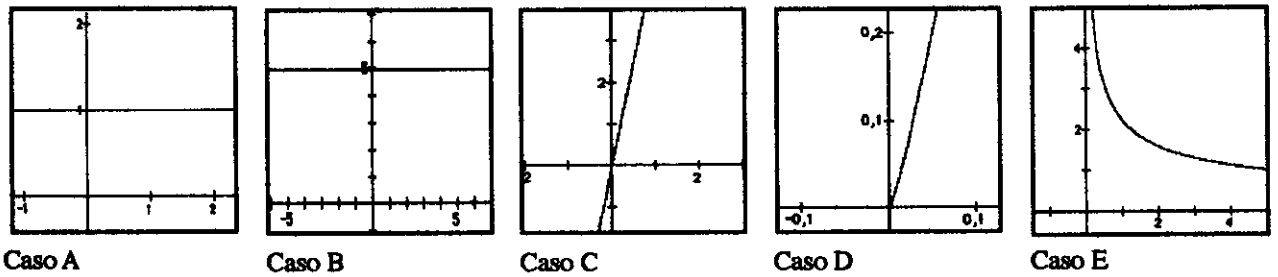


Figure 1. The heatings functions for five kinds of mechanisms, $\Gamma(\rho,T)=C\rho^aT^b$, see Table 1.

The steady state distributions of temperature are obtained through the equation,

$$\frac{d}{dz} \left(\tilde{T}_o^{q-c} \frac{dT}{dz} \right) = \epsilon_* \left[\tilde{T}_o^{\nu-2} - \tilde{T}_o^{b-a} \right], \quad (30)$$

where $\nu - 2 = n$ and $b - a = m$.

The cooling and heating functions

There are five heating processes, of particular importance in astrophysics, see for instance, Rosner, Tucker, & Vaiana (1978), Dahlburg & Mariska (1988) and references therein. Notice that the index m may only have two values, -1 , or 0 for the five heating mechanisms under consideration.

The Table 2 shows the different values for the terms of the cooling function.

Table 2
Radiated Loss Function

$T_i(K)$	Λ_i	ν
1.00×10^2	1.85×10^{17}	+0.4000
1.00×10^4	2.42×10^{24}	+7.1700
1.56×10^4	5.88×10^{25}	-0.8390
3.16×10^4	3.25×10^{25}	+1.4300
1.00×10^5	1.68×10^{26}	-0.0307
2.51×10^5	1.63×10^{26}	-1.7400
6.31×10^5	3.28×10^{25}	-0.0792
2.00×10^6	2.99×10^{25}	-0.6640
3.16×10^7	4.78×10^{24}	+0.2930
4.00×10^7	5.13×10^{24}	+0.500

Ten different values of the loss functions

Figure 2 shows the graphics related with the former table.

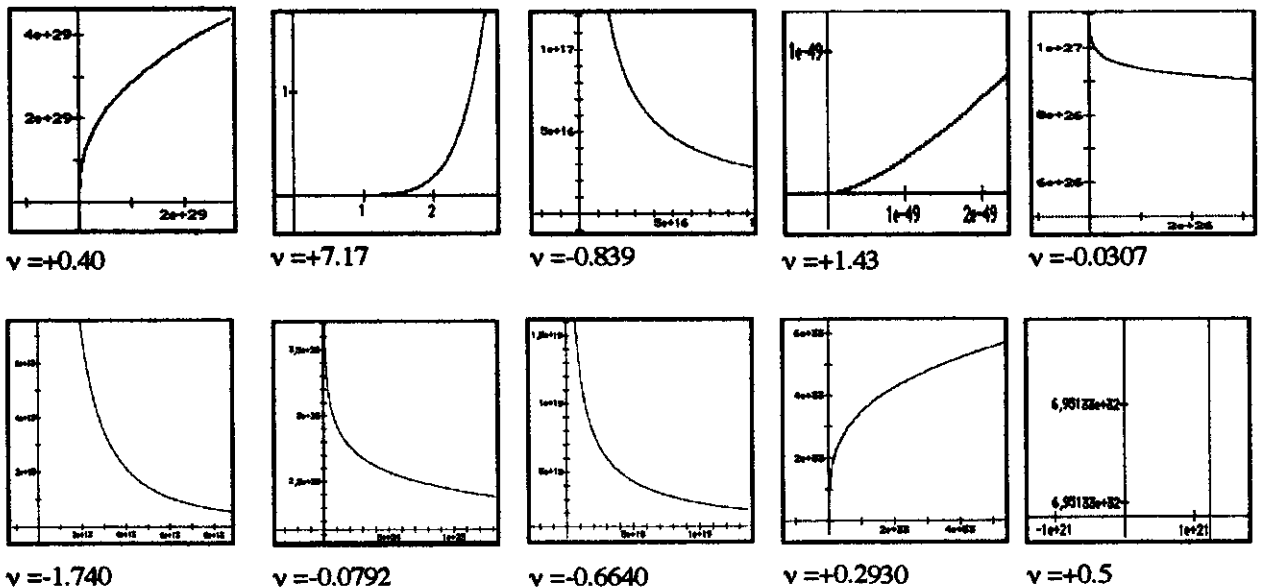


Figure 2. The cooling functions for the all diferents values shown in Table2, and $\rho = 4.96$.

Astrophysical Applications

For context, the case $n = -3/2$, $m = -1$ studied in paper I will be analyzed. This case corresponds to a slab of plasma with solar abundance heated at a rate constant per unit mass (case B), and cooled by free-free radiation ($\nu=1/2$). Additionally, under the above conditions, the heat diffusion is dominated by electrons and the well known relation of Spitzer (1962) holds (i.e. $c = 0$, $q = 5/2$)

The equations (29) and (30) represents the condition for $\tilde{N} = 0$. i.e. $\tilde{N}_r = 0$, $\tilde{N}_i = 0$. The boundary conditions are that $\theta = 1$, $\frac{d\theta}{dz} = 0$ when $\tilde{z} = 0$, and $\theta = 0$ when $\tilde{z} = 1$. As the system is oversubscribed by one quantity, ϵ_* plays the role of an eigenvalue.

Under this context the expression,

$$I = \int_0^1 \frac{1}{T} \left| \frac{dT}{dz} \right| dz, \quad (31)$$

defines de inhomogeneity of the system.

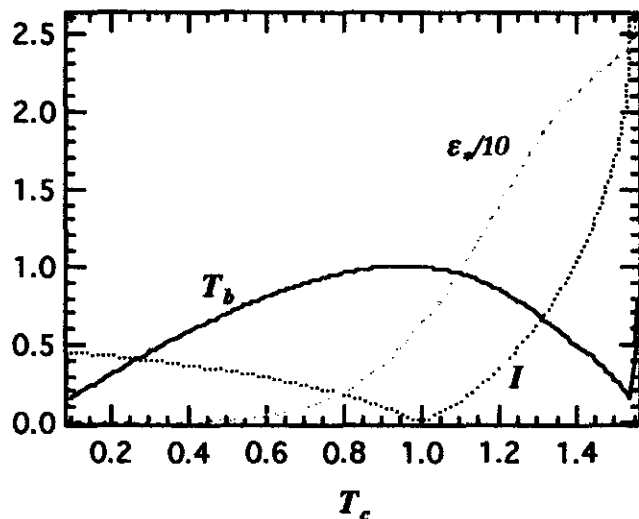
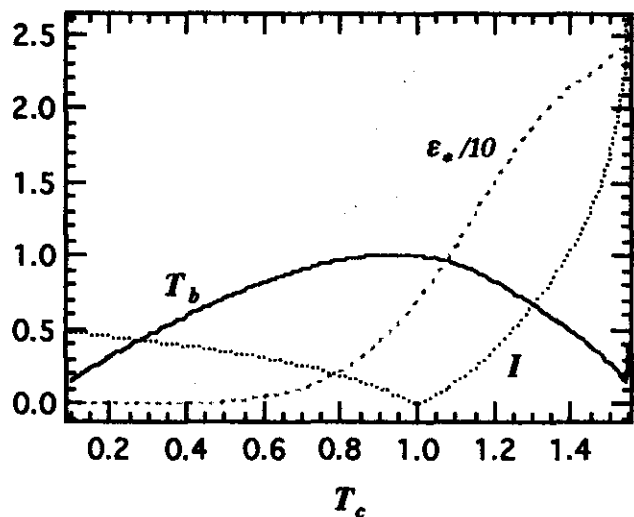


Figure 3. Constant heating per unit mass (Case B). Left picture corresponds to $K=1.0$, and right picture corresponds to $K=\pi/4$

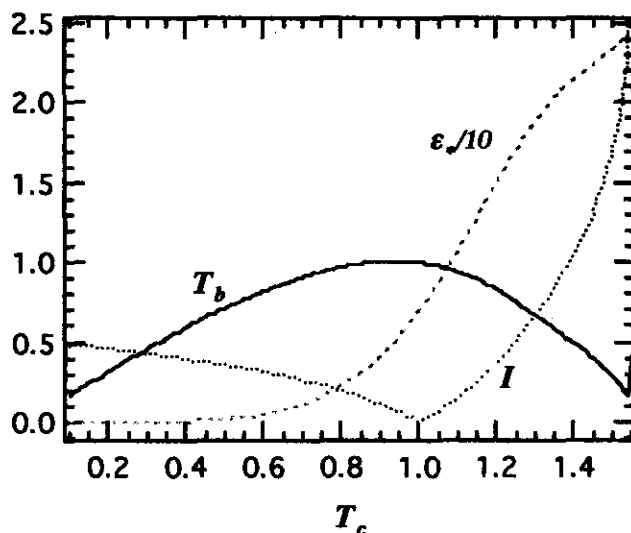
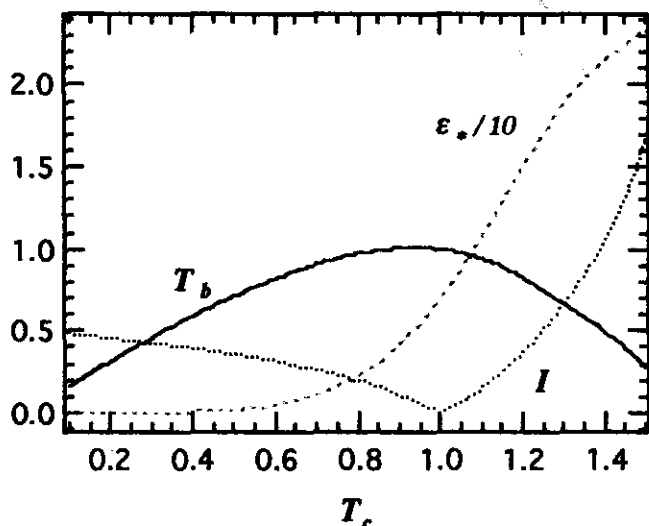


Figure 4. Constant heating per unit mass (Case B). Left picture corresponds to $\alpha=1.0$, and right picture corresponds to $\alpha=10$

With the help of a numerical code one can resolve this equations and obtain the dependency among the central temperature T_c and the frontier temperature T_b . On the other hand one can be derived the dependency among the parameter ϵ_* and T_c , as well as the factor of inhomogeneity I with T_c .

Figure 3 shows ϵ_* varying with \tilde{T}_c , also are plotted the parameter I and the outer temperature \tilde{T}_b for Case B. Left picture corresponds to $K = 1.0$ and right to $K = \pi/4$. The behavior of the edge temperature T_b as compared to the center temperature T_c in the laminar system, shows that for values of T_c less than 1, T_b grows in equal proportion, meanwhile for values of T_c greater than 1, T_c growing while T_b reduces. On the other hand for values of T_c greater than 1.45, T_b grows strongly. It is interesting to note that the parameter ϵ_* for values of T_c between 0,0 and $\sim 0,1$ stays constant, however above 0,5 grows in direct proportion to the central temperature. On the other hand the factor of inhomogeneity I for values of T_c among 0,0 and 1,0 decreases until a value of zero, however above this value grows in function of T_c .

Figure 4 shows the same variables as figure 3 but in this case it was maintained constant the value of K and was modified the parameter $\tilde{\alpha}$ between 0.1 and 10. Of course it does not exist any dependency of the variables with this parameter.

In the Figure 5, the parameter ϵ_* , the outer temperature \tilde{T}_b and the inhomogeneity I are plotted for Case A. The boundary temperature increases quickly with respect to the center temperature (for values of $T_c < 0,3$), above this temperature, T_c grows while T_b decreases slightly. On the other hand the parameter ϵ_* grows slowly with T_c . The factor I for values of $T_c > 1,0$ is resembled to show in the case B, however for $T_c < 1,0$ I grows strongly until $T_c \sim 0,2$ below of which these factor tends to reduce.

Conclusions

Such as in the previous work (Higuera, 1995), the general problem of own values was reduced to two coupled differential equations of second order those which should be solved numerically. It was made carry out the approximation $\tilde{N} = 0$ (marginal state) and was solved the set of corresponding equations.

Such as is observed in the Figure 4, and derived of the obtained equations, for the marginal state ($\tilde{N} = 0$) does not exist dependency of the variables involved with the parameter $\tilde{\alpha}$. The behavior of the center temperature versus the boundary temperature in the two cases (A and B) shows considerable differences. For example while for the range $0,0 < T_c < 0,3$ in the Case A, the frontier temperature increases more quickly than the central temperature, in the Case B grow proportionally. Now for the range $0.3 < T_c < 1.0$ in the Case A, T_b

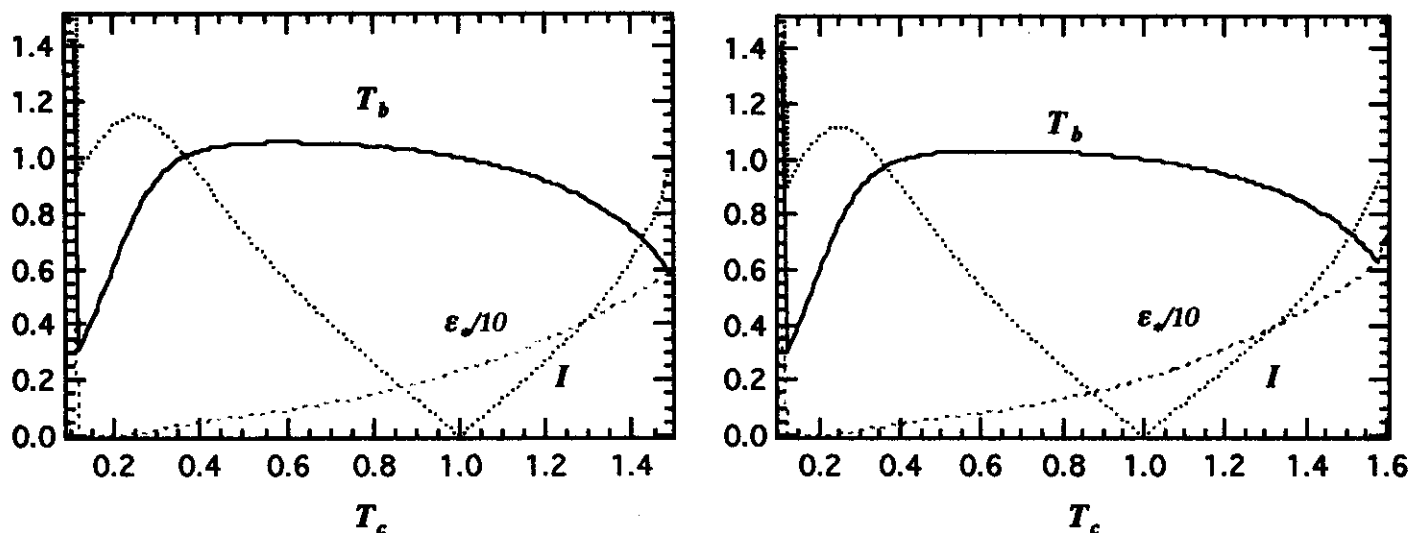


Figure 5. Constant heating per unit volume (Case A). Left picture corresponds to $K=1.0$, and right picture corresponds to $K=\pi/4$

stays approximately constant, while in the Case B, the two temperatures stay proportional. Finally for values $T_c > 1,0$ in the Case A, T_b decreases slowly while in the Case B decreases more quickly. Of the previous analysis can be concluded that for the Case A in the range $0.0 < T_c < 0.3$ this present an instability.

I want to express my more sincere gratefulness to the teachers Miguel H Ibáñez and Colin Steel by their help in the accomplishment of this work, as well as to the Observatorio Astronómico Nacional by its support.

References

- Chandrasekhar, S. 1961. Hydrodynamic and hydromagnetic stability (Oxford: Clarendon press).
- Dahlburg, R. B. & J.T. Mariska. 1988. Solar Physics, 117, 51.
- Higuera, G.M.A. 1995. Hidrodinámica en estructuras astrofísicas. Rev.Acad.Colomb.Cienc. 19(75) 641-650.
- Higuera, G.M.A. 1994, M.Sc Thesis. Universidad de Los Andes, Mérida. Venezuela.
- Ibáñez, S. M. H, Steel Colin & Higuera G.M.A. 1996 (in press)
- Ibáñez, S. M. H., & M. F. P. Plachco. 1991. On the thermal stability of slabs, cylinders and spheres. ApJ, 370: 743-751.
- Parravano A. & B. C. A. Mendoza. 1992. On the thermal structure and stability of configurations with heat diffusion and a gain-loss function. ApJ, 398: 177-185. (Paper I).
- Parravano A. & B. C. A. Mendoza. 1993. Non-linear instability of thermal field. ApJ, 407: 611-621. (Paper II).
- Landau, L.D. & E.M. Lifshitz. 1987. Fluid Mechanics (London: Pergamon).
- Parker E.N. 1953. ApJ. 117, 431.
- Rosner, R., Tucker, W. H., & G.S. Vaiana. 1978. Dynamics of the quiescent solar corona. ApJ, 220: 643-665.
- Spitzer, L. 1962. Physics of fully ionized gases (New York: Interscience publishers).
- Vesecky, J. F., Antiochos, S. K. & J. H. Underwood. 1979. ApJ, 233, 987.

ALGUNAS NOVEDADES EN ASTERACEAS DE COLOMBIA

por

Santiago Díaz-Piedrahita¹ y Gina Paola Méndez-Ramírez²

Resumen

Díaz-Piedrahita, S. & G. P. Méndez-Ramírez: Algunas novedades en Asteráceas de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(81): 401-408. 1997. ISSN 0370-3908.

Se proponen e ilustran cuatro nuevas especies de asteráceas, dos pertenecientes a la tribu Senecioneae [*Pentacalia* (*Pentacalia*) *guambiana* y *Pentacalia* (*Microchaete*) *fimbriifera*] y dos pertenecientes a la tribu Astereae (*Diplostephium fernandez-alonsoi* y *D. perijaense*). Igualmente se establecen una nueva combinación y un sinónimo en el género *Oyedaea* (Heliantheae).

Palabras claves: Asteraceae, *Pentacalia*, *Diplostephium*, *Oyedaea*, *Calea*, *Steiractinia*, Colombia, Botánica Sistemática.

Abstract

Four new species of Asteraceae are described and illustrated, two belonging to the tribe Senecioneae [*Pentacalia* (*Pentacalia*) *guambiana* and *Pentacalia* (*Microchaete*) *fimbriifera*] and two belonging to the tribe Astereae (*Diplostephium fernandez-alonsoi* and *D. perijaense*). Also a new combination and a new synonym are proposed in the genus *Oyedaea* (Heliantheae).

Key words: Asteraceae, *Pentacalia*, *Diplostephium*, *Oyedaea*, *Steiractinia*, Systematic Botany, Colombia.

En desarrollo de la revisión de los especímenes de *Pentacalia* Cassini (Senecioneae) y como parte de la monografía en preparación para la Flora de Colombia (Díaz - Piedrahita & Cuatrecasas), se han encontrado dos nuevas especies que se describen a continuación, la primera de ellas perteneciente al subgénero *Pentacalia* y la se-

gunda al subgénero *Microchaete*. Igualmente se describen dos nuevas especies de *Diplostephium* (Astereae) pertenecientes a las Series *Lavandulifolia* Blake y *Floribunda* Blake, y se señalan un sinónimo y una nueva combinación en el género *Oyedaea* DC. (Heliantheae).

***Pentacalia* (*Pentacalia*) *guambiana* Díaz sp. nov.**

Frutex scandens caule valido ramis robustis striatis sparse puberulis. Folia alterna subcoriacea rigida petiolata; petiolus robustus 3 - 4 cm longus marginatus (margine in specime incrassato usque ad 6 mm) basi breviter vaginatis, supra canaliculatis subtus carinatis

¹ Profesor Titular Instituto de Ciencias Naturales - Museo de Historia Natural, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Santafé de Bogotá. sdiaz@ciencias.ciencias.unal.edu.co

² Apartado Aéreo 27630, Santafé de Bogotá. gmendez@ciencias.ciencias.unal.edu.co



Figura 1. *Pentacalia guambiana* Díaz. Ejemplar tipo.



Figura 3. *Pentacalia fimbriifera* Díaz & Méndez. Ejemplar tipo.

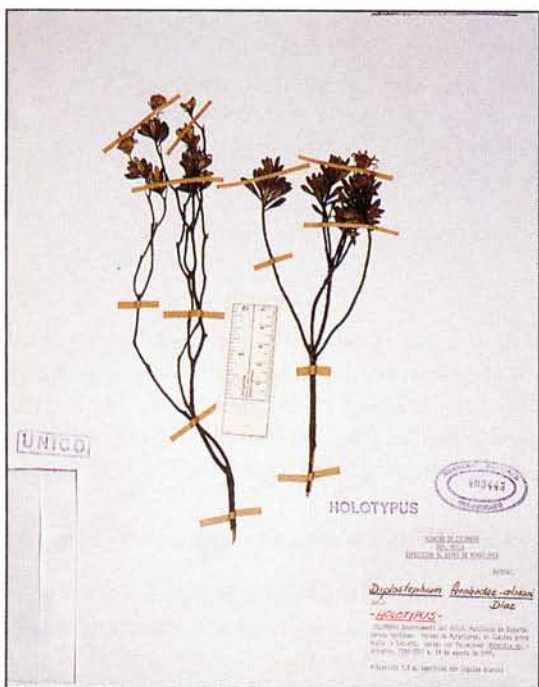


Figura 4. *Diplostephium fernandez-alonsoi* Díaz. Ejemplar tipo.



Figura 6. *Diplostephium perijaense* Díaz & Méndez. Ejemplar tipo.

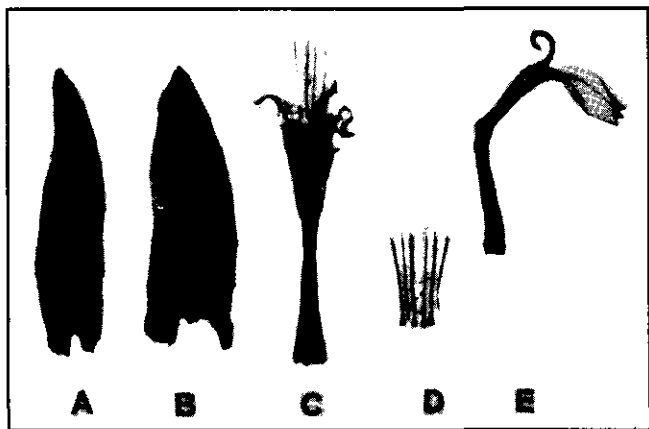


Figura 2. *Pentacalia guambiana* Díaz

A. Filaria exterior. B. Filaria interior. C. Flósculo. D. Anteras. E. Flor ligulada. (Tomado del tipo *S. Yepes - Agredo 3081* [COL]).

tomentosis. Lamina ovato elliptica saepe curvato-asymetrica basi truncata apice acuta vel apiculata 20 - 26 cm longa x 8 - 10 cm lata, margine crebre sinuato-dentata dentibus 2 - 3 mm profundis 4 - 7 mm distantibus paulo callosis et margine revolutis; supra glabra opaco nervato rugosa; subtus valde nervosa sparsissime pilosa vel glabra, costa crassissima eminenti nerviis secundariis utroque latere 26 - 30 mediam furcato anastomosantibus internervos laterales prominulum reticulum venulis venulisque formantibus.

Synflorescentiae thyrsoido - paniculata terminales exfoliatae valde evolutae vel axillares foliam longitudinem plus minusve aequantes. Pedunculus paniculae axillaris robustus 5.0 - 7.5 cm longus striatis parce pilosus; parte floriferae circa 20 cm longae ramusculis erectis pubescentibus bracteis lanceolato-linearibus inferioribus usque ad 4.5 cm longis x 0.3 cm latis superioribus linear - triangularibus flexuosis 1.0 - 1.5 cm longis. Pedicelli racemiformes dispositi erecto patuli, rigidi hirtuli bracteatis, bracteolis flexuoso intricatis superioribus 2 - 4 ad instar calyculum 9 - 11 mm longis x 1.0 - 1.2 mm latis. Capitula heterogama circa 12 mm alta; involucrem campanulatum; phyllaria herbacea valde inaequalia 8 in capitulo, 3 exteriora anguste - ovata acuta 8.0 - 9.5 mm longa x 2.5 - 2.6 mm lata extus glabra apice ciliato, interiora 8.0 - 8.5 mm longa x 3.2 - 4.0 mm lata anguste - obovata acuta late scariosa dorso incrassato; receptaculum planum 3 mm diam. marginibus alveolorum denticulatis. Flores exteriores feminei 5 corolla lutea leviter ligulata tubulo subcapillari 4 mm longo x 1.0 mm lato, limbo anguste - elliptico 4.2

- 4.8 mm longo x 1.3 - 1.4 mm lato, 3 - denticulato, dentibus ad apicem papillosis; stylus valde exsertus ad basim breviter incrassatus; rami stigmatici 2 mm longi valde incurvati; ovarium oblongum glabrum 3 mm altum x 1 mm latum; pappus albus 7.0 - 7.5 mm longus. Flores disci hermafroditi circa 19 in capitulo; corolla actinomorpha lutea 7 - 8 mm longa glabra, tubulo 4.0 - 4.5 mm longo angusto limbo campanulato lobis profundis anguste-triangularibus 1.5 mm longis x 1.0 mm latis mox recurvatis ad apicem granuloso - papillosis; antherae 2 mm longae basi valde caudatae caudae 0.8 - 1.0 mm longae, apice appendice anguste oblonga 0.6 mm longa; collum crassum basim 2.5 mm excedens; rami styli circa 2 mm longi subcomplanati valde incurvati apice truncato; ovarium glabrum 3 mm longum; pappus albus 8 mm longus.

Typus: COLOMBIA, Departamento del Cauca, Silvia, Guambia, 2800 m alt. Octubre de 1948, *Silvio Yepes Agredo 3081* (Holotypus COL [No.64421]).

Frútices con ramas escandentes, tallos gruesos, ramas robustas estriadas con indumento pubérulo y disperso; hojas alternas subcoriáceas, rígidas; pecíolos robustos de 3 - 4 cm, long, adaxialmente canaliculados, abaxialmente carinados y tomentosos, alados y ligeramente vaginados en la base por el desarrollo decurrente de la lámina, alas hasta de 6 mm lat; lámina foliar ovado - elíptica a menudo incurvada asimétricamente, truncada en la base y aguda o bien apiculada en el ápice, 20 - 26 cm long. X 8 - 10 cm lat, margen fuertemente sinuado - dentada, dientes de 2 - 3 mm de profundidad, separados entre sí 4 - 7 mm, algo callosos y con la margen revoluta; superficie adaxial glabra, opaca y rugoso - nervada; superficie abaxial abundantemente innervada, glabra o con pelos dispersos, nervio medio gruesísimo y eminente, nervios secundarios 26 - 30 por lado, fulcados hacia la mitad y anastomosados; retículo formado por los nervios secundarios y terciarios prominulo.

Sinflorescencias tirsoideo - paniculadas terminales áfilas y muy desarrolladas o también axilares y similares en longitud a las hojas subtendentes; pedúnculos de las panículas axilares robustos 5.0 - 7.5 cm long, estriados y poco pilosos; partes floríferas de cerca de 20 cm long. Ramillas erectas y pubescentes, bracteadas, brácteas lanceolado - lineares, las inferiores flexuosas y hasta de 4.5 cm long. X 0.3 cm lat, las superiores linear - triangulares, flexuosas y de 1.0 - 1.5 cm long., pedicelos de los racimos erecta - pábulos, rígidos, hirtulos y bracteolados, bractéolas flexuosas, intrincadas, las 2 - 4 superiores dispuestas a manera de cálculo y de 9 - 11 mm long. X 2 -

4 mm lat. Capítulos heterógamos de ca. 12 mm alt, involucro acampanado formado por 8 filarias herbáceas y algo desiguales, las 3 exteriores angosto - ovadas, agudas y de 8.0 - 9.5 mm long. X 2.5 - 2.6 mm lat, dorsalmente glabras y con la porción apical ciliada, las 5 interiores de 8.0 - 8.5 mm long. X 3.2 - 4.0 mm lat, angosto - obovadas, agudas, engrosadas en el dorso y anchamente escariosas; receptáculo plano de 3 mm diám, y con los márgenes de los alvéolos denticulados. Flores exteriores femeninas 5 por capítulo, corola amarilla ligeramente ligulada, porción tubular subcapilar de 4 mm long x 1.0 mm lat, limbo angosto - elíptico de 4.5 - 4.8 mm long x 1.3 - 1.4 mm lat., 3 - denticulado, dientes papilosos en la porción apical; estilo bastante exserto y brevemente engrosado en la base, ramas estigmáticas muy incurvadas y de 2 mm long, ovario oblongo, glabro y de 3 mm alt, x 1 mm lat, papus blanquecino de 7.0 - 7.5 mm long, setas estrigosas. Flores del disco hermafroditas ca. 19 en cada capítulo, corola actinomorfa amarilla de 7 - 8 mm long, glabra, porción tubular de 4.0 - 4.5 mm long, angosta, limbo acampanado, lóbulos profundos angosto - triangulares, 1.5 mm long x 1.0 mm lat, prontamente recurvados y granuloso - papilosos en el ápice; anteras de 2 mm long, notablemente caudadas en la base, caudas de 0.8 - 1.0 mm long, apéndice apical angosto - oblongo de 0.6 mm long, cuello engrosado de 0.6 mm long; ramas estigmáticas de ca. 2 mm long, subcomplanadas, marcadamente incurvadas y con el ápice truncado; ovario glabro de 3 mm long, papus blanquecino de 8 mm long, setas estrigosas.

Pentacalia (Microchaete) fimbriifera Díaz & Méndez sp. nov.

Frutex plus minusve ramosus, ramis ultimis striolatis albo-ochraceis densiuscule pubescentibus pilis araneosis intricatis adpressis vel subadpressis. Folia alterna subcoriacea petiolata. Petiolus robustus 1 - 2 cm longus, supra canaliculatus subtus carinatus. Lamina 5.0 - 6.0 cm longa x 2.5 - 3.5 cm lata, ovato-elliptica apice acuta breviter rostrata base truncata et leviter asymmetrica, margine integra vel breviter sinuata; supra viridia in vivo (in sicco brunnescens) araneoso tomentella denique fere glabra, costa depressa tomentulosa nervis secundariis impressis; subtus densissime ochraceo tomentosa (pilis tenuibus applicato-intricatis), costa crassa promineti, nervis secundariis 8-10 utroque latere prominulis ascendentibus saepe prope marginem tenuioribus evanescentisque, venulis minoribus obsoletis.

Synflorescentia terminalis erecta corymbiforme paniculata basi foliosa circa 10 cm expansa, dense

floribunda, ramis ramulisque laxae tomentosae indumento araneoso; bracteae subtendentes foliaceae lineari-lanceolatae 2.0-2.5 cm longae x 0.4 - 0.6 cm late: pedunculi 3.0-3.5 cm longi. Capitula discoidea cylindracea 10 mm alta, 6 mm longis x 0.8-1.0 mm latis subglabris. Involucrum circa 8 mm altum purpureo-brunnescens (in sicco); phyllaria 8 subuniseriata crasse herbacea carnosula rigidula, 5 exteriora angosto-ovata 6.3-6.8 mm longa x 2.1-3.0 mm lata, 3 interiora ovata aculata 6.4-6.5 mm longa x 2.1 - 3.0 mm lata, margine late scarioso eroso sparsis pilis longis flexuosisque ad apicem abaxiale obtusi-papillosa, apice ciliato. Receptaculum fimbriiferum circa 2.5 mm diam. squamis subulatis circa 0.5 mm longis. Flores 18 in capitulo omni tubulosi, hermaphroditi. Corollae flavae 6 mm longae glabrae, tubo 3 mm longo, limbo 3 mm longo, apice profunde dentatis, dentibus triangularibus 1.3 - 1.5 mm longis x 0.5 - 0.7 mm latis marginibus crassioribus apice incrassato praecipue adaxiale conspicue papilloso. Antherae 3 mm longae basi breviter acuteque sagittatae. Stigmata obtusa incurvata. Ovarium glabrum. Pappus albidus 4 mm longus setis minute strigulosis acutiscae.

Typus: COLOMBIA, Departamento de Nariño, Municipio El Tablón, Volcán Doña Juana, 3200-3500 m., 3 de abril de 1997, "Arbusto. Hoja verde oscura por la haz, verde clara por el envés con vellosidades. Flor blanca amarillenta", *G. Narváez & F. Røsero 06* (Holotypus COL [No. 402059]).

Arbustos con ramas terminales de 4 mm diám., canaliculadas, cubiertas por indumento aracnoideo blanquecino u ocráceo; hojas alternas subcoriáceas, rígidas; pecíolos robustos de 1 - 2 cm long, adaxialmente canaliculados, abaxialmente carinados y tomentosos; lámina foliar ovado - elíptica, 5 - 6 cm long. x 2.5 - 3.5 cm lat, agudo-rostrada en el ápice, redondeada a truncada en la base, lóbulos ligeramente desiguales, margen entera, ligeramente sinuada; superficie adaxial glabra o con escaso indumento aracnoideo caduco, blanquecino, verde oscura en vivo; superficie abaxial densamente tomentosa, verde pálido en vivo, tomento aplicado y ocráceo, nervio medio eminente, nervios secundarios 8-10 por lado, divergiendo en ángulo variable, los inferiores 20 grados, los superiores 45 grados.

Sinflorescencias organizadas en panículas corimbiformes con ca. 35 capítulos; pedúnculos de 3.0 - 3.5 cm long, pilósulos; brácteas subtendentes foliáceas 2.0 - 2.5 cm long. x 0.4- 0.6 cm. lat.; parte florífera de cerca de 10 cm long. Capítulos discoideos heterógamos de 10 mm alt x 6 mm diám, cálculo formado por 4

brácteas ovadas, 1.6 - 2.4 mm long x 0.8 - 1.0 mm lat, involucro cilíndrico formado por 8 filarias herbáceas castaño-rojizas, las 5 exteriores angosto - ovadas, agudas y de 6.3 - 6.8 mm long. x 0.8 - 2.0 mm lat, dorsalmente cubiertas por escaso indumento piloso y con la porción apical cubierta por unos pocos pelos villosos, las 3 interiores de 6.4 - 6.5 mm long. x 2.1 - 3.0 mm lat, ovadas, agudas, engrosadas en el dorso y cubiertas por escaso indumento como el de las exteriores; receptáculo ligeramente convexo de 2.5 mm diám., calculado, fimbriífero, fimbrias de ca. 0.5 mm long. Flósculos hermafroditos 18 por capítulo, corola actinomorfa amarillo pálido y de 6 mm long, glabra, infundibuliforme, porción tubular de ca. 3.0 mm long, ligeramente ensanchada en la base, limbo infundibuliforme, lóbulos profundos, triangulares, 1.3 - 1.5 mm long x 0.5 - 0.7 mm lat, recurvados; anteras de 3 mm long, caudadas en la base, caudas de 0.5 mm long, apéndice apical de 0.5 mm long; ramas estigmáticas de ca. 1.2 mm long, circinadas, ligeramente acanaladas y con el ápice truncado; aquenio glabro de 1.8 mm long x 1.0 mm lat, con carpopodio más claro, papus blanquecino de 4 mm long, setas estrigosas.

Pentacalia fimbriifera pertenece al grupo de *P. guadalupe*, *P. colombiana* y *P. tolimensis* constituido por arbustos bien ramificados con capítulos discoideos envueltos por 8 filarias, receptáculo alveolado fimbriífero y hojas pecioladas con el envés densamente tomentoso; muestra su mayor afinidad con *P. tolimensis* (Sch. Bip. ex Wedd.) Cuatr., de la que se separa fácilmente, entre otras características, por la forma de la lámina foliar (ovada y con base truncada vs. elíptica y con base cuneada o angostada). El epíteto específico alude a la presencia de receptáculo alveolado fimbriífero propio de este grupo y notorio en la nueva especie.

Diplostephium fernandez-alonsoi Díaz sp. nov.

Frutex circa 50 cm alta, ramis terminalibus dense foliosis subteretibus cicatricosis glabris brunneis. Folia alterna crassiuscula, coriacea uninervia pseudopetiolata; pseudopetiolus basi ampliatus vaginatus glabrus usque ad 2 mm longus. Lamina obovata apice obtusa mucronulata basi truncata margine revoluta 10 - 16 mm longa x 3.8 - 4.8 mm lata, supra glabra levissime rugosa subnitentia costa impressa, subtus arachnoideo-tomentella indumento intricato subcompreso fumeo sed costa pallido - viridi glabriuscula eminenti nervis inconspicuis.

Capitula solitaria terminalia heterogama 9 - 11 mm alta, pedicello 10 - 15 mm longo, erecto ebracteato hirsutulo. Involucrum tubuloso - campanulatum basi

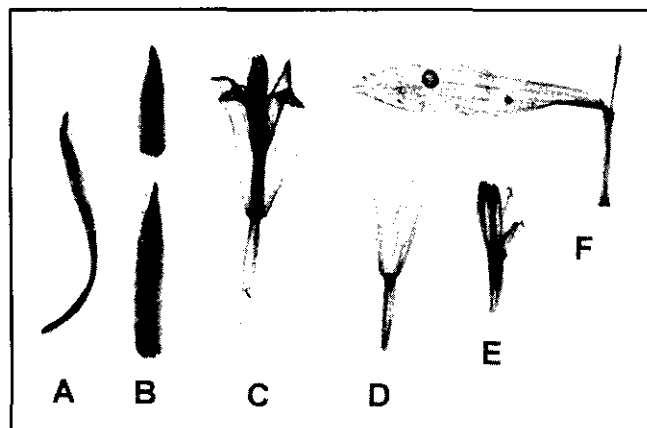


Figura 5. *Diplostephium fernandez-alonsoi* Díaz

A. Filaria interna. B. Filarias externas. C. Flósculo. D. Aquenio. E. Flósculo mostrando las anteras. F. Flor femenina ligulada. (Tomado del ejemplar tipo J. L. Fernández-Alonso, E. Linares, R. Vázquez & M.P. Balcázar 14861 (COL 403.443).

subrotundatum, phyllariis 4 - seriatis uninervis membranaceis firmis dorso parce crispo - pilosis vel glabris nitidulisque margine ciliatis interioribus angosto-ovatis 8.2 - 8.8 mm longis x 0.8 - 1.0 mm latis acutis, mediis linear triangulatis 4.5 - 6.8 mm longis x 1.0 mm latis, exterioribus anguste - triangulatis acutis 3.0 mm longis x 0.8 mm latis. Flores radii feminei ligulati circa 17 in capitulo, corolla exserta albida 10.4 - 11.5 mm longa tubulo 2.6 - 3.0 mm longo papilloso - pilosulo lamina angosto - obovata 4-nervata, 3-denticulata (dentibus 0.2 - 0.5 mm. long) 7.8 - 8.5 mm longa x 1.3 - 1.6 mm lata; stylus circa 6 mm longus ramulis crassiusculis lanceolatis 0.8 - 1.4 mm longis; ovarium fertile oblongo-ellipsoideum leviter compressum 3-costatum (2 costis inter se valde proximis) 2.8 - 3.0 mm longum sparsis glandulis et pilis. Pappus 5.3 mm longus setis exterioribus brevibus (ca. 3.8 mm long) plus minusve conspicuis. receptaculum alveolatum nudum planum circa 2.5 mm diametens marginibus alveolorum breviter dentatis. Flores disci pseudo-hermaphroditi circa 14 in capitulo corolla tubuloso - campanulata 4.5 - 6.0 mm longa, tubulo 1.8 - 2.0 mm longo parce minuteque pilosulo limbo ampliato quinquedenticulato dentibus triangularibus 0.8 - 1.3 mm long. x 0.4 - 0.5 mm lat. sursum papillosibus; antheris circa 0.8 mm longis basi breviter articulatis; stylus crassiusculus circa 4 mm longus apice pistilato acuto papilloso 1 mm longo; ovario sterille 3.8 - 4.3 mm lato lineari striato hispido et sparse glanduloso, pappo rigido circa 5 mm longo setis minute strigulosis acutisque interioribus longioribus.

Typus: COLOMBIA, Departamento del Huila, municipio de Gigante, vereda Ventanas, páramo de Miraflores, en límites entre Huila y Caquetá, 3250 - 3300 m. alt, 14 de agosto de 1997, "Arbustillo 0.5 m., capítulos con lígulas blancas". J. L. Fernández-Alonso, E. Linares, R. Vázquez & M.P. Balcázar 14861 (Holotypus COL [403.443]).

Frútices de cerca de 50 cm alt, ramillas terminales densamente foliosas, subcilíndricas, glabras y con cicatrices persistentes de las hojas caídas, corteza castaño oscura. Hojas alternas, ligeramente gruesas y coriáceas, uninervias y pseudopetioladas; pseudopetíolos ampliados en la base en una vaina glabra y abrazadora hasta de 2 mm long; lámina foliar obovada de 10 - 16 mm long. x 3.8 - 4.8 mm lat, obtusa en el ápice y rematada en un mucrón, truncada en la base y con la margen revoluta, superficie adaxial glabra, ligeramente rugosa y sub-brillante, nervio medio impreso; superficie abaxial cubierta de indumento aracnoideo, pelos intrincados y subcomprimidos de color gris con visos castaños; nervio medio glabriúsculo y de color verde pálido, nervios secundarios inconspicuos.

Capítulos terminales solitarios heterógamos radiados de 9 - 11 mm alt., pedicelos erectos, ebracteados e hirsútulos de 10 - 15 mm long, involucro tubuloso - acampanado y subredondeado en la base, filarias numerosas dispuestas en cuatro series, uninervias, membranáceas, firmes y con el dorso levemente cubierto de indumento crispo-lanoso o glabriúsculas, brillantes y con la margen ciliada, las interiores angosto-ovadas, agudas en el ápice y de 8.2 - 8.8 mm long. x 0.8 - 1.0 mm lat; las del medio lineares y de 4.5 - 6.8 mm long. x 1.0 mm lat, las exteriores angosto triangulares, agudas en el ápice y de 3.0 mm long. x 0.8 mm lat. Flores radiales femeninas liguladas blancas, ca. 17 por capítulo, corola exserta de 10.4 - 11.5 mm long, porción tubular de 2.6 - 3.0 mm long., piloso pilosula en la mitad superior, limbo formado por una lámina angosto - ovada de 7.8 - 8.5 mm long. x 1.3 - 1.6 mm lat., recorrida longitudinalmente por 4 nervios y rematada en tres dientecillos desiguales de 0.2 - 0.5 mm long.; estilo de ca. 6 mm long, ramas estigmáticas gruesecillas, lanceoladas y papilosas de 0.8 - 1.4 mm long.; ovario de 2.8 - 3.0 mm long., fértil oblongo- elipsóideo ligeramente comprimido, con tres costillas, dos de ellas muy próximas entre sí y cubierto laxamente por pelos y glándulas; papus de 3.8 - 5.3 mm long., setas ligeramente estrigulosas y agudas, las exteriores más cortas pero poco conspicuas Receptáculo alveolado, desnudo y aplanado de cerca de 2.5 mm de diámetro, márgenes de los alvéolos ligeramente

denticulados. Flores del disco pseudo-hermafroditas, cerca de 14 por capítulo, corola tubuloso-acampanada de 4.5 - 6.0 mm long, porción tubular de 1.8 - 2.0 mm long, pilósula en la mitad superior, limbo ensanchado y con cinco dientes triangulares de 0.8 - 1.3 mm long x 0.4 - 0.5 mm lat, papilosos en su parte superior; anteras de ca. 0.8 mm long, apéndice apical triangular, base brevemente auriculada; estilo engrosadito de ca. 4 mm long, ramas estigmáticas agudas y papilosas; ovario estéril, linear, estriado, hispido y con algunas glándulas dispersas, 3.8 - 4.3 mm long. x 0.4 mm lat, papus rígido de ca. 5 mm long., setas exteriores de 2-4 mm long, llas interiores más largas, todas similares a las de las flores femeninas.

Diplostephium fernandez-alonsoi Díaz pertenece a la serie *Lavandulifolia* Blake, caracterizada porque sus especies presentan capítulos terminales solitarios con flores radiales exsertas y generalmente alargadas, y hojas angostas con las márgenes bastante revolutas; muestra su mayor afinidad con *D. glandulosum* Hieron., especie de la que se separa fácilmente por presentar hojas obovadas y más anchas, pedicelos desnudos o carentes de brácteas, capítulos más pequeños y flores liguladas de color blanco.

El epíteto específico alude al destacado botánico español José Luis Fernández Alonso, primer colector de la especie.

***Diplostephium perijaense* Díaz & Méndez sp. nov.**

Arbuscula circa 5 m. alta ramis terminalibus foliosis subteretibus sparse cicatricocibus dense tomentoso-villosis brunneo-ochraceis pilis intricatis adpressis tectis.

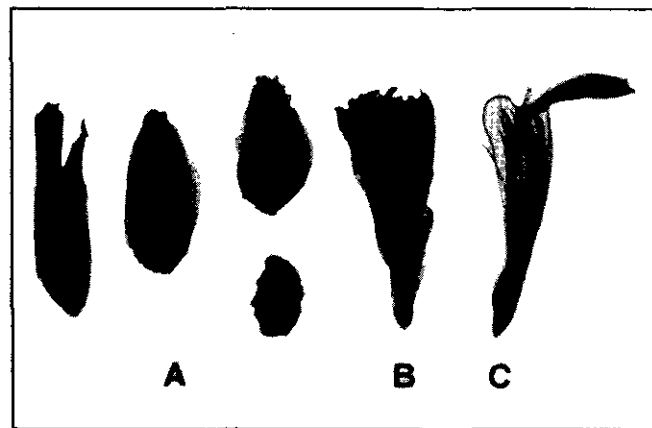


Figura 7. *Diplostephium perijaense* Díaz & Méndez

A. Filarias interna (izquierda) y externa (derecha). B. Flósculo. C. Flor femenina ligulada.

Folia alterna subcoriacea petiolata. Petiolus supra canaliculatus basi leviter ampliatus vaginatus tomentosus 5-9 mm longus. Lamina obovata apice obtusa basi cuneata margine integra breviter revoluta 3.4-5.4 cm. longa x 1.6-2.4 cm. lata, supra viridia glabra valde nitida nervo medio impresso nervis secundariis impressis reliquis obsolete, subtus ochracea dense adpressequo villosolanata costa crassa valde elevata nervis secundariis 12-14 utroque latere prominentibus patentibus prope marginem curvatis anastomosantibus.

Synflorescentiae terminales thyrsioido-corymbiferae quam folia suprema superantes ramis crassiusculis ebracteatis dense villosis pedunculis 1.0-1.5 cm longis, pedicellis 0.5-1.0 mm longis vel nullis. Capitula cylindraceo-campanulata heterogama radiata 0.5-0.8 mm alta. Involucrum tubuloso-campanulatum villosum phyllaris circa 30, 4-seriatis paleaceis plus minusve eroso ciliatis, interioribus anguste-ovatis sursum villosis acutis 4.0-5.0 mm longis x 0.5-1.0 mm latis, medis gradatis latoribus 3.0-3.5 x 1.0 exterioribus 2.0-2.5 mm longis x 1.0 mm latis. Flores radii feminei ligulati 10 in capitulo, corolla alba 5-6 mm longa, tubulo 3.0-3.5 mm longo pilosulo, lamina 1.5-2.5 mm long x 1.0 mm lat, obovata 4-nervata, 3-dentata. Stylus circa 3 mm longus ramis lanceolatis circa 1 mm longis papillosis. Ovarium fertile 0.6-0.8 mm longum obovoideum 3-costatum parce glandulosum dense strigoso-hispidum pilis acutis. Pappus 3.0-3.5 mm longus stramineus setis basi coalitis inaequilongis strigosis acutis exterioribus minoribus 0.2-1.2 mm longis.

Flores disci pseudohermaphroditi 15-20 in capitulo, corolla alba 3.0-3.5 mm longa tubulo 2 mm longo sursum papilloso, limbo tubuloso 5-lobulato, lobis triangularibus acutis, profundis extus minute papillosis 0.5-1.0 mm longis x 0.5 mm latis. Antherae 1 mm longae basi breviter sagittatae apice acute appendiculatae. Stylus extremo longe denseque papillosus breviter incisus ramulis extus papillosis. Ovarium sterile anguste-obovatum 1.5-2.0 mm longum 3-costatum strigoso-hispidum. Pappus exterioribus brevioribus strictis acutis 0.5-1.0 mm longis.

Typus: COLOMBIA, Departamento del Cesar, municipio de Manaure, Serranía del Perijá, camino entre casa de Vidrio y Cerro del avión, 2900 m. alt, 6 de noviembre de 1993, "72°53' W 10°25' N. Arbolito de 5 m.. Hojas seríceo-ferrugíneas por el envés, verde nítido por la haz, brácteas verdes variegadas con morado. Lígulas blancas. Flósculos pajizos". *O. Rangel, P. Franco, A. Rudas, J. R. Olmos, M. Pardo y M. Clavijo 11212* (Holotypus COL [403.457]).

Arbolitos de ca. 5 m alt. Ramas terminales foliosas, corteza marrón oscuro con indumento pubérulo y glándulas con cicatrices de las hojas caducas. Hojas alternas pecioladas, pecíolos de 5-9 mm long., ligeramente ensanchados en la base, adaxialmente canaliculados, abaxialmente hemisilíndricos, cubiertos de indumento villosus fusco; lámina foliar de 3.4 - 5.4 cm long. x 1.6-2.4 cm lat., subcoriácea, obovada, margen entera levemente revoluta; nervio medio inmerso por la haz, prominente por el envés, nervios secundarios 12-14 por lado, distanciados entre sí ca. 2 mm, divergiendo del nervio medio en ángulo de ca. 50° y anastomosados cerca de la margen, inmersos por la haz, prominentes por el envés, superficie adaxial glabra y brillante, superficie abaxial densamente villosa y ocrácea.

Sinflorescencias terminales tirsoideo-corymbiformes, sobresalientes del nivel de las hojas; ejes floríferos de 2.5-3.5 cm long, ebracteados, pedúnculos de 1.0-1.5 cm long, pedicelos de 0.5-1.0 mm long, ejes, pedúnculos y pedicelos cubiertos por denso indumento villosus-ocráceo. Capítulos acampanados de 0.5-0.8 mm alt., involucro formado por cerca de 30 filarias arregladas en cuatro series, las interiores angosto-ovadas, 4.0-5.0 mm long. x 0.5-1.0 mm lat., agudas en el ápice y con las márgenes eroso-ciliadas, las intermedias angosto-ovadas, 3.0-3.5 mm long. x 1.0 mm lat., agudas en el ápice, villosas en el dorso y con las márgenes ciliadas, las exteriores ovadas, 2.0-2.5 mm long. x 1.0 mm lat., densamente villosas en el dorso. Receptáculo de ca. 1 mm diam., alveolado y fimbriífero. Flores radiales femeninas ca. 10 por capítulo, corola blanca 5.0-6.0 mm long., porción tubular de 3.0 - 3.5 mm long., pilósula, limbo ligular-obovado, 4-nervado, 1.5 - 2.5 mm long x 1.0 mm lat, tridentado, dientes similares entre sí; ovario fértil obovoideo, 0.6-0.8 mm long., tricostado, comprimido, estrigoso-hispido y glanduloso, estilo de ca. 3 mm., ramas estigmáticas de ca. 1 mm long, lanceoladas y papillosas. Pappus estramíneo; setas exteriores de 0.2-1.2 mm long., agudas en el ápice y estrigosas, las interiores aplanadas en la base, agudas en el ápice, estrigosas, 3.0-3.5 mm long. Flores del disco pseudohermafroditas, 15-20 por capítulo, corola blanca, limbo 3.0-3.5 mm long., porción tubular de 2 mm long., papilloso, limbo tubuloso, 5-lobulado, lóbulos triangulares agudos, profundos de 0.5-1.0 mm long. x 0.5 mm lat., papillosos en el ápice. Anteras 1 mm long., base sagitada, apéndice apical agudo, estilo entero, 1 mm., pistilado y papilloso. Ovario estéril, angostamente obovado, de 1.5-2.0 mm long., con 3 costillas, comprimido, estrigoso-hispídulo, 3-3.5 mm long., pappus estramíneo, setas estrigosas, apicalmente dilatadas, las exteriores menores, agudas, 0.5-1.0 mm long.

Por la suma de sus características, *Diplostephium perijaense* Díaz & Méndez forma parte de la Serie *Floribunda* Blake, la cual agrupa a siete especies con sinflorescencias corimboso-paniculadas, flores femeninas con lígulas angostas de color blanco o raramente lila pálido, hojas pecioladas o sésiles con lámina plana, subcoriácea, subangosta y con la margen estrechamente revoluta, los nervios secundarios numerosos y pátulos y los capítulos tubulosos. Dentro de la serie, esta es la especie que presenta las hojas más anchas y las lígulas menos angostas. Muestra su mayor afinidad con *D. tolimense* Cuatr., especie de la que se puede separar por la forma de la lámina foliar claramente obovada, de mayor tamaño y lustrosa por la haz, así como por la consistencia de las filarias más gruesas, rígidas, enteras y cubiertas de abundante indumento, y las flores femeninas dos veces más anchas. Los nervios secundarios, aunque pátulos, se desprenden en un ángulo de cerca de 50°. *Diplostephium tolimense* Cuatr. es una especie polimorfa propia del bosque andino en la zona limítrofe con los páramos; prospera en el Parque de los Nevados en la Cordillera Central, extendiendo su área hasta la región de Barragán en el departamento del Valle, así como en los páramos de la Cordillera Oriental en territorio de los departamentos de Boyacá y Santander. Las poblaciones de la Cordillera Oriental son inseparables de las de la Cordillera Central, no así de la nueva especie aquí propuesta.

Oyedaea camargoana (Díaz) Díaz comb. nov.

Calea camargoana Díaz, Trianea 4: 274. 1991.
Tipo: municipio de Socha, alrededores de la población, 2500 m, 28 septiembre 1981, L. A. Camargo 8031 (COL), Boyacá, Colombia.

Por un error de apreciación, esta especie fue descrita en el género *Calea*. Aunque su aspecto general recuerda a tal género, las características del capítulo y en particular las del aquenio la ubican claramente dentro del género *Oyedaea*.

Oyedaea reticulata Blake

Steiractinia quetamensis Díaz & Vélez, Flora de Colombia 13: 32. 1990. Tipo: T. F. Stuessy et al. 5644 Holótipo COL.

De esta especie descrita por Blake en 1921 (Contr. U. S. Nat. Herb. 20: 415) con base en colecciones realizadas en 1855 por José Jerónimo Triana en Cáqueza a 1800 metros de altitud, existe en el Herbario Nacional Colombiano COL un isótipo recientemente identificado y en regular estado de conservación. El mismo, distinguido con el número 1383 = 2550/6, corresponde claramente con el tipo de *Steiractinia quetamensis* Díaz & Vélez herborizado en la misma región, motivo por el cual esta última especie se reduce a la sinonimia.

Agradecemos la colaboración en la labor fotográfica de Germán Galvis y Julio Cabra.

ENDEMISMOS Y OTRAS SINGULARIDADES DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA, COLOMBIA. POSIBLES CAUSAS DE ORIGEN Y NECESIDAD DE CONSERVARLOS

por

Eduino Carbone¹ & Gustavo Lozano-Contreras²

Resumen

Carbone, E. & G. Lozano: Endemismos y otras singularidades de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. Posibles causas de origen y necesidad de conservarlos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(81): 409-419, 1997. ISSN: 0370-3908.

La revisión de las especies de fanerógamas registradas como endémicas para la Sierra Nevada de Santa Marta permitió cuantificar 125 especies cuya distribución se restringe a esta unidad biogeográfica del territorio colombiano. Los taxones registrados 70 géneros y 30 familias diferentes. La cifra de las especies endémicas pertenecen a 6.77 % sobre el total de especies de angiospermas presentes en la Sierra Nevada de Santa Marta. El análisis de distribución de colecciones originales y de otras revisadas en los herbarios COL y UTMC establece que el 50 % de los endemismos se concentran en las zonas de los páramos y que las familias con mayor número de especies endémicas son: Asteraceae, 42; Melastomataceae 16; Bromeliaceae, y Apiaceae 7. Se presenta el listado de especies exclusivas y comentarios acerca de las condiciones y posibles causas de esta particularidad florística, también se formulan argumentos y recomendaciones sobre la necesidad de proteger algunos sitios cubiertos todavía por vegetación natural de marcada singularidad.

Palabras claves: Plantas con flores, endémica, Sierra Nevada de Santa Marta, única, vegetación natural, protección.

Abstract

Of 125 flowering plants reported as endemic from the Sierra Nevada of Santa Marta is presented. The taxa included in the list, belong to 70 genera and 30 different families and represent a 6.77% of the total number of species known from this area. 50% of the endemism are from the Paramos and these plant a greater number of families with endemisms are: Asteraceae with 42 species, Melastomataceae 16 species, Bromeliaceae and Apiaceae with 7. A discussion

¹ Herbario Universidad del Magdalena, Apartado aéreo 731, Santa Marta.

² Herbario Nacional Colombiano. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado aéreo 7495, Santafé de Bogotá.

about the posible causes of this floristic singularity is included together with some arguments and recomendations for protecting those sites still covered by a unique natural vegetation.

Key words: Flowering Plants, endemic, Sierra Nevada of Santa Marta, unique, Natural vegetation, protection.

Introducción

Aunque se conocen varias publicaciones que enuncian la existencia de endemismos vegetales o presentan listados de plantas endémicas de la Sierra Nevada de Santa Marta no se había efectuado una evaluación acerca de esta situación. Esta contribución pretende demostrar la importancia biológica de uno de los complejos orográficos aislados del territorio colombiano, desde el punto de vista de las plantas superiores que hasta el momento se han registrado únicamente de esta región. Sobre esta consideración, mediante la constatación de evidencias disponibles y revisión de literatura sobre el tema, se efectuó un estudio detallado acerca de los grupos de magnoliofitas con mayor distribución neotropical para la cuantificación de especies con distribución exclusiva en este macizo.

El criterio seguido para determinar la condición endémica de los taxones fue establecer una distribución restringida a la Sierra Nevada, excluyendo todas aquellas de las cuales se encontraron registros de recolección en áreas fuera de sus límites estrictos; en consideración de lo anterior no se tuvieron en cuenta especies con registros de recolección extendidos a regiones aledañas como la Serranía de Perijá.

La nomenclatura de las especies de fanerógamas endémicas de la Sierra se obtuvo a través de la revisión de cerca de 100 publicaciones, entre las cuales se consultaron las publicaciones originales de los taxones, monografías recientes, listados florísticos y listados de computador de algunas colecciones procedentes de Colombia depositadas en US. La consulta también abarcó las colecciones de ejemplares depositadas en los herbarios COL y UTMC.

El número de especies endémicas de fanerógamas que se registran en este trabajo representa una primera valoración de la magnitud total existente, a partir de la cual logra una aproximación de este aspecto particular, como a la de toda la flora de la Sierra.

Características físicas y ambientales de la Sierra Nevada de Santa Marta

El sistema montañoso denominado Sierra Nevada de Santa Marta es un macizo aislado de la cordillera de los Andes que se localiza al norte de la República de Co-

lombia, entre los 10° 01' 05" y 11° 20' 11" de latitud norte y 72° 36' 16" y 74° 12' 49" de longitud al oeste del meridiano de Greenwich, en el extremo noroccidental de Sudamérica. Sobre una base de contornos subtriangulares se levanta a orillas del mar Caribe hasta 5775 msnm. ocupando un área aproximada de 12.230 km cuadrados; tiene el costado norte paralelo a la línea costera en jurisdicción de los departamentos de Guajira, al nororiente, y Magdalena al noroccidente; el lado occidental encara la planicie aluvial del río Magdalena y la Ciénaga grande de Santa Marta; mientras en el lado sur, es enmarcado por los valles de los ríos Cesar al suroccidente y Ranchería al nororiente, en los departamentos de Cesar y Guajira.

Sobre un eje que se orienta en dirección noroccidente, las cadenas de picos con nieves permanentes se encuentran a aproximadamente 60 km en línea recta desde el mar y por encima de los 3000 metros de altitud se producen muchos lagos de origen glaciar en los cuales se forman los ríos más caudalosos y extensos que descienden por sus laderas e integrantes de tres grandes vertientes que alcanzan a contener unas 30 cuencas principales.

En razón de la diferenciación altitudinal, de las características que prestó el levantamiento y de la orientación frente a los vientos alisios del nordeste, ocurre gran diversidad ecológica, que se expresa en el rango amplio de zonas de vida en un espacio relativamente pequeño que corresponde a 8 biomas terrestres, según Hernández-Camacho & Sánchez, (1992) diferenciados de acuerdo con características estructurales y funcionales.

La distribución de la precipitación pluvial es un factor importante en la determinación de variaciones en diferentes zonas de vida; en forma general, se observa un régimen de tipo bimodal, tetraestacional, con dos periodos secos; uno entre enero y abril y otro de julio a agosto y dos periodos de lluvias entre septiembre y diciembre y de mayo a junio (IGAC, 1993). El comportamiento de las temperaturas se considera de mucha regularidad en cada faja climática a lo largo del año, con amplitudes menores a 2.5° centígrados mensuales. En sentido general se ha señalado que la variación de temperatura por efecto de cambio altitudinal es en promedio cercana a 0.6° centígrados por cada 100 metros (Pérez-Preciado, 1984).

La planicie basal y las estribaciones montañosas constituyen la tierra caliente o piso cálido isomegatérmico, donde de acuerdo con regímenes pluviales diferenciales, debidos a factores climáticos locales, se presentan desde áreas subxerofíticas y bosques higrotropofíticos hasta selva húmedas. En la faja central del costado septentrional, a barlovento de los vientos alisios, desde el divorcio de aguas de los ríos Manzanares y Piedras, los niveles de precipitación aumentan ostensiblemente y alcanzan los mayores índices de las áreas planas y bajas de los alrededores de la Sierra y superan los 2500 mm anuales en la zona comprendida entre las cuencas bajas de los ríos Buritaca y Palomino, donde pueden darse, únicamente, 2 meses sin lluvias durante el año; esa cantidad de lluvias condicionadas por factores orográficos, determina la presencia de vegetación higrofítica y subhigrofítica, correspondiente al Zonobioma húmedo Ecuatorial, que en este costado se encuentra desde la orilla del mar ascendiendo por los valles de los ríos, hasta alcanzar los 900 m de altitud.

Las tierras del piso cálido en la vertiente occidental reciben menos precipitaciones que las de la faja lluviosa septentrional, con niveles que en algunos sectores alcanzan los 1200 mm anuales y 5 meses durante el año con escasas o ninguna lluvia; este comportamiento también se aprecia, con algo de mayor intensidad, en el sector suroccidental, en las cuencas bajas de los ríos Ariguani y Cesar, donde se encuentra una cubierta vegetal higrotropofítica, que coincide con el Zonobioma tropical alternohigrico, interpretado como bosques del piso isomegatérmico en áreas con un período sin lluvias (verano) que puede prolongarse hasta por 6 meses, tiempo durante el cual los árboles, en su mayoría, pierden el follaje; los meses restantes del año tienen lluvias intensas (invierno) y entonces, las plantas reponen su follaje adquiriendo un aspecto similar al de una selva lluviosa. En el costado occidental este bioma se presenta hasta los 800 msnm, a partir de donde aparece una selva ecuatorial húmeda, observable hasta los 1100 m aproximadamente, en las cuencas de los ríos Manzanares, Gaira, Toribio, Córdoba, Frío, Sevilla, Aracataca, Fundación y Ariguani; la misma característica es notoria en los ríos Cañas, Tapias y Ranchería en el costado nororiental.

La región sur y suroriental soporta niveles de pluviosidad más bajos, como consecuencia del "efecto de abrigo" (Pérez-Preciado, 1984); sobre las tierras de piso cálido y en las planicies de las cuencas bajas de los ríos Cesar y en el extremo nororiental, en el valle del río Ranchería se alcanzan niveles de precipitación menores a 900 mm anuales y el período sin lluvias es casi de 6

meses durante el año por lo cual la vegetación pasa de una higrotropofitia a subxerofitia y xerofitia características de las planicies y piedemonte sur y surorientales en las cuencas bajas de los ríos Ranchería y Cesar; estos bosques secos pueden ascender por los valles hasta 800 m de altitud.

A factores climáticos locales se atribuye la presencia de un enclave subxerófilo en el área noroccidental (Herrmann, 1970), alrededores de la ciudad de Santa Marta y parte occidental del Parque Nacional Tairona, correspondiente al Zonobioma subxerofítico tropical, donde se mezclan bosques secos con matorrales espinosos del piso isomegatérmico; aquí las precipitaciones no superan los 700 mm anuales y el período sin lluvias es de casi 8 meses al año, en esas condiciones las plantas más comunes presentan adaptaciones xeromórficas. Similar situación se encuentra hacia el extremo nororiental, desde la cuenca del río Palomino hacia la Guajira, sobretudo en las tierras planas o de baja altitud sobre el nivel del mar, las precipitaciones anuales disminuyen a medida que se avanza hacia el este y aumenta el número de meses sin lluvias a lo largo del año, la vegetación desarrollada en este clima isomegatérmico con escasa precipitación anual y hasta 10 meses secos puede ser arborea densa o escasa y abierta con marcado xeromorfismo correspondiente a un Zonobioma desértico Tropical.

Por encima de los 1000 msnm aparecen selvas nubladas correspondientes a los orobiomas selva Subandina y selva Andina. Las primeras entre 1100 y 2400 m son selvas de piso isomesotérmico con nieblas frecuentes que elevan la humedad ambiental; la vegetación arborea higrofítica y subhigrofítica de media montaña, densa y siempreverde es diferenciable florísticamente de la selva húmeda del piso basal o ecuatorial (Cleef et al, 1984); así mismo, existen diferencias florísticas con las selvas higrofíticas y subhigrofíticas de piso isomesotérmico e isomicrotérmico con nieblas frecuentes presentes a partir de los 2400 m o selvas andinas, donde la vegetación de porte arboreo comienza a disminuir su tamaño hasta adoptar un aspecto de matorral leñoso en el límite con el páramo, alrededor de los 3200 msnm.

Las zonas de páramos (Orobioma de páramo) en la Sierra Nevada de Santa Marta pueden considerarse extensas y se encuentran entre los 3200 y 4800 msnm., se caracteriza por la presencia de vegetación arborescente, arbustiva o herbácea desarrollada en tierras de piso oligotérmico, por encima del nivel del bosque y por debajo de las nieves permanentes. Son predominantes las gramíneas y leñosas de porte bajo. Puede considerarse

dividido en tres sectores: subpáramo, con vegetación leñosa y arborescente en el límite del bosque; páramo propiamente dicho y páramo alto o superpáramo con escasa cobertura vegetal sobre afloramientos rocosos subniveles. La transición entre el límite del bosque y el páramo está poblado por un arbustal o bosque andino (Cleef et al, 1984) que es seguido por pajonales; mientras al ascender, en el límite superior y a veces cerca al periglacial se encuentra una cobertura leñosa en áreas rocosas resguardadas de los vientos o en las márgenes de las corrientes que descienden de los lagos glaciares. En el costado norte se reportan mayores índices de precipitación pluvial que el lado sur y es posible observar algunas diferencias fisionómicas y florísticas entre los dos (Cleef & Rangel, 1984).

El orobioma nivel se alcanza a partir de los 4900 msnm., hasta donde hoy pueden alcanzar las lenguas glaciares. Con cubierta nivel permanente, ocasionalmente, es posible que aparezcan algunas criptógamas y hierbas rasantes escasas en algunas grietas abrigadas

Conocimientos florísticos de la Sierra Nevada de Santa Marta

Desde las primeras exploraciones de la Sierra se han ponderado las excelsas características de su flora; sin embargo aún no se tiene un inventario que se aproxime a su completa cuantificación. Distintos investigadores han expresado las limitaciones en lo referente a este conocimiento, calculando que se encuentra entre las regiones del país con menos de 50 recolecciones por km cuadrado y entre las áreas con bosques tropicales amenazados por conversión o destrucción (Forero, 1988). Así mismo, se le ha considerado entre las zonas con bosques tropicales más importantes para futuros planes de recolección por encontrarse entre las regiones de Colombia más pobremente conocidas desde el punto de vista botánico (Prance & Campbell, 1988).

Las primeras exploraciones con el fin de su conocimiento florístico pueden atribuirse a Jules Linden, alrededor de 1840, fecha cuando este investigador arribó a Dibulla procedente de Riohacha y siguiendo la cuenca del río Ancho ascendió hasta la zona de páramos. Sobre el mismo flanco septentrional se destacan por sus importantes aportes al conocimiento florístico las expediciones de William Purdie, quien a mediados de 1844 recorrió la cuenca del río Palomino recolectando en las áreas del páramo alto; Herman Karsten, hacia la misma época, hizo lo propio en la cuenca del río Ancho. Las recolecciones de plantas más ampliamente conocidas de la Si-

erra fueron ejecutadas por Herbert Smith entre 1898 y 1904 en las cuencas de los ríos Gaira, Manzanares y Piedras. En 1927 aparecieron publicaciones con caracterizaciones de la vegetación y rasgos florísticos de la cuenca del río Ancho, desde su desembocadura hasta los páramos, elaboradas por William Seifriz, como resultado de la expedición de este investigador a esta región; también se conocen en 1930 los resultados del estudio de la flora de las cuencas de los ríos Gaira y Manzanares ejecutado por Samuel Record & Henry Kyulen. Otras expediciones que han dado información florística de importancia fueron las ejecutadas por N. Funk & L. S. Schlim en la cuenca del río Frío hacia 1847; Arnold Schultze en 1927 en la región noroccidental de la Sierra; Ramón Espina y Juan Giacometto, quienes en 1930 exploraron y recolectaron en las cuencas de los ríos Manzanares, Gaira y Toribio. La cuenca media y alta de los ríos Donachuí y Mamancanaca, hasta las zonas de nieves permanentes fueron exploradas por José Cuatrecasas y Rafael Romero-Castañeda en 1959 y durante este mismo año otra incursión de importancia fue ejecutada por Harriet Barclay y Pedro Juajibioy en los ríos Sevilla y Frío. Otras exploraciones que han aportado al conocimiento de la flora y vegetación de esta montaña tropical fueron realizadas por Joseph Kikbride y Enrique Forero en 1972 sobre la cuenca del río Frío y la de Antonie Cleef, Roberto Jaramillo y Orlando Rangel en las cuencas de los ríos Buritaca y Frío durante 1977. Existen, además, resultados de recolecciones de líquenes del río Buritaca por R. Norwak y S. Winkler en 1970 y de briofitos y líquenes de Guido van Reenen, Dana Griffin y Orlando Rangel en río Buritaca en 1977.

Trabajos de clasificación de vegetación de la Sierra Nevada de Santa Marta se deben a César Pérez para las cuencas de los ríos Gaira y Manzanares; Mertins en el costado nordeste de la Sierra partiendo de la costa seca y siguiendo el gradiente altitudinal hasta las partes altas; para el área seca del Parque Nacional Tairona, Bastidas y Corredor, caracterizaron tipos de vegetación presentes en los alrededores de las bahías de Neguanje y Gairaca, en tanto, Lozano adelantó un estudio de la vegetación del área nublada del cerro el Cielo. A Cleef, Van der Hammen y Rangel se debe el trabajo más detallado acerca de la vegetación de la selvas del flanco septentrional, en la cuenca del río Buritaca; un estudio referente a tipos de vegetación fue realizado por Cleef y Rangel para los páramos de las cuencas de los ríos Buritaca y Frío. Otras contribuciones acerca de la vegetación de esta región fueron elaborados por Rubiano, Ortiz y Dueñas en la parte baja de la cuenca de los ríos Buritaca y Guachaca y por Sugden & Robbins en el análisis de epífitas de selvas nubladas.

De acuerdo con apreciaciones de especialistas, la diversidad florística de la Sierra es considerada baja, sobre todo en lo que respecta a las selvas húmedas del flanco septentrional (Prance, 1982). Estimaciones elaboradas con base en la información del transecto Buritaca-la Cumbre y otras publicaciones dan un número de 1800 especies de plantas con flores para esta unidad biogeográfica que se agrupan en 636 géneros y 164 familias (Rangel & Garzón, 1995). De acuerdo con estos autores las 5 familias de plantas superiores con mayor número de especies y géneros son: Asteraceae con 70 géneros y 156 especies diferentes; Orchidaceae con 28 géneros y 87 especies; Leguminosae con 30 géneros y 68 especies; Poaceae con 29 géneros y 55 especies y Melastomataceae con 15 géneros y 57 especies. A su vez se establece que los cinco géneros con mayor número de especies presentes son Solanum con 29 especies; Miconia con 27; Peperomia con 22; Pleurothalis con 21 y Piper con 18 especies.

Se ha sostenido que en la Sierra Nevada de Santa Marta la diversidad florística disminuye con la altitud, pero que en el mismo sentido aumentan los endemismos. Análisis recientes que han calculado un número aproximado de especies, géneros y familias presentes en las zonas de vida de media y alta montaña dan las cifras siguientes: En la selva subandina se encuentran 130 familias, 330 géneros y 651 especies de plantas superiores; en la selva Andina, 105 familias, 237 géneros y 479 especies mientras para el páramo se reportan 29 familias, 66 géneros y 109 especies (Rangel & Garzón, 1995).

La existencia de endemismos de fanerógamas como uno de los aspectos particulares de la flora de la Sierra ha sido enunciada y resaltada por distintos botánicos, en especial para las áreas de media y alta montaña (Cuatrecasas, 1961; Wurdack, 1976; King & Robinson, 1978; Mora & Rangel, 1983; Cleef & Rangel, 1984). El carácter insular del macizo se contempla como el factor más relevante que ha propiciado un proceso de diferenciación florística en las tierras altas, por lo cual los páramos que aquí existen se toman como un centro de especiación importante, donde, incluso, han tenido origen géneros de distribución restringida a estos ambientes (Cleef & Rangel, 1984)

Con base en análisis fitogeográficos se señala que la flora de la Sierra Nevada de Santa Marta tuvo su origen en elementos de tierras bajas de clima cálido húmedo, sobre los cuales se ha dado un proceso de diferenciación marcada después de los levantamientos orográficos ocurridos en los periodos Plioceno y Pleistoceno, cuando se calcula que esta montaña alcanzó sus máximas elevacio-

nes (Hernández-Camacho et al, 1992); esta irrupción de tierras altas se considera la causa de la aparición de ambientes nuevos donde surgieron hábitats propicios para ser ocupados por la flora que se venía diversificando en el cinturón de bosques de elevaciones medias formados a partir de los levantamientos previos acaecidos en el medio cenozoico, como parece ser el patrón general de la génesis de la flora alto montaña del norte de Sudamérica (Van der Hammen, 1976), sin embargo, y de acuerdo con los enunciados estudios de fitogeografía, en la Sierra también se nota la influencia de elementos andinos de distribución amplia que se propone deben haber arribado por la vía de la Sierra de Perijá desde la cordillera oriental.

Endemismos de fanerógamas en la Sierra Nevada de Santa Marta

Mediante la revisión descrita y con arreglo a la distribución geográfica de los taxones estudiados, se encontraron 125 especies de fanerógamas endémicas de la Sierra Nevada de Santa Marta. Contenidas en 70 géneros y 30 familias. De acuerdo con el número estimado de especies vegetales para esta región, se tiene un índice de 6.77% de endemismo para plantas fanerógamas. La mayoría de esas especies endémicas crecen en los ambientes de selvas nubladas de montaña y en los páramos, alcanzando en estos últimos los mayores niveles de aparición (Tabla 1). La condición de espacio natural de importancia evolutiva que le otorga a la Sierra la presencia de especies fanerógamas restringidas en su distribución, es especialmente notoria en las cuencas de los ríos Donachuí, Fundación, Mamancanaca, Sevilla, Frío, Manzanares, Gaira, Guachaca, Buritaca, Don Diego, Palomino y Ancho.

Tabla 1. Número y porcentaje de especies endémicas en los biomas terrestres de la Sierra Nevada de Santa Marta

BIOMAS	NRO. SP.	%
Páramo	61	49
Selva Andina	29	23
Selva Subandina	32	25.5
Selva Ecuatorial	3	2.4

Las cinco familias con mayor número de especies endémicas se destacan en la Tabla 2; entre ellas, las Asteraceae (Compositae), con 42, que se incluyen en 20

géneros diferentes. La segunda familia con mayor número de especies exclusivas es Melastomataceae con 16, incluidas en 7 géneros. Las familias Apiaceae y Brassicaceae tienen las especies endémicas restringidas a las altas montañas; la primera con 7 especies de 5 géneros diferentes, sólo *Hydrocotyle grossulariaefolia* Rusby se reporta de la selva subandina, mientras las demás, incluidas en los géneros *Cotopaxia*, *Micropleura*, *Niphogetum* y *Perissocoelum* son características de los páramos; en el caso de la segunda familia, cuatro especies del género *Draba* se encuentran sólo en los páramos.

Tabla 2. Familias de angiospermas con mayor número de especies endémicas en la Sierra Nevada de Santa Marta

FAMILIAS	GENEROS	ESPECIES	%
Asteraceae	20	42	34
Melastomatac.	7	16	13
Bromeliaceae	5	13	10
Apiaceae	5	7	5.6
Lamiaceae	3	5	4

No se conocen familias de fanerógamas con distribución geográfica restringida únicamente a esta región. En la Tabla 3 se incluye la distribución que tienen en los diferentes biomas las especies endémicas de las cinco familias de fanerógamas con mayor número de estas entidades. En la familia Asteraceae, 32 se encuentran en los páramos, 6 en la Selva Andina, 3 en la Subandina y 1 en la Ecuatorial. La familia Melastomataceae tiene la mayor cantidad de sus especies endémicas (9) en la selva subandina, 4 en la Selva Andina y 3 en los páramos. De la Selva Ecuatorial solo se conocen como endémicas, *Liabum falcatum* Rusby (Asteraceae), *Bromelia fragilis* L.B. Smith (Bromeliaceae) y *Manettia sanctae-martae* Wernh. (Rubiaceae) cuyas recolecciones típicas proceden de los alrededores de Minca (Magdalena), Pueblo bello (Cesar) y la cuenca del río Piedras (Magdalena), respectivamente.

Tabla 3. Familias de angiospermas con mayor número de especies endémicas en diferentes biomas de la Sierra Nevada de Santa Marta

	Aster.	Melast.	Brom.	Apiac.	Lam.
Páramo	32	3	2	6	2
S. Andina	6	4	8		2
S. Suband	3	9	2	1	1
S. Ecuator	1		1		

Al nivel genérico, en la actualidad, se pueden reconocer sólo 3 géneros restringidos a la Sierra Nevada: *Kirkbridea* (Melastomataceae), *Castenedia* y *Raouliopsis* (Asteraceae). De los géneros con mayoría de especies endémicas que se enumeran en la Tabla 4, *Diplostephium* crece sólo en ambientes altoandinos; 9 de estas especies se encuentran en los páramos y una se reporta de la Selva Andina. De las 11 especies de *Pentacalia*, 8 se encuentran en los páramos, 2 en la Selva Subandina y una en la Selva Andina. Para las cinco especies de *Tillandsia* se tienen evidencias de que 3 crecen en la Selva Andina y 2 en la Subandina. La mayoría de especies endémicas de la familia Melastomataceae se concentran en el Subandino, en el caso del género *Monochaetum*, 4 se dan en este bioma y una en el Andino; pero en el caso de *Miconia* 2 se dan en el páramo. De las 4 especies del género *Puya*, dos son de ambientes paramunos y otras dos crecen en la Selva Andina.

Tabla 4. Géneros de angiospermas con mayor número de especies endémicas en la Sierra Nevada de Santa Marta

GENEROS	NRO. ESPECIES
<i>Pentacalia</i>	11
<i>Diplostephium</i>	10
<i>Tillandsia</i>	5
<i>Monochaetum</i>	5
<i>Miconia</i>	4
<i>Puya</i>	4

Lista de especies fanerógamas endémicas de la Sierra Nevada de Santa Marta

ACANTHACEAE

- Dicliptera sanctae-martae* Leonard, Contr. U.S. Natl. Herb. 31: 378, fig. 140. 1958.
Habracanthus kirkbridei (Wasshausen) J.R.I. Wood, Kew Bull. 43 (1): 26. 1988.
 = *Kalbreyeracanthus kirkbridei* Wasshausen
Habracanthus magdalenensis (Wasshausen) J.R.I. Wood, Kew Bull. 43 (1): 28. 1988.
 = *Hansteinia magdalenensis* Wasshausen
Habracanthus malacus Wasshausen, Brittonia 36 (1): 68, fig. 1. 1984.
Justicia kirkbridei Wasshausen, Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex. 65: 255. 1989.

ACTINIDIACEAE

Saurauia arnoldi Sleumer, Notizbl. 12: 143. 1934.

APIACEAE (UMBELLIFERAE)

Cotopaxia whitei Constance & Alverson, Caldasia 14 (66): 22, fig. 2. 1984.

Hydrocotyle grossulariaefolia Rusby, Descr. S. Am. Pl. 73. 1920.

Micropleura flabellifolia Mathias, Brittonia 2: 241. 1936.

Niphogetum colombiana Mathias & Constance, Brittonia 14: 148, fig. 1. 1962.

Perissocoelum barclayiae Math. & Constance, Brittonia 19: 223. 1967

Perissocoelum crinoideum (Math. & Const.) Math. & Const., Brittonia 19: 223. 1967.

= *Prionosciadium crinoideum* Math. & Const.

Perissocoelum purdiei Math. & Constance, Bull. Torrey Bot. Club 79: 360, fig. 1. 1952.

ARALIACEAE

Dendropanax amplifolium I. M. Johnston, Contr. Gray Herb. 70: 81. 1924.

Oreopanax fontquerianum Cuatr., Collectanea Bot. 7 (10): 221. 1968.

ASTERACEAE (COMPOSITAE)

Ageratina barclayae King & Robinson, Phytologia 54: 38. 1983.

Bartlettina cleefii King & Robinson, Phytologia 47 (2): 125-123. 1980.

Cabriella sanctae-martae (Greenman) Cuatr., Bol. Soc. Argent. Bot. 19 (1-2): 15. 1980.

= *Senecio sanctae-martae* Greenman

Castenedia santamartensis King & Robinson, Phytologia 39: 59. 1978.

Chaptalia anisobasis Blake, J. Wash. Acad. Sci. 25: 324. 1935.

Chaptalia incana Cuatr., Proc. Biol. Soc. Wash. 74: 24, fig. 3. 1961.

Chionolaena columbiana Blake, J. Wash. Acad. Sci. 25: 312. 1935.

Diplostephium anactinotum Weddell, Chl. And. 1: 201, pl. 35-B. 1857.

Diplostephium coriaceum Cuatr., Webbia 24 (1): 123. 1969.

Diplostephium cyparissias Weddell, Chl. And. 1: 103. 1857.

Diplostephium inesianum Cuatr., Webbia 24 (1): 192. 1969.

Diplostephium rangelii Cuatr., Phytologia 49 (1): 74. 1981.

Diplostephium romeroi Cuatr., Webbia 24 (1): 173. 1969.

Diplostephium santamartae Cuatr., Phytologia 52 (3): 174. 1982.

Diplostephium sextatile Cuatr., Webbia 24 (1): 173. 1969.

Diplostephium tergoacanum Cuatr., Webbia 24 (1): 175. 1969.

Diplostephium weddelli Blake, Contr. U. S. Natl. Herb. 24: 79. 1922

Erigeron raphaelis Cuatr., Webbia 24 (1): 62. 1969.

Flosmutisia paramicola Cuatr., Anales Jard. Bot. Madrid 42 (2): 417, fig. 1. 1986.

Hinterhubera harrietae Cuatr., Webbia 24 (1) 20. 1969.

Hinterhubera nevadensis Cuatr., Proc. Biol. Soc. Wash. 74: 7, fig. 1. 1961.

Jaramilloa sanctae-martae King & Robinson, Phytologia 47 (2): 119. 1980.

Jungia calyculata Cuatr., Fedde Repert. Sp. Nov. 1v. 125. 1953.

Jungia karstenii Cuatr., Brittonia 8: 186. 1956.

Lasiocephalus dorophyllus (Cuatr.) Cuatr., Phytologia 40: 310. 1978.

= *Senecio dorophyllus* Cuatrecasas

Liabum falcatum Rusby, South American Plants 161. 1920

Montanoa josei V. A. Funk, Mem. N. Y. Bot. Gard. 36: 79, fig. 52. 1982.

Paragynoxys undatifolia Cuatr., Proc. Biol. Soc. Wash. 74: 15. 1961.

Pentacalia carrikeri (Cuatr.) Cuatr., Phytologia 49 (3): 259. 1981.

= *Senecio carrikeri* Cuatr.

Pentacalia genuflexa (Greenman) Cuatr., Phytologia 49 (3): 246. 1981.

= *Senecio genuflexus* Greenman

Pentacalia hammenii Díaz & Cuatr., Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex. 19 (73): 257. 1994.

Pentacalia harrietae (Cuatr.) Cuatr., Phytologia 49 (3): 255. 1981.

= *Senecio harrietae* Cuatr.

Pentacalia juajibioi Diaz & Cuatr., Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex. 17 (67): 688. 1990.

Pentacalia mamancanacana (Cuatr.) Cuatr., Phytologia 49 (3): 256. 1981.

= *Senecio mamancanacanus* Cuatrecasas

Pentacalia romeroana Díaz & Bueno, Rev. Acad. Colomb. Cienc. 21(80):202.1997

Pentacalia schultzei Cuatr., Phytologia 57 (3): 169. 1985.

Pentacalia scortifolia (Greenman) Cuatr., Phytologia 49 (3): 250. 1981.

= *Senecio scortifolius* Greenman

Pentacalia subarachnoidea (Wedd.) Cuatr., Phytologia 49 (3) 253. 1981.

= *Senecio subarachnoideus* Wedd.

Pentacalia subarachnoidea var. *pauciflora* Díaz & Bueno, Rev. Acad. Colomb. Cienc. 21 (80):204. 1997

Pentacalia taironae Díaz & Cuatr., Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex. 17 (67): 687. 1990.

Pseudoligandra chrysocoma (Wedd.) Dillon & Sagastegui, Taxon 39 (1). 127. 1990.

Raouliopsis seifrizii Blake, J. Wash. Acad. Sci. 28: 175, fig. 1a-j, fig. 2a. 1938.

Senecio romeroi Cuatr., Proc. Biol. Soc. Wash. 74: 21. 1961.

BERBERIDACEAE

Berberis acutinervia Camargo, Caldasia 9: 315. 1966.

Berberis melloacensis Camargo, Caldasia 9: 335. 1966.

Berberis nevadensis Camargo, Caldasia 9: 341. 1966.

BRASSICACEAE (CRUCIFERAE)

Draba cheiranthoides Willd. ex O.E. Schultz., Pflanzenreich Heft 89, 4. Fam. 105: 156. 1927.

Draba cryophila Cuatr., Ciencia (Mejico) 27 (6): 172, fig. 2. 1972.

Draba pseudocheiranthoides Al-Shebbaz, J. Arnold Arb. 70 (3): 431, fig. 4. 1989.

Draba sanctae-marthae Schultz., Notizblatt 10: 560. 1929.

BROMELIACEAE

Bromelia fragilis L. B. Smith, Contr. U. S. Natl. Herb. 29: 285, fig. 10. 1949.

Greigia sanctae-martae L.B. Smith, Contr. U. S. Natl. Herb. 29: 289, fig. 15. 1949.

Puya alpicola L.B. Smith, Phytologia 7: 419, pl.1, figs. 8-10. 1961.

Puya brachystachya (Baker) Mez, in DC., Monogr. Phan. 9: 496. 1896.

= *Pitcairnia brachystachya* Baker

Puya nivalis Baker, Handb. Bromel. 124. 1889.

Puya sanctae-martae L.B. Smith, Phytologia 4: 382, pl. 2, figs. 5-7. 1953.

Tillandsia acuminata L. B. Smith, Contr. U. S. Natl. Herb. 29: 434, figs. 41a-c. 1951.

Tillandsia brevior L. B. Smith, Contr. U. S. Natl. Herb. 29: 436, figs. 42a-c. 1951.

Tillandsia caloura Harms, Notizbl. Bot. Gart. Berlin 10: 580. 1929.

Tillandsia sanctae-martae L.B. Smith, Phytologia 5: 396, pl.1, figs. 3,4. 1951.

Tillandsia ultima L. B. Smith, Contr. U. S. Natl. Herb. 29: 442, figs. 45c-e. 1951.

Vriesea hospitalis (L. B. Smith) L. B. Smith, Phytologia 5: 397, figs. 351 M-O. 1956.

= *Tillandsia hospitalis* L. B. Smith

Vriesea magdalenae L. B. Smith, Phytologia 8: 500, pl. 2, figs. 6-8. 1963.

CHRYSOBALANACEAE

Licania cuspidata (Rusby) Prance, Flora Neotropica): 72. 1972.

= *Moquilea cuspidata* Rusby

CLUSIACEAE (GUTTIFERAE)

Hypericum martense Robson, Bull. Br. Mus. Nat. Hist. (Bot.) 16 (1): 51. 1987.

Hypericum simonsii Robson, Bull. Br. Mus. Nat. Hist. (Bot.) 16 (1): 34. 1987.

CYPERACEAE

Carex sanctae-marthae Mora & Rangel, Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex. 15 (58): 13. 1983.

GUNNERACEAE (HALORAGACEAE)

Gunnera sanctae-marthae Mora, Flora de Colombia 3, Haloragaceae 140, fig. 54. 1984.

Gunnera tayrona Mora, Caldasia 12 (57): 178. 1978.

LAMIACEAE (LABIATAE)

Salvia costata Epling, Fedde Rep. Sp. Nov. Beih. 85: 102. 1936.

Salvia libanensis Rusby, 300 Descr. New Sp. S. A. Mer. Pl. III. 1920.

Satureja andrei Epling, Ann. Missouri Bot. Gard. 14: 67. 1927.

Satureja caerulea (Benth.) Epling, Fedde Rep. Sp. Nov. Beih. 85: 156. 1936.

= *Calaminta caerulea* Benth.

Stachys hebens Epling, Fedde Rep. Sp. Nov. Beih. 80: 35. 1934.

LEGUMINOSAE

Erythrina santamartensis Krukoff & Barneby, Phytologia 33: 350, fig.1. 1976.

MELASTOMATACEAE

Blakea schultzei Markgraf, Notizblatt 10: 770. 1929.

Chaetolepis loricarella Triana, The Transaction Linn. Soc. London 28 (1): 51. 1871.

Chaetolepis santamartensis Wurdack, Phytologia 8: 165. 1962.

Graffenrieda santamartensis Wurdack, Brittonia 28: 138. 1976.

- Huilaea kirkbridei* Wurdack, Brittonia 28. 141. 1976.
Kirkbridea pentamera Wurdack, Brittonia 28. 143. 1976
Kirkbridea tetramera Wurdack, Brittonia 28: 141, fig.1. 1976
Miconia insueta Wurdack, Brittonia 28: 139. 1976.
Miconia oreogena Wurdack, Brittonia 28. 139. 1976
Miconia smithii Gleason, Bull. Torrey Bot. Club 52: 383. 1925.
Miconia tricaudata Wurdack, Brittonia 28: 140. 1976.
Monochaetum cinereum Gleason, Am. J. Bot. 16. 515. 1929.
Monochaetum laxifolium Gleason, Am. J. Bot. 16: 521. 1929.
Monochaetum magdalenense Wurdack, Phytologia 21. 117. 1971.
Monochaetum rotundifolium Gleason, Bull. Torrey Bot. Club 52: 333, fig. 3D. 1925.
Monochaetum uberrimum Sandwith, Kew Bull. 1941. 222. 1942.

MYRSINACEAE

- Cybianthus colombianus* Pipoly, Brittonia 33 (4): 493, fig.1. 1981.

ONAGRACEAE

- Fuchsia magdalenae* Munz, Proc. Calif. Acad. Sci. 4 (25). 25, pl.2, fig. 5. 1943.

PASSIFLORACEAE

- Passiflora sierrae* Escobar, Ann. Missouri Bot. Gard. 76: 884. 1987.

PIPERACEAE

- Peperomia herbert-smithii* Trel. & Yunck., Piperaceae North. S. Am. 2: 631, fig. 552. 1950.
Piper scutilimum C.DC., Ann. Conserv. Jard. Bot. Geneve 21: 242. 1920.

RANUNCULACEAE

- Ranunculus sandwithii* Lourteig, Bol. Soc. Argent. bot. 11: 129, fig.1. 1967.

ROSACEAE

- Lachemilla ericoides* (Perry) Rothm., Fedde rep. Sp. Nov. 42: 169. 1937.
 = *Alchemilla ericoides* Perry

RUBIACEAE

- Manettia sanctae-martae* Wernh., J. Bot. 57 suppl. 41. 1941.

SABIACEAE

- Meliosma martana* Idrobo & Cuatr., Ernstia 49: 11-12. 1988.

SAPOTACEAE

- Pouteria arguacoensium* (Karst.) Baehni, Candollea 9. 389. 1942.
 = *Lucuma arguacoensium* Karst.
Pouteria espiniae (Standley) Baehni, Candollea 9: 423. 1942
 = *Lucuma espiniae* Standley

SCROPHULARIACEAE

- Aragoa Kogiorum* Romero, Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex. 8 (31). 384. 1951.

SOLANACEAE

- Trianea neovisae* Romero, Mutisia 38: 11, pl.6,7. 1973.

SYMPLOCACEAE

- Symplocos nivalis* Linden, Pflanzenreich 4, fam. 242: 81. 1901.

THYMELAEACEAE

- Daphnopsis crispotomentosa* Cuatr., Brittonia 14: 51. 1962.
Schoenobiblus coriaceus Domke, Notizblatl. Bd. 11: 356. 1932.

TROPAEOLACEAE

- Tropaeolum pellucidum* Sparre, Opera Bot. 108. 76. 1991.

VALERIANACEAE

- Valeriana cuatrecasasii* Meyer, Brittonia 17: 113. 1965.

Consideraciones sobre endemismos y conservación de la biodiversidad en la Sierra Nevada de Santa Marta

La existencia de entidades de distribución restringida a regiones naturales específicas adquiere cada vez mayor importancia como elemento determinante en la valoración de áreas de necesaria destinación a la conservación de biodiversidad. La presencia de endemismos se constituye en un factor de primer orden para establecer la importancia biológica de áreas silvestres en virtud de que su magnitud es un cuantificador de la singularidad y distinción en comparación con otras áreas localizadas en las mismas o en diferentes latitudes.

La importancia de la flora de la Sierra Nevada de Santa Marta ha sido relacionada por botánicos, naturalistas y conservacionistas como muy singular, con un alto contenido de entidades exclusivas, pero a causa de la inexistencia de un inventario completo o depurado sólo se conocían apreciaciones muy respetables acerca de la existencia de una buena cantidad de estas; a pesar de ello, las particularidades de esta unidad biogeográfica, que permitieron considerarla una isla montañosa continental (Adams, 1973), han sido indicadores válidos para las predicciones de los investigadores y justificación suficiente de las determinaciones que han elevado este territorio a la categoría de Reserva de Biosfera.

Dentro de los aspectos contemplados en el origen de los endemismos, el aislamiento ecológico efectivo y una alta intensidad de evolución en estirpes de tierras elevadas de esta montaña parecen los dos más decisivos para la aparición de entidades de distribución restringida. Lo primero, ha sido el resultado de la elevación de la Sierra en medio de la planicie caribe, que mantiene a los páramos de esta región separados de áreas similares de los Andes y otras cordilleras próximas. El origen del género *Cabriella* en ella y posterior radiación hacia la próxima Sierra de Perijá (Cuatrecasas, 1986) o la diversificación de especies en los géneros *Diplostegium*, con algunas series exclusivas (Cleef & Rangel, 1984) y *Pentacalia* con la casi totalidad de especies locales endémicas, son elementos indicadores de la intensidad de procesos evolutivos frecuentes en zonas paramunas o subparamunas.

Al observar la distribución por pisos altitudinales es notoria la abundancia de taxones endémicos en los páramos y en menor cantidad en las selvas Andina y Subandina; resulta interesante que la distribución geográfica de los taxones endémicos no coincide con los patrones de diversidad florística. Por otro lado, pueden notarse similitudes en patrones de distribución de especies endémicas de algunas familias pantropicales para ambientes de alta montaña; en la familia Melastomataceae, por ejemplo, una mayor cantidad de endemismos específicos se localizan en ambientes de media montaña y muy pocos en los páramos, comportamiento parecido a lo observado en ambientes tropalpinos de África y Nueva Guinea (Cleef, 1983).

El endemismo de la flora fanerogámica se presenta mayormente a nivel de especie, siendo escaso a nivel genérico; en la actualidad se conocen sólo tres géneros endémicos y no hay familias de magnoliófitas exclusivas. Esta característica, encontraría explicación en las

condiciones de juventud geológica de los páramos de este macizo, lo cual ha sido señalado por estudios de otras disciplinas (Raasveldt, 1957).

En sentido general, es interesante conocer la distribución de los organismos restringidos para fines de determinación de estrategias de conservación. Aunque dentro de los límites de áreas protegidas legalmente que existen en la Sierra Nevada de Santa Marta se encuentran cobijadas la mayor parte del área de distribución de los endemismos de plantas con flores, existen algunas que no lo están y de acuerdo con evidencias florísticas y faunísticas tienen alto valor para conservación por la presencia de poblaciones de taxones exclusivos. En estos casos es válido sugerir la posibilidad de extender a esas áreas la influencia legal de las normas de protección de espacios silvestres con especial contenido biológico, con el fin de justificar la adopción de medidas y mecanismos de protección y manejo. La referencia directa debe hacerse al llamado macizo de San Lorenzo, en cuyas áreas de selvas nubladas en condiciones de conservación, se encuentran aún, buen número de especies vegetales y animales de distribución restringida.

Agradecimientos

Es necesario expresar agradecimientos sinceros a Juan Mayr y a María José Durán de la Fundación Pro Sierra Nevada de Santa Marta por toda la colaboración brindada. A Jerry Touval y Nancy Benton de The Nature Conservancy (TNC) por su apoyo para obtención referencias bibliográficas en Smithsonian Institution. A José Luis Frenández Alonso del Instituto de Ciencias Naturales por sus importantes anotaciones. Especial mención merecen Armando Calvano, Pedro Torrijos, Daniel Rodríguez, José Pereira, Alberto Rodríguez y José Orozco por la ayuda ofrecida.

Bibliografía

- Adams, M. 1973. Ecological zonation and the butterflies of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *J. Nat. Hist.* 7: 699-718.
- Cleef, A.M. 1983. Fitogeografía y composición de la flora vascular de los páramos de la Cordillera Oriental Colombiana (Estudio comparativo con otras altas montañas del trópico). *Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex.* 15 (58): 23-29.
- _____, Rangel, O., Van Der Hammen, T. & Jaramillo, R. 1984. La vegetación de las selvas del transecto Buritaca. En: Van der Hammen & Ruiz (eds.) *La Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) Transecto Buritaca-La Cumbre. Estudios de Ecosistemas Tropandinos.* 2. J. Cramer. Berlin.
- _____, & Rangel, O. 1984. La vegetación del páramo del noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta. En: Van der Hammen & Ruiz

- (eds.) La Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) Transecto Buritaca-La Cumbre. Estudios de Ecosistemas Tropicandinos. 2. J. Cramer. Berlin.
- Cuatrecasas, J.** 1986. Dos nuevos géneros de Compositae de Colombia. *Caldasia*. 15 (71-75) 1-14.
- _____ 1961. Studies on Andean Compositae. V. *Proc. Biol. Soc. Wash.* 74 : 7-28.
- Forero, E.** 1988. Botanical Exploration and Phytogeography of Colombia: Past, Present and future. *Taxon* 37 (3): 561-566.
- Herrmann, R.** 1970. Las causas de la sequía climática en la región costanera de Santa Marta, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex.* 13 (52): 479-485.
- Hernández-Camacho, J.; Hurtado, A.; Ortiz, R. & Walschburger, T.** 1992. Centros de endemismo en Colombia. En: Halftler (comp.) La diversidad Biológica de Iberoamérica I. *Acta Zoológica Mexicana*: 175-190.
- _____ & **Sánchez, H.** 1992. Biomas terrestres de Colombia. En: Halftler (comp.) La diversidad biológica de Iberoamérica I. *Acta Zoológica Mexicana*: 153-173.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC.** 1993. Proyecto piloto de ordenamiento territorial de la Sierra Nevada de Santa Marta, una aproximación metodológica. Estudios básicos. 1. Medio Físico y Biótico. Santafé de Bogotá.
- King, R.M. & Robinson, H.** 1978. Studies in the Eupatorieae (Asteraceae). CLXXII. A new genus, *Castenedia*. *Phytologia* 39 (1): 58-61.
- Mora, L. E. & Rangel-CH., O.** 1983. Una nueva Cyperaceae de la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) y consideraciones fitogeográficas y sinecológicas sobre *Carex*. *Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex.* 15 (58): 13-21.
- Pérez-Preciado, A.** 1984. Aspectos climáticos de la Sierra Nevada de Santa Marta. En: Van der Hammen & Ruiz (eds.). La Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) Transecto Buritaca-La Cumbre. Estudios de Ecosistemas Tropicandinos 2. J. Cramer. Berlin.
- Prance, G.** 1982. Forest refuges: Evidence from woody angiosperms. Pg. 137-156. In: G.T. Prance (ed.) *Biological diversification in the Tropics*. Columbia University Press, New York.
- Prance, G.T. & Campbell, D.G.** 1988 The present state of tropical floristics. *Taxon* 37 (3): 519-548.
- Raasveldt, H. C.** 1957. Las glaciaciones en la Sierra Nevada de Santa Marta. *Rev. Acad. Colomb. Ci. Ex.* 9 (38) : 469-482.
- Rangel-CH., J. O. & Garzón -C., A.** 1995. Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. En: Rangel, O. (ed.) *Colombia Diversidad Biótica I*. Instituto de Ciencias Naturales: 155-170. Santafé de Bogotá.
- Van Der Hammen, T.** 1976. The Pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America. *Journ. Biogeography*. 1: 3-26.
- Wurdack, J.J.** 1976. Endemic Melastomataceae of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Brittonia* 28: 138-143.

Nota

Por un error involuntario se omitió en el trabajo El género *Huilea* Wurdack (Melastomataceae) publicado en la *Rev. Acad. Colomb. Ci. Exact.* 22 (77): 237-242. 1996, la cita de la publicación original de la subespecie *minor*. Con miras a su validez debe quedar en la siguiente forma: en la página 240 del citado artículo:

***Huilea minor* (L. Uribe) Lozano & Ruíz, stat.nov.**

H. macrocarpa subsp. *minor* L Uribe, *Caldasia* 12(56):17.1977

EVIDENCIAS DE LA ASOCIACION ENTRE BROTES EPIDEMICOS DE MALARIA EN COLOMBIA Y EL FENOMENO EL NIÑO-OSCILACION DEL SUR

por

Germán Poveda J.*, William Rojas M.**

Resumen

Poveda, G. & W. Rojas: Evidencias de la asociación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(81): 421-429, 1997. ISSN: 0370-3908.

Se presenta un análisis de los casos de malaria registrados en Colombia entre 1959-1994. Se concluye que: (1) durante los años en que se presenta la ocurrencia del fenómeno de El Niño se incrementan los casos de malaria en Colombia, con coeficiente de correlación de 0.6 entre las series de malaria y las temperaturas superficiales del Océano Pacífico en la región Niño-4 (5°N-5°S, 160°E-150°O); y (2) se observa una dramática tendencia creciente de los casos registrados en el período. Estas correlaciones estadísticamente significativas pueden ser usadas para desarrollar Sistemas de Alerta Temprana (SAT) de las condiciones climáticas conducentes a epidemias y brotes de enfermedades y demuestran que las buenas posibilidades de predicción del fenómeno ENSO, con las que ya cuenta la comunidad científica internacional, y las predicciones del clima y la hidrología de Colombia, permitirán establecer programas de prevención, mitigación y control de los casos de malaria, dengue clásico y hemorrágico, cólera, leishmaniasis, fiebre amarilla, y otros tipos de enfermedades relacionadas con la variabilidad climática.

Abstract

The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomenon is the main forcing mechanism of climatic variability in tropical South America from seasons to decades. Colombia experience below normal dry periods and above normal air temperatures during the warm phase of ENSO (El Niño), and the converse for the cold phase (La Niña). We analyze records of the Annual Parasitary Incidence (A.P. I.) index of malaria in Colombia (*Plasmodium Vivax* and *Plasmodium Falciparum*) for the 1959-1994 period. We conclude that: (1) during the occurrence of the El Niño event there is a remarkable increase in the number of cases of malaria in Colombia, with a correlation coefficient of 0.62 (statistically significant at the 95% level) between the malaria series and the sea surface temperature series at the Niño-4 region (5°N-5°S, 160°E-150°O); and (2) there is an increasing trend in the number of cases for the aforementioned period. These

* Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

** Corporación para Investigaciones Biológicas, CIB, Medellín, Colombia.

statistically related correlations and modelling results may be used for developing Health Early Warning Systems (HEWS) of climate conditions conducive to outbreaks, facilitating early, environmentally-sound public health interventions to control and mitigate the incidence of diseases related with climate variability.

1. Introducción

La (re)emergencia, y los brotes epidémicos de diversas enfermedades depende de múltiples factores ambientales, demográficos, socio-económicos, migracionales, presupuestales, etc. Por mucho tiempo se ha reconocido la fuerte asociación existente entre diversas enfermedades y la variabilidad climática, principalmente a través de su influencia sobre los ecosistemas terrestres. El principal mecanismo de modulación de la variabilidad climática a diversas escalas de tiempo que van desde la escala mensual hasta la intradecadal, es el llamado fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), un evento natural que se da como resultado de la interacción entre el océano y la atmósfera en la región del Océano Pacífico ecuatorial. El fenómeno ENSO produce fuertes perturbaciones sobre la circulación atmosférica global, y sus efectos climáticos tienen dramáticas implicaciones socioeconómicas y ambientales. Es así que durante El Niño se producen sequías en África, en la parte tropical de América del Sur, en Australia, inundaciones en el oeste de Norte América, en China, Ecuador y la cuenca del río Paraná y el sur de Sur América, entre otros.

Debido a que el clima afecta las temperaturas, la humedad del aire y del suelo, y los regímenes de lluvias, la salud humana es afectada a través de tres mecanismos ligados entre sí (*Epstein y Stewart, 1995*): (1) distribución y calidad de las aguas superficiales, (2) ciclos de vida de los vectores de enfermedades y relaciones huésped/vector, y (3) dinámica de los ecosistemas de las relaciones predador/presa las cuales controlan las poblaciones de vectores de enfermedades (ver *Unninayar y Sprigg, 1995*).

Este trabajo se distribuye de la siguiente manera. En la sección 2 se hace una revisión breve del fenómeno ENSO y de su influencia sobre la hidroclimatología de Colombia. En la sección 3 se discuten los factores climáticos asociados a las epidemias de malaria. En la sección 4 se presentan las evidencias estadísticas de la relación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia, y el fenómeno ENSO, para el período 1959-1994. En el numeral 5 se discute sobre la predecibilidad del fenómeno ENSO y de la hidro-climatología de Colombia, y de como estos proporcionan un sistema de alerta temprana de la intensificación de la malaria en Colom-

bia, con consecuencias enormes para establecer campañas de prevención y control.

2. Características del ENSO y su influencia sobre Colombia

El ENSO es el conjunto más poderoso de variaciones atmosféricas y oceánicas en escalas de tiempo de meses a varios años; escalas de tiempo con los impactos más fuertes sobre las decisiones humanas y sobre las condiciones socio-económicas de los habitantes del planeta. El ENSO causa enormes perturbaciones en la circulación atmosférica y oceánica del planeta, afectando el "tiempo" (corto plazo: días) y el clima (mediano y largo plazo: meses a años). Los eventos extremos asociados que incluyen inundaciones y sequías tienen repercusiones socioeconómicas tales como: alteración de ecosistemas, inundaciones y avalanchas, pérdidas por productividad agrícola y pesquera y por déficits en la generación de energía eléctrica, daños a la infraestructura, racionamiento de alimentos, perturbaciones ecológicas y epidemias de enfermedades, entre otros.

La influencia del ENSO sobre la hidrología global se manifiesta en escalas de tiempo que van desde varios meses hasta décadas (ver *Glantz et al., 1991; Diaz y Markgraf, 1993*). El fenómeno ENSO tiene una componente oceánica, El Niño (fase de temperaturas cálidas) y La Niña (temperaturas frías). Y la componente atmosférica es la Oscilación del Sur, una variación coherente de la masa y las presiones atmosféricas entre el oeste y el este del Pacífico ecuatorial. Generalmente, un centro de alta presión se localiza cerca de Tahiti (18 S, 150 O) mientras que un centro de baja presión se localiza en Indonesia y el norte de Australia cerca de Darwin (12 S, 131 E). Este gradiente de presiones atmosféricas es comúnmente representado por el Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus iniciales en idioma inglés), definido como la diferencia entre las presiones atmosféricas estandarizadas de ambos sitios.

Algunas regiones experimentan efectos directos, mientras que otras son afectadas a través de teleconexiones atmosféricas. El ENSO es un fenómeno cuasi-periódico con una recurrencia promedia de cuatro años, pero que varía entre dos y siete años (*Trenberth, 1991*). Para discriminar los años de El Niño y La Niña se usa (general-

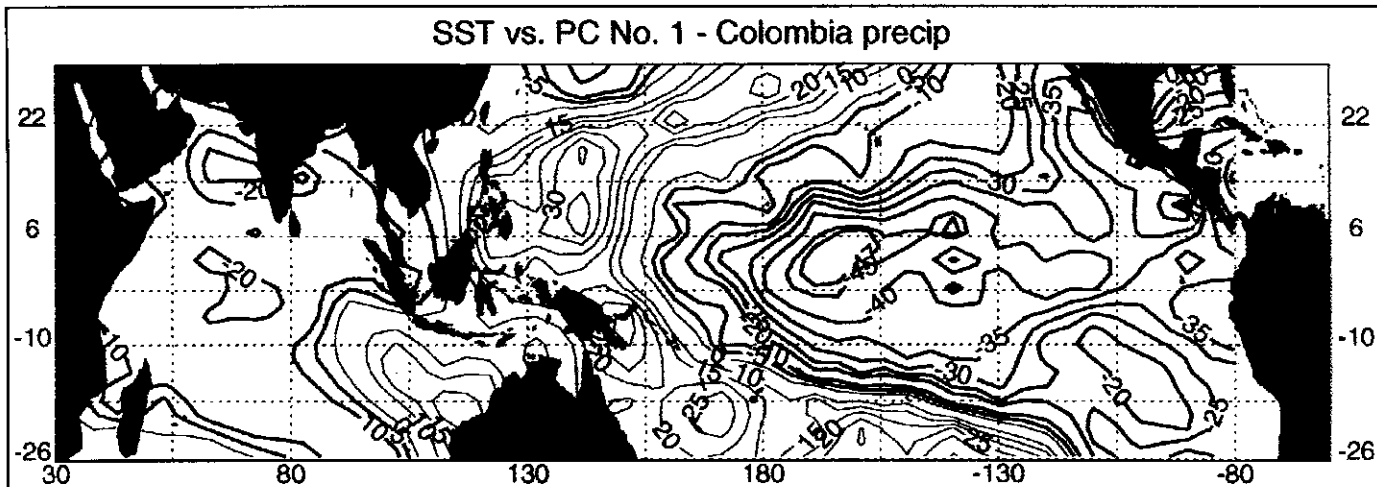
mente) la clasificación dada por *Kiladis y Díaz* (1989), para el siglo XX. Años de El Niño: 1902, 1904, 1911, 1913, 1918, 1923, 1925, 1930, 1932, 1939, 1951, 1953, 1957-1958, 1963, 1969, 1972, 1976-1977, 1982-1983, 1986-1987 y 1991-1992, 1997-1998. Años de La Niña: 1903, 1906, 1908, 1916, 1920, 1924, 1928, 1931, 1938, 1942, 1949, 1954, 1964, 1970-1971, 1973, 1975, 1988 y 1995-1996.

En general, existe buena coherencia entre las anomalías hidrológicas en la parte tropical de América del Sur (Colombia, Venezuela, Guyana y la cuenca del Amazonas) y las dos fases del ENSO. Con ciertas diferencias en el tiempo y en la amplitud, estas regiones exhiben anomalías negativas en lluvias y caudales durante El Niño, y lo contrario durante La Niña. Durante El Niño se da un desplazamiento del centro de convección hacia el suroeste de su posición normal, dentro de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT), sobre el trópico Americano (*Pulwarty y Diaz, 1993*). *Pulwarty* (1994) reporta que sobre la zona norte de Sudamérica durante los eventos cálidos del ENSO el contraste térmico entre el mar y la tierra aumenta gradualmente de 0.5 °C en abril del año (0) hasta un máximo de 1.25 °C durante diciembre y luego decrece rápidamente hasta cero durante febrero del año (+1). Durante los eventos fríos tal contraste se mantiene (-0.75 °C) durante la mayor parte del año y se normaliza de nuevo durante la época de febrero. Adicionalmente, es necesario mencionar, como factor importante en las anomalías hidrológicas sobre el continente, la misma retroalimentación positiva que los extremos hidrológicos tienen sobre sí mismos. Condicio-

nes de sequía impuestas por un forzamiento de gran escala producen disminución de lluvia y por tanto disminución de la humedad del suelo, disminución de la evapotranspiración, una diferente distribución de los calores sensible y latente, y por tanto menor disponibilidad de humedad para la convección atmosférica que produzca la precipitación. El cuadro opuesto es válido para las condiciones de alta precipitación. La fuerte asociación entre los períodos secos en Colombia con El Niño, así como de los períodos de lluvias excesivas con La Niña ha sido demostrada en los trabajos de *Poveda y Mesa* (1993); *Poveda* (1994); *Mesa et al.* (1994); *Poveda y Mesa* (1995), *Poveda y Mesa* (1996), y *Poveda y Mesa* (1997).

En la figura 1 se presenta el diagrama de correlaciones entre las temperaturas superficiales del mar en los Océanos Pacífico e Indico y la serie de la primera Componente Principal de las precipitaciones en Colombia. Esta última se define como la proyección temporal de la evolución del campo de precipitación de 88 estaciones de medición de lluvia mensual en Colombia. La localización de las estaciones con las cuales se efectuó el análisis de Componentes Principales se muestra en la figura 2. Los detalles pueden consultarse en el trabajo de *Poveda* (1994). En la figura 1 se observan correlaciones altas (negativas) con el promedio de las temperaturas del mar en las llamadas regiones Niño-3 (5°N-5°S, 150°O-90°O) y Niño-4 (5°N-5°S, 160°E-150°O) y en la región del monzón hindo-africano. Los mecanismos físicos de la circulación que son responsables de la influencia del ENSO sobre la hidro-climatología de Colombia, se discuten en el trabajo de *Poveda y Mesa* (1997).

Figura 1. Diagrama de iso-correlaciones entre las temperaturas superficiales del mar en los Océanos Pacífico e Indico y la serie de la primera Componente Principal de las precipitaciones en Colombia. Nótese las correlaciones negativas estadísticamente significativas altas en las regiones Niño-4 y Niño-3.



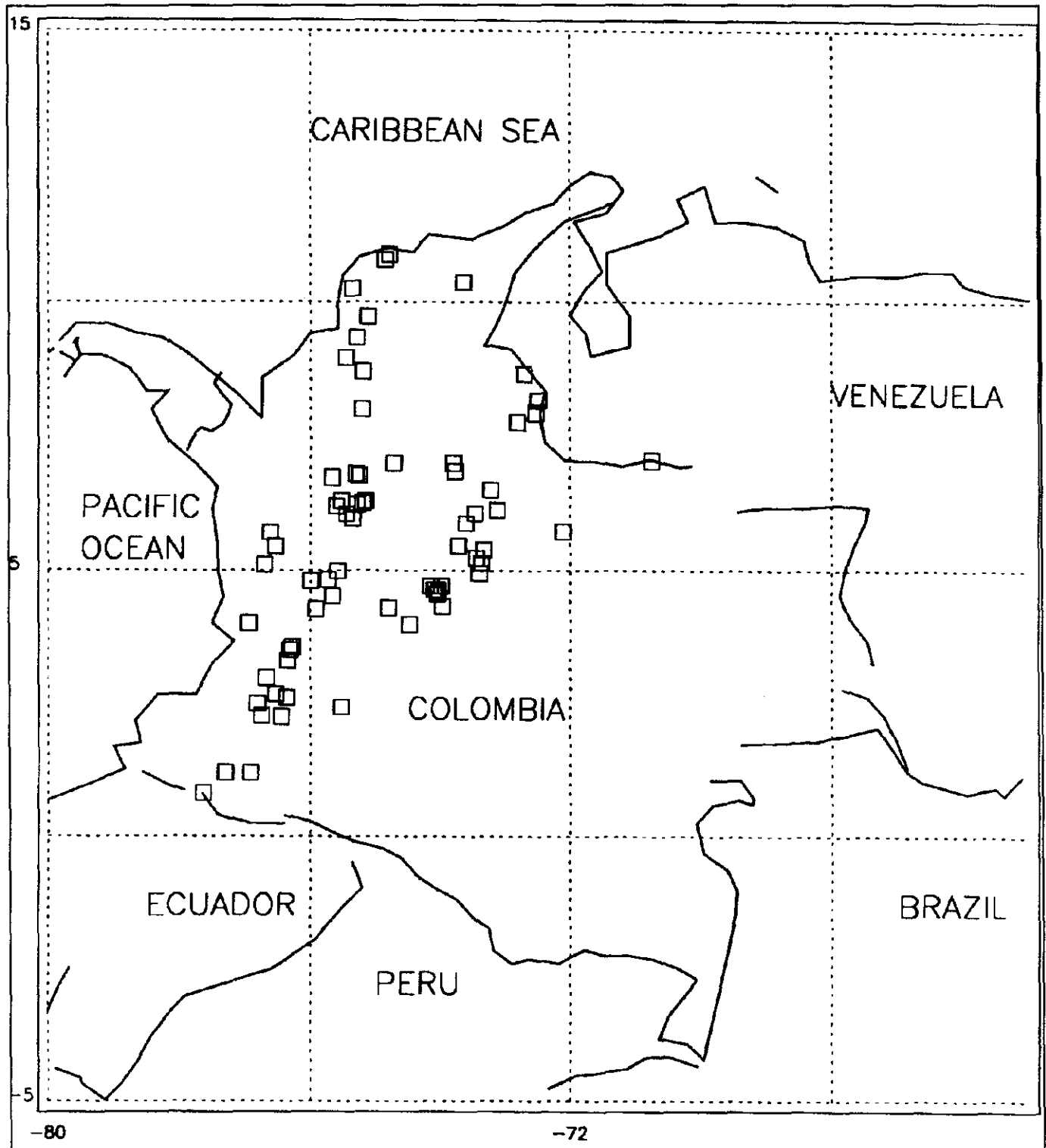


Figura 2. Localización de las 88 estaciones de registro de lluvias usadas en el análisis de Componentes Principales, para el período 1958-1990.

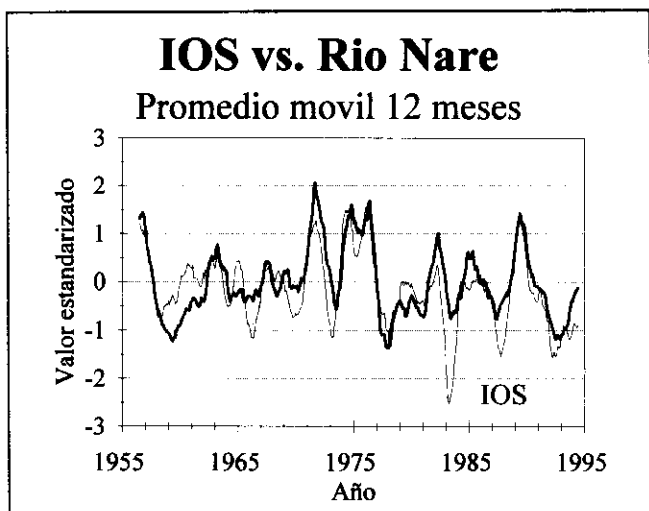


Figura 3. Evolución temporal de las series de anomalías del SOI y de los caudales del río Nare en Santa Rita (Antioquia). El coeficiente de correlación simultánea es de 0.70, estadísticamente significativo al 99%.

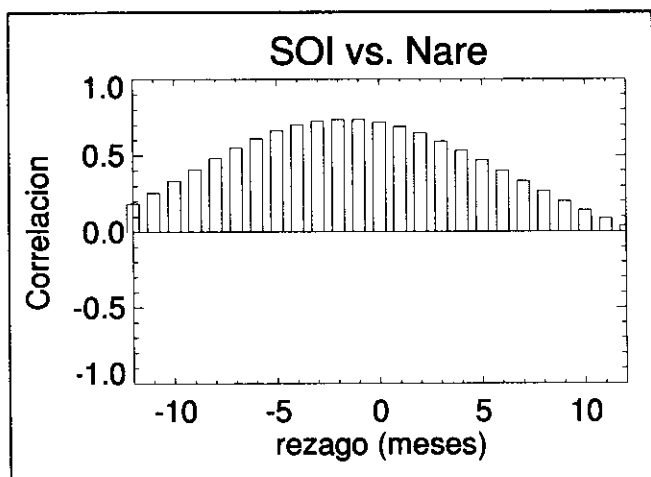


Figura 4. Diagrama de correlación cruzada entre las series mostradas en la figura 3 para rezagos entre -12 y 12 meses. Los rezagos negativos indican que la serie del SOI antecede a la hidrología del río Nare en el número de meses indicado por el rezago, sobre la abscisa.

En la figura 3 se presenta la evolución temporal de las series del SOI y de las anomalías de los caudales del río Nare en Santa Rita en Antioquia. Como se observa, la asociación entre ambas señales es muy fuerte. En la figura 4 se presentan los valores del coeficiente de correlación cruzada para rezagos entre -12 y 12 meses en donde los rezagos negativos indican que la serie del SOI antecede a la hidrología del río Nare en el número de meses indicado por el rezago, sobre la abscisa de la figura 4. Allí se observa que la máxima correlación de 0,73

(significativa al 95%), se presenta cuando el SOI antecede a los caudales del río Nare en 2 meses.

3. Vectores de la Malaria

La malaria o paludismo es una enfermedad producida por varias especies de parásitos del género *Plasmodium*, de los cuales dos son responsables de casi la totalidad de los casos de malaria que ocurren en Colombia, el *Plasmodium vivax* y el *Plasmodium falciparum*. El parásito es transmitido de persona a persona por un mosquito del género *Anopheles* que se cría en charcos, pozos o lagunas, o en la axila de las plantas parásitos de la familia *Bromeliaceae*.

La hembra del mosquito vector necesita sangre para poder producir huevos y asegurar su reproducción. La obtiene picando animales o al ser humano. Pocos días después pone huevos en los estanques de aguas quietas, en los cuales se originan larvas que crecen progresivamente, y que dan origen a nuevos mosquitos en el transcurso de 7 a 10 días, dependiendo de la temperatura del agua. La hembra del mosquito continua obteniendo sangre cada 2 a 4 días para formar más huevos. Si la sangre la obtienen de un enfermo de malaria, adquiere el parásito, que cumple dentro del mosquito un ciclo de desarrollo que termina con la generación de una forma llamada esporozito que ocupa la glándula salivar del mosquito hembra y que infectará a la próxima persona que el vector pique para obtener sangre. Mientras más días logre sobrevivir el mosquito, mayor oportunidad tendrá de incrementar su progenie porque pondrá más huevos e igualmente más oportunidad tendrá de transmitir la enfermedad.

Tres factores climáticos afectan la epidemiología de la malaria: temperatura, lluvia y humedad (Bouma, 1995). La temperatura afecta la dinámica de la población de vectores (longevidad y tasa de picadura), y posiblemente también la duración del ciclo del parásito de la malaria dentro del mosquito. Cuando las temperaturas están por encima de lo normal, el período larvario del mosquito se acorta, con lo cual el número de mosquitos puede incrementarse. Una mayor temperatura puede dar lugar a una disminución del período de incubación extrínseco (el intervalo de tiempo que transcurre entre la ingestión del parásito y la transmisión por picadura), acelerando por tanto el proceso de transmisión. La transmisión es incrementada en climas más cálidos por una mayor abundancia de vectores (Epstein y Stewart, 1995). Adicionalmente, modificaciones en la temperatura del agua de los criaderos se acompaña de cambios en la flora

de algas favoreciendo la cría de determinadas especies de Anofelinos que pueden ser más potentes vectores de enfermedad.

La lluvia y la humedad influyen sobre la densidad y la longevidad de la población de vectores, así como sobre la presencia de sitios de incubación. El régimen de lluvias condiciona la producción y el tamaño de los criaderos de mosquitos. Excesos de lluvias hacen rebosar los criaderos disminuyendo o impidiendo la producción de mosquitos. La sequía excesiva ocasionará la extinción de muchos criaderos y por ende disminuirá la disponibilidad del hábitat adecuado para que el vector tenga en donde colocar sus huevos. Condiciones normales de lluvia garantizan la existencia de depósitos apropiados para la reproducción de mosquitos. No obstante y aún cuando parezca paradójico, una ausencia prolongada de lluvias puede facilitar el establecimiento de otros criaderos de mosquitos en las orillas de ríos y quebradas que comiencen a mostrar una importante disminución de caudal, ya que permiten la formación de pequeñas lagunas y charcos estancados que son rápidamente colonizados por mosquitos. Este hecho ha sido reportado en Sri Lanka (Bouma *et al.*, 1994). Es claro entonces, que cambios acentuados en los regímenes de lluvias y temperaturas tienen gran influencia en el número y especies de los vectores de malaria, en la longevidad del mosquito y en la duración del ciclo extrínseco del parásito dentro del vector.

4. Malaria-ENSO en Colombia

En diversas partes del mundo se ha reportado el incremento en casos de enfermedades de origen hídrico y de las transmitidas por vectores, como resultado de la variabilidad climática forzada por el llamado fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). Entre las primeras están el cólera, la disentería, y la tifoidea, y entre las segundas están la malaria, el dengue, la fiebre amarilla, la encefalitis, la esquistomiasis y los hantavirus, y de pestes agrícolas en roedores, insectos, hongos, bacterias y virus. Por ejemplo, hay reportes acerca de brotes epidémicos de malaria asociados al ENSO en Pakistán (Bouma y van der Kaay, 1994), y Venezuela (Bouma y Dye, 1996). En Ecuador y Perú, brotes de malaria parecen estar relacionados con la fase cálida del ENSO y a las inundaciones que causa en esos países (Epstein and Stewart, 1995). Ver también los trabajos de Bouma (1995), y Patz *et al.* (1996).

Dos tercios de la población Colombiana vive en áreas endémicas de malaria (Rojas *et al.*, 1992). La precipitación media anual varía desde menos de 50 mm en regio-

nes de la costa Atlántica hasta regiones con 10.000-13.000 mm sobre la costa Pacífica. La temperatura varía con la altitud desde 0-5,000 m. Los más importantes vectores de la malaria en Colombia son *Anopheles albimanus*, *A. darlingi* y *A. nuñeztovari* (Quiñonez *et al.*, 1987), los cuales transmiten *P. falciparum* (46.5%) y *P. vivax*, y algunos casos de *P. malariae* (Haworth, 1988).

En la Figura 5 se presenta la evolución temporal de los índices de Incidencia de malaria por *P. vivax* (I.V.A.), y por *P. falsiparum* (I.F.A.) y su agregado, llamado Incidencia Parasitaria Anual (I.P.A.). Estos índices se definen como el número de casos reportados en relación con la población bajo riesgo, tal como han sido reportados por el Ministerio de Salud de Colombia para el período 1959-1994. En la figura 5 se destacan tres hechos: (1) los picos que se presentan en los años 1961, 1968, 1972, 1977, 1983, 1987 y 1991/1992; (2) la evidente tendencia creciente en el número de casos reportados, y (3) la predominancia que ha alcanzado el I.V.A. sobre el I.F.A. en los últimos años, en particular desde 1976-77. Sobre el primer punto se observa que los incrementos fuertes en el número de casos reportados se presentan en los años de ocurrencia del fenómeno de El Niño, demarcados por las flechas. Para el año 1961, debe recordarse que el período seco de 1957-1962 en Colombia forzado por El Niño ha sido uno de los más intensos y prolongados en la historia del país. El año de 1968, aunque no figura en la categoría de Kiladis y Diaz (1969) como un año El Niño, es sin embargo, un año de anomalías negativas de lluvias

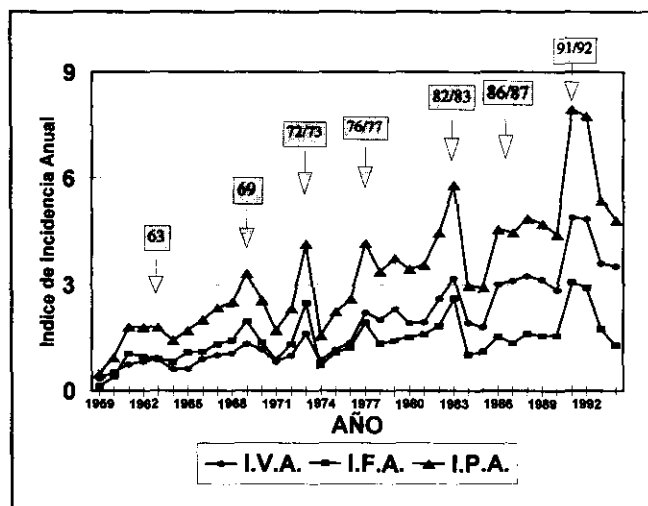


Figura 5. Evolución temporal del índice de Incidencia Parasitaria Anual (I.P.A.), del total de *Plasmodium vivax* y *P. falsiparum* en Colombia, y reportados por el Ministerio de Salud para el período 1959-1994.

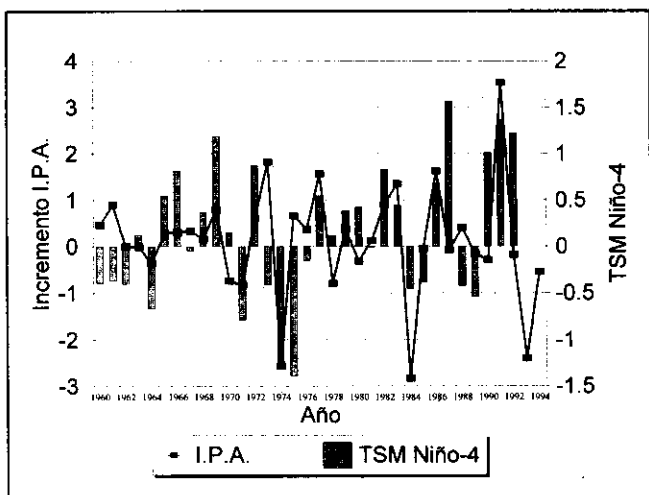


Figura 6. Evolución conjunta de las series de la primera derivada del índice I.P.A. y de las temperaturas superficiales del mar en la región Niño-4.

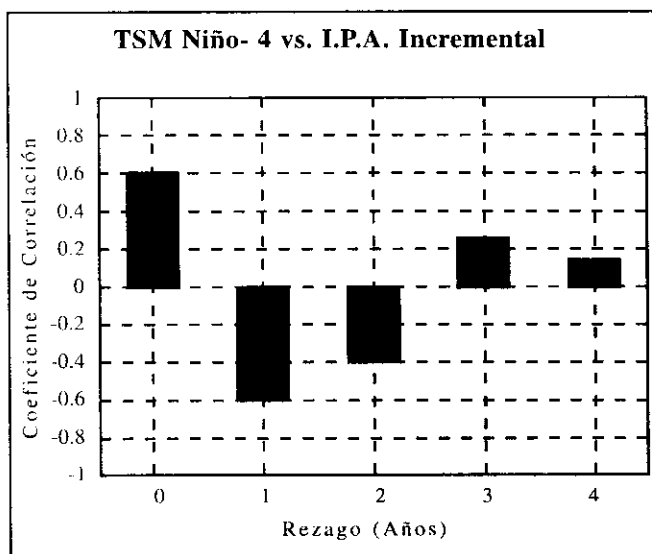


Figura 7. Diagrama de correlación cruzada entre las series de la figura 6, cuando la serie de temperaturas superficiales antecede la serie de la malaria en el número de años mostrado sobre la abscisa.

en Colombia (Poveda, 1994). Los demás años corresponden exactamente con los años de la ocurrencia de El Niño. Este incremento no es producto del azar. Hay una relación entre los períodos secos causados por el fenómeno El Niño en Colombia y el incremento de los casos de malaria del país. Debe hacerse una salvedad. La relación entre la señal del ENSO y la de la hidro-climatología de Colombia (como ocurre en todas partes) no es perfecta. Varios factores lo producen: la intensidad, la amplitud y

la duración de las fases del ENSO varían de evento a evento, además otros fenómenos están influyendo para modular la hidrología de Colombia, a través de interacciones no lineales con el ENSO: el monzón de la India, el centro de altas presiones atmosféricas del Atlántico Norte en Azores, la circulación en la cuenca del Amazonas, la oscilación de Madden-Julian, la Oscilación Cuasi-Bienal de los vientos estratosféricos, etc., (Poveda, 1996).

Para cuantificar la asociación entre el fenómeno ENSO, en la figura 6 se presenta la primera derivada de la serie de IPA. Esta primera derivada es una manera convencional de remover la evidente tendencia creciente presente en la serie. Allí se muestra también la evolución del promedio de las temperaturas superficiales del mar en la región Niño-4, que como se demostró, es la que presenta las mayores correlaciones con la hidro-climatología de Colombia. En la figura 6 se hace más evidente la fuerte asociación entre el fenómeno ENSO y la variabilidad de los casos de malaria en Colombia, lo cual es confirmado por el análisis de correlación cruzada (figura 7), los cuales presentan valores del coeficiente de correlación de 0,61 (estadísticamente significativos al nivel de 95%), para rezagos de 0 y 1 año.

Las razones que pueden explicar la estrecha relación entre la ocurrencia del fenómeno de El Niño y la intensificación de la malaria en Colombia tienen que ver con los aspectos discutidos en los numerales anteriores. En particular el incremento de las temperaturas del aire, y la disminución de lluvias (que contribuye a la formación de charcos y aguas estancadas en los lechos y riberas de ríos y quebradas), y que ocurren en Colombia durante El Niño, parecen ser los principales mecanismos que influyen sobre la dinámica de los sistemas ecológicos de los parásitos y los vectores que producen y transmiten la enfermedad. Sin embargo, esta es una primera aproximación a la explicación detallada de la relación ENSO-Clima de Colombia-casos de malaria. Sobre este tema estamos profundizando la investigación, particularmente con énfasis en los niveles regional y local.

La tendencia creciente que se observa en los casos de malaria reportados en Colombia (figura 5) puede tener varias explicaciones:

- Desarrollo de resistencia a los insecticidas empleados en la llamada Campaña de Erradicación de la Malaria de 1962 a la fecha.
- Desarrollo de resistencia del parásito (*Plasmodium*) a los medicamentos antimaláricos.

- Disminución en las campañas de control de malaria por razones presupuestales y/o problemas de orden público en zonas especialmente favorables para la enfermedad.
- Es posible que la tendencia creciente en la incidencia de malaria tenga relación con el cambio climático a escala global, y su incidencia particular en Colombia. Sobre este punto uno de nosotros (G.P.J.) ha encontrado, conjuntamente con O. J. Mesa del Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, serias y consistentes evidencias (ver *UNAL-UPME*, 1996).

5. Conclusiones y discusión

Hemos mostrado las evidencias estadísticas sobre la asociación existente entre el fenómeno El Niño y la instensificación de los brotes epidémicos de malaria en Colombia. Es claro que la epidemia de esta enfermedad es resultado de múltiples factores, pero la variabilidad climática asociada al fenómeno El Niño-Oscilación del Sur permite explicar una porción importante de la varianza de los casos de malaria en el país. Esta evidencia permite conjeturar que la ocurrencia del fenómeno de El Niño también está relacionada con otras enfermedades de origen hídrico o de transmisión vectorial en Colombia, en particular el dengue. Estas correlaciones estadísticas pueden ser utilizadas para desarrollar Sistemas de Alerta Temprana (SAT) de las condiciones climáticas que conducen a brotes epidémicos, facilitando así la intervención de las autoridades del sector salud en Colombia, mediante el fortalecimiento de los programas de control integrado de vectores. La aplicación de insecticidas y controles biológicos y la implementación de otras medidas no permanentes (impregnado de toldillos con piretroides) se puede planificar e implementar una vez que se espera la ocurrencia del fenómeno de El Niño. Todo el sector salud puede movilizar personal, agilizar las campañas de entrenamiento para el diagnóstico de la malaria, planificar con antelación los dispensarios y almacenamiento de droga antimalarica e iniciar campañas de vacunación, aumentar la vigilancia y por supuesto diseminar la información y las medidas de control en los medios de comunicación.

Las buenas posibilidades de predicción del fenómeno ENSO, que se reportan constantemente en la literatura científica y las posibilidades de predicción de la hidroclimatología de Colombia ofrecen una herramienta de predicción de los brotes de malaria en Colombia. Cada vez es mayor el número y el tipo de metodologías que se

reportan en la literatura para la predicción de los fenómenos oceánico-atmosféricos asociados con el ENSO. Los resultados de tales predicciones se reportan mensualmente en documentos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de Estados Unidos, como el *Forecast Bulletin* y el *Climate Diagnosis Bulletin*, y están en disponibles en el World Wide Web de Internet en la siguiente dirección: http://nic.fb4.noaa.gov/products/analysis_monitoring. En el Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, se han venido desarrollado herramientas para predicción hidrológica en distintas escalas de tiempo tratan de incorporar el efecto del ENSO sobre la hidro-climatología de Colombia y además las características no lineales de los procesos hidrológicos. Entre ellas, se mencionan los siguientes métodos: redes neuronales (*Mesa et al., 1994*), análisis espectral singular (*Carvajal et al., 1994*), ecuaciones diferenciales estocásticas con potencial de doble pozo (*Salazar et al., 1994a*), procesos auto-regresivos dependientes del régimen (*Salazar et al., 1994b*), modelación lineal inversa (*Poveda y Penland, 1994*) y modelos de regresión multivariada adaptiva por tramos (MARS, *Rendón, 1997*) Los resultados muestran una mejora muy importante en la capacidad de predicción frente a otros métodos usuales en hidrología.

Se requiere seguir ahondando en la investigación para determinar con claridad los mecanismos físicos de la relación El Niño-clima local y regional-casos de malaria, en Colombia. Es necesario efectuar un detallado examen de los parámetros climáticos y su relación con los aspectos más importantes de la dinámica ecológica y epidemiológica de la malaria en el país, fundamentalmente a nivel local y departamental. Igualmente es importante definir cual es el impacto de los cambios climáticos ocasionados por el fenómeno ENSO sobre el ciclo biológico del *Plasmodium*. Este trabajo puede proporcionar un marco de referencia para la investigación y el entendimiento de la relación entre factores climáticos, la variabilidad climática a diversas escalas de tiempo y la salud humana.

Reconocimientos

El trabajo de G. Poveda ha sido apoyado parcialmente por COLCIENCIAS. Los datos de malaria han sido suministrados amablemente por el Ministerio de Salud de Colombia. Este trabajo se ha beneficiado de valiosas discusiones con M. L. Quiñonez, P. R. Epstein, N. Graham, M. Bouma y D. Chavasse.

Referencias

- Bouma, M. J. *Epidemiology and control of malaria in northern Pakistan with reference to the Afghan refugees, climatic change, and El Niño Southern Oscillation*, ICG Printing, dordrecht, The Netherlands, 1995.
- Bouma, M. J. & H. J. van der Kaay. Epidemic malaria in India and El Niño Southern Oscillation, *The Lancet*, 344, 1638-1639, 1994.
- Bouma, M. J., H. E. Sondorp, & H. J. van der Kaay. Climate change and periodic epidemic malaria, *The Lancet*, 343, 1440-1444.
- Bouma, M. J. & C. Dye. Cycles of malaria associated with El Niño in Venezuela, submitted.
- Carvajal, L. F., O. J. Mesa, J. E. Salazar, & G. Poveda. Aplicación del análisis espectral singular a series hidrológicas en Colombia. *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 3, 97-108. 1994.
- Díaz, H. F., & G. N. Kiladis. Atmospheric teleconnections associated with the extreme phases of the Southern Oscillation. En: *El Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation* (H. F. Diaz y V. Markgraf, eds.), 1992.
- Díaz, H. F., & V. Markgraf (eds.). *El Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press. 476 p., 1993.
- Epstein, P., & M. Stewart. Saving scarce public health resources and saving lives: Health sector applications of climate forecasting . Preprint. 1996.
- Glantz, M., R. Katz & N. Nicholls (eds.). *Teleconnections linking worldwide climate anomalies*, Cambridge University Press. 535 p., 1991.
- Mesa, O. J., G. Poveda, L. F. Carvajal & J. E. Salazar. Efecto del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur en la hidrología Colombiana, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, Vol. 3, IAHR, Santiago de Chile, 373-384, 1994.
- Patz, J. A., P. E. Epstein, T. A. Burke & J. M. Balbus. Global climate change and emerging infectious diseases, *Jour. Amer. Med. Assoc.*, 275, 217-223, 1996.
- Poveda, G. Funciones Ortogonales Empíricas en el análisis de la relación entre los caudales medios en Colombia y las temperaturas de los océanos Pacífico y Atlántico, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 131-144, 1994.
- _____. *Modulación de la hidrología de Colombia por el ENSO y otros fenómenos de gran escala*. Trabajo presentado para obtener la categoría de Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 1996.
- Poveda, G., & O. J. Mesa. The Relationship between ENSO and the hydrology of tropical South America. The case of Colombia , *Proceedings of the Fifteenth Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, 227-236, Atherton, CA, USA, Hydrology Days Publications, 1995.
- _____. Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica en México*, XI, No.1, 21-37, 1996.
- _____. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale oceanic-atmospheric phenomena , En Imprenta, *J. Climate*, 1997.
- _____. & C. Penland. Predicción de caudales medios en Colombia usando Modelación Lineal Inversa , *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 119-129, 1994.
- Quiñonez, M. L., M. F. Suárez & G. A. Fleming. Estado de la susceptibilidad al DDT de los principales vectores de malaria en Colombia y su implicación epidemiológica. *Biomédica*, 7, 81-86, 1987.
- Rendón, L.D. Beneficios de la predicción hidrológica en el sector eléctrico Colombiano considerando la variabilidad climática. Tesis de Magister. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 1997.
- Rojas, W., F. Peñaranda & M. Echavarría. Strategies for malaria control in Colombia, *Parasitology Today*, 8, 141-144., 1992.
- Salazar, J. E., O. J. Mesa, G. Poveda & L. F. Carvajal. Aplicación de un modelo continuo no lineal de series hidrológicas, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 169-180, 1994a.
- _____. Modelamiento del fenómeno ENOS en la hidrología colombiana mediante procesos autoregresivos dependientes del régimen, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 181-191, 1994b.
- Unninayar, S. S., & W. Sprigg. Climate and the emergence and spread of infectious diseases, *EOS*, 76, No. 47, p. 478, 1995.

¿ATRACTORES EXTRAÑOS (CAOS) EN LA HIDRO-CLIMATOLOGIA DE COLOMBIA?

Por

Germán Poveda Jaramillo*

Resumen

Poveda, G.: ¿Atractores extraños (CAOS) en la hidro-climatología de Colombia?. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(81): 431-444, 1997. ISSN: 0370-3908.

La hidrología de Colombia está fuertemente afectada por ambas fases del ENSO, un fenómeno que exhibe rasgos de caos determinístico de baja dimensionalidad. Se examina el posible comportamiento caótico de la hidro-climatología de Colombia. Para ello, se presentan algunas ideas de la cuantificación de caos usando series temporales y se aplican a series hidrológicas extensas de Colombia, consistentes en registros de precipitación mensual de Bogotá entre 1866 y 1992 y de Medellín entre 1908 y 1995, así como a la serie de caudales medios mensuales del río Magdalena en Puerto Berrío. Se estiman el Espectro de Potencias, la dimensión de Hausdorff-Besikovich (fractal), la dimensión de escalamiento entre distancias en los atractores, y el mayor exponente de Lyapunov de las series temporales. Se estudia la dinámica que controla el comportamiento de la precipitación y los caudales, con el ánimo de investigar la existencia de componentes determinísticas de baja dimensionalidad, y el posible comportamiento caótico. Se discuten algunas ideas acerca de la predicción hidrológica en el contexto de sistemas dinámicos no lineales en régimen de caos.

Palabras claves: Hidrología, ENSO, Teoría del Caos, Colombia.

Abstract

Interannual hydro-climatology of Colombia is strongly influenced by extreme phases of ENSO, a phenomenon exhibiting many features of chaotic non-linear system. The possible chaotic nature of Colombian hydrology is examined by using time series of monthly precipitation at Bogotá (1866-1992) and Medellín (1908-1995), and average streamflows of the Magdalena river at Puerto Berrío. The power spectrum, the Hausdorff-Besikovich (fractal) dimension, the correlation dimension, and the largest Lyapunov exponent are estimated for the time series. Ideas of hydrologic forecasting and predictability are discussed in the context of nonlinear dynamical systems exhibiting chaotic behavior.

Key words: Hydrology, ENSO, Chaos theory, Colombia.

1. Introducción

1.1 PREDECIBILIDAD DEL CLIMA. Como lo sabemos de la experiencia cotidiana, el pronóstico del clima está muy lejos de ser perfecto. Se predice que habrá lluvias aisladas en una región sin indicar la hora ni el lugar y menos se habla de su intensidad. De otra parte, es posible predecir con total exactitud que el sol saldrá mañana a las 5:58 a.m. La diferencia entre los dos tipos de predicciones es evidente. La razón para tal divergencia radica en la escala espacial y temporal de los fenómenos involucrados. La variabilidad astronómica es importante en escalas de tiempo geológicas, pero a escala humana es insignificante y despreciable. De allí el carácter perfecto de las predicciones astronómicas. El clima que nos rodea es producto de la interacción no lineal de múltiples procesos geofísicos que ocurren simultáneamente en diversas escalas del espacio y del tiempo. Tal carácter de no linealidad es el responsable de la poca predecibilidad del clima, particularmente en el mediano y en el largo plazo.

El trabajo ya clásico de *Lorenz* (1969) constituye la primera evidencia de caos en la dinámica del clima. Su modelo consiste en tres ecuaciones diferenciales no lineales acopladas para describir de una manera muy sencilla el fenómeno de la convección atmosférica ocasionado por el calentamiento de la atmósfera desde la superficie del terreno. En tal modelo, *Lorenz* encuentra la primera manifestación de que la atmósfera es un sistema inestable, altamente sensible a las condiciones iniciales, caótico, cuya trayectoria puede estar contenida en un "atractor extraño". Por ello se ha recurrido a la metáfora del "aleteo de la mariposa" en la selva del Amazonas que es capaz de desatar un tornado en Japón a la semana siguiente.

La predicción del tiempo en el largo plazo con total precisión es una tarea imposible, pues se necesitaría una precisión ilimitada en el conocimiento de las condiciones iniciales de las variables y además requeriríamos una precisión infinita del modelo y de su integración numérica en computador. Ambos requerimientos son absurdos. Hay pues, límites en la predecibilidad que dependen de los tipos de procesos bajo estudio (en particular de sus escalas), del carácter y magnitud de los errores iniciales y de la exactitud del método de predicción. De otra parte, la predicción climatológica de largo plazo es posible porque la existencia de atractores extraños demuestra que sólo ocurrirán ciertas clases de movimiento turbulento. La herramienta de predicción de largo plazo se basa en el cálculo y la extrapolación de cantidades físicas que se promedian sobre todo el atractor.

El tema de la existencia de atractores de baja dimensionalidad en el clima es aún tema de debate en la literatura (*Lorenz*, 1991). La teoría de caos ha aportado nuevas luces en torno al problema de la turbulencia (rutas a la turbulencia desarrollada, bifurcaciones doblando el período, intermitencia, cuasi-periodicidad, multifractalidad, etc.). El clima es resultado de la turbulencia en muchas escalas espacio-temporales. *Nicolis y Nicolis* (1987) encuentran un atractor de baja dimensionalidad para los ciclos de glaciación/deglaciación durante el último millón de años. *Nicolis y Nicolis* (1984) encuentra una familia de atractores caóticos para el modelo de evolución climática que considera el sistema océano-criósfera-atmósfera modulado por forzamientos astronómicos en el rango 10^3 - 10^5 años. En otras escalas espacio-temporales, *Romanelli et al.* (1988) encuentran atractores de baja dimensión (3-4) para las series de tiempo de (i) valores horarios de la frecuencia crítica ionosférica, (ii) valores diarios del flujo de radiación solar, y (iii) valores horarios del índice geomagnético auroral. *Essex y Nerember* (1987) analizan series de la altura geopotencial diaria de los 500 mb y encuentran un atractor de baja dimensión. *Grassberger* (1986) encuentra un atractor de alta dimensión (alrededor de 10) en registros de anillos de árboles para los últimos 7100 años. *Rodríguez-Iturbe et al.* (1989) encuentran rasgos de caos en registros de lluvia horaria en el área de Boston. *Tsonis y Elsner* (1989) identifican un atractor de baja dimensionalidad en registros de velocidad del viento. *Poveda y Puente* (1993) también encuentran evidencia de caos en registros de velocidad de viento y temperatura para la capa límite atmosférica de un bosque Canadiense, identificando variabilidad en la dimensión de los atractores con la altura.

1.2 EL NIÑO-OSCILACION DEL SUR: UN FENOMENO CAÓTICO? El fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) se da como resultado de la interacción entre el océano y la atmósfera en la región del Océano Pacífico ecuatorial. Se trata del conjunto más poderoso de variaciones atmosféricas y oceánicas en escalas de tiempo de meses a varios años a nivel global (*Glantz et al.*, 1991; *Philander*, 1990; *Diaz y Markgraf*, 1993). Como se dijo, el ENSO tiene su origen en la interacción no lineal entre el océano y la atmósfera sobre el Océano Pacífico tropical. Además, hay hipótesis que vinculan al ENSO y a los monzones de la India como sistemas mutuamente interactivos (*Webster y Yang*, 1994). Además, *Barnett* (1991) demuestra que el ENSO se debe parcialmente a la interacción no lineal entre dos frecuencias: una cuasi-bienal y otra de baja frecuencia entre 3y 7 años. Uno de los rasgos más destacables del ENSO es su manifestación aperiódica pero recurrente entre 2 y 7 años, un rasgo que

se presenta en sistemas dinámicos no lineales. En tanto que los métodos que se usan para predecir algunos de los rasgos característicos del ENSO han tenido algún éxito, con anticipación de 3 a 9 meses, todavía quedan muchas preguntas abiertas. Entre ellas, entender cómo interactúa el (cuasi) ciclo del ENSO (entre 45 y 60 meses) con el ciclo anual y con otros fenómenos cíclicos que afectan el clima de los trópicos tales como la Oscilación Cuasi-Bienal, la Oscilación del Atlántico Norte, las oscilaciones de 30-60 días, las ondas del este, y aún el ciclo diurno.

Hay evidencias serias de la posible naturaleza caótica del ENSO. *Vallis* (1986) construye un modelo determinístico tridimensional de ecuaciones diferenciales, análogo al sistema de Lorenz, para describir la dinámica del ENSO. El modelo reproduce algunos de los aspectos cualitativos del fenómeno. *Hense* (1987) encuentra evidencia de la existencia de un atractor extraño usando la serie de tiempo del Índice de Oscilación del Sur (el índice tradicional que se utiliza para describir el ENSO), con una dimensión fractal en el interarvalo 2,5 a 6, lo que sugiere que hay entre 5 y 15 grados de libertad que dominan en el sistema. *Fraedrich* (1986) ha desarrollado un modelo cuadrático (análogo a la ecuación logística, muy popular en teoría de caos) para representar las intensidades del fenómeno de El Niño. La naturaleza aperiódica recurrente del ENSO es un rasgo común en sistemas caóticos, así como el hecho que cada evento del ENSO es diferente de los demás, aunque haya patrones comunes. Los mecanismos físicos de la inestabilidad convectiva encontrados en el ENSO son (auto)-similares a aquellos que ocurren en escalas menores, tal como la oscilación intra-estacional de 30-60 días, y otros tipos de organizaciones de celdas convectivas. *Enfield* (1989) postula que si el ENSO no es un sistema caótico, sería más la excepción que la regla. De acuerdo con *Münnich et al.* (1991), la variabilidad de largo plazo del ENSO es intrínsecamente caótica (independiente de la naturaleza caótica del clima mismo). Recientemente, dos estudios independientes han propuesto que la falta de regularidad exacta del ENSO pueden ser representadas por procesos caóticos de baja dimensionalidad que son forzados por el ciclo anual (*Jin et al.*, 1994; *Tziperman et al.*, 1994). Usando un modelo océano-atmósfera acoplado forzado por la variación en el ciclo anual, *Chang et al.* (1995) encuentran que el ENSO puede presentar caos vía bifurcaciones de doblado del período cuando el ciclo anual se intensifica. La naturaleza caótica del fenómeno ENSO no ha sido claramente definida, aunque hay serias evidencias a favor.

En general, existe buena coherencia entre las anomalías hidrológicas en la parte tropical de América del Sur

(Colombia, Venezuela, Guyana y la cuenca del Amazonas) y las dos fases del ENSO. Con ciertas diferencias en el tiempo y en la amplitud, estas regiones exhiben anomalías negativas en lluvias y caudales durante El Niño, y lo contrario durante La Niña. Hay ya muchas evidencias consistentes de la fuerte influencia del ENSO sobre la hidro-climatología de Colombia (*Poveda y Mesa, 1993; Poveda, 1994; Poveda y Mesa, 1995; Poveda & Mesa, 1996, Poveda & Mesa, 1997*). Entonces es dado preguntar si la hidro-climatología de Colombia presenta señales de caos determinístico de baja dimensionalidad, como resultado de su fuerte dependencia con respecto del ENSO en la escala interanual, y/o como resultado de la interacción de los múltiples procesos geofísicos que modulan su clima a diferentes escalas. En este trabajo se presentan algunas ideas sobre la cuantificación de caos y su aplicabilidad al caso de varias series temporales de la hidrología de Colombia, tratando de identificar los tipos de atractores que subyacen en su evolución.

2. Algunas generalidades de teoría de caos

Desde los trabajos de Henry Poincaré sobre el problema de tres cuerpos en astronomía se sabe que hay sistemas de ecuaciones no lineales que presentan soluciones inestables. Los desarrollos recientes de la llamada Teoría del Caos han identificado «atractores extraños» en el comportamiento de muchos de tales sistemas en meteorología, dinámica de fluidos, biología, ecología, química, economía, fisiología, astrofísica, etc. Un atractor extraño (*Ruelle y Takens, 1971*) de un sistema determinístico de ecuaciones diferenciales no lineales se caracteriza por ser una cuenca de atracción de las trayectorias soluciones en el espacio de fases que exhibe una altísima sensibilidad a las condiciones iniciales. Obviamente, esta sensibilidad a las condiciones iniciales influye de manera notable en el análisis de la dinámica del fenómeno, ya que exige mucha precisión en las condiciones iniciales, lo cual en términos prácticos impone fuertes restricciones a la predecibilidad de largo plazo. Este hecho se refleja en un rápido decaimiento en la función de autocorrelación y la existencia de un espectro de Fourier de banda ancha. Un atractor extraño tiene la propiedad de ser un objeto fractal, ya que su dimensión de Hausdorff-Besikovitch es mayor que su dimensión topológica (*Mandelbrot, 1982*).

3. Herramientas para identificar caos en una serie temporal

3.1 EXPONENTE DE LYAPUNOV. El exponente de Lyapunov proporciona una medida de la tasa promedia

de divergencia de las trayectorias en el espacio de fases. Trayectorias caóticas presentan al menos un exponente de Lyapunov positivo. Para trayectorias periódicas, todos los exponentes de Lyapunov son negativos. En general existen tantos exponentes de Lyapunov como ecuaciones dinámicas. Mediante el conjunto de los exponentes de Lyapunov es posible estimar la tasa a la cual convergen o divergen las trayectorias dentro de un atractor. Cualquier sistema que contenga por lo menos un exponente de Lyapunov positivo se define como caótico (Wolf et al., 1985). Existe todo un espectro de exponentes de Lyapunov definido en términos de la forma en que se deforma el atractor (una esfera inicial de eje $p_i(0)$) a medida que evoluciona en el tiempo. Así, el i -ésimo exponente de Lyapunov, λ_i , se define en términos de la tasa de crecimiento del i -ésimo eje, p_i , como:

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \log_2 \frac{p_i(t)}{p_i(0)}$$

en donde los λ_i están ordenados de mayor a menor. Los exponentes de Lyapunov pueden utilizarse para caracterizar el tipo de atractor. Si todos los λ_i son negativos, el atractor es un punto. Si $\lambda_1=0$, y los demás son negativos, el atractor es un ciclo límite estable. Si $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$, y los demás son negativos, el atractor es un toro bi-dimensional en el espacio de fases. Si al menos un exponente de Lyapunov es positivo, el atractor es extraño, indicando una divergencia exponencial de las trayectorias en el atractor, lo cual genera una extrema sensibilidad a las condiciones iniciales.

3.2 CONJUNTO DE DIMENSIONES. Como ya se mencionó, un sistema caótico presenta una divergencia exponencial de las trayectorias en el espacio de fases, aunque ellas se encuentran restringidas en una región acotada del mismo espacio. Las trayectorias sufren un proceso de «estirado y doblado» en el atractor, lo que ocasiona la rápida separación de una trayectoria con respecto a las temporalmente vecinas.

3.2.1 Dimensión de Hausdorff. La dimensión fractal, también llamada de Hausdorff-Besikovitch, de un atractor extraño, puede estimarse como:

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln (1/\epsilon)}$$

La ecuación (2) significa que el número N de cuadros de lado ϵ que se requieren para cubrir un objeto (en este caso bi-dimensional), es inversamente proporcional a ϵ . Observe que el valor de D para un punto, una línea y un

plano es 0, 1 y 2, respectivamente. En general, un fractal es un objeto (conjunto) que tiene un valor de D no entero (fraccionario).

3.2.2. Conjunto Generalizado de Dimensiones. Para la descripción de un atractor extraño se ha definido un conjunto infinito de dimensiones D_q , que incluye la dimensión fractal. Tal conjunto de dimensiones caracteriza completamente el objeto y se determina con (Hentschel y Procaccia, 1983):

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \left[\sum_{i=1}^m p_i^q \right]}{\ln \epsilon}$$

donde p_i es la probabilidad que un punto en la trayectoria esté dentro del i -ésimo cajón de un atractor cubierto con m cajones de tamaño ϵ .

Puede demostrarse que, en el límite cuando q tiende a cero, la ecuación (3) es la misma ecuación (2), correspondiente a la dimensión fractal. Y la dimensión de información D_1 , se define como:

$$D_1 = \lim_{q \rightarrow 1} D_q = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\ln \epsilon} \sum_{i=1}^m p_i \ln p_i$$

La dimensión de correlación, D_2 , se define como (Grassberger y Procaccia, 1983):

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^m p_i^2}{\ln \epsilon}$$

la cual también puede definirse como:

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C(r)}{\ln r}$$

en donde $C(r)$ es la función de correlación entre pares de puntos, definida como:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i \neq j} \theta(r - |x_i - x_j|)$$

y Θ es la función de paso unitario de Heaviside. Realmente, $C(r)$ cuenta cuantos pares de puntos (x_i, x_j) hay en el atractor, tales que su distancia $|x_i - x_j|$ es menor que r . Es posible demostrar que para el conjunto generalizado de dimensiones D_q se cumple la condición $D_0 \geq D_1 \geq D_2 \geq \dots \geq D_n$ (Hentschel y Procaccia, 1983). Según la definición de las ecuaciones, y desde el punto de vista práctico es mucho más sencillo calcular la dimensión de correlación D_2 que la dimensión fractal D_ϕ aunque las dos están fuertemente ligadas, y por ello se utiliza ésta última para caracterizar las propiedades métricas y geométricas del atractor extraño.

3.3 Reconstrucción del atractor a partir de series temporales

Para la reconstrucción de la trayectoria de la solución de un sistema de ecuaciones no lineales es necesario obtener su solución por métodos analíticos o numéricos. Generalmente el conjunto de ecuaciones no es conocido a priori pero se dispone de una serie temporal de alguna de las variables involucradas en el fenómeno físico, social, biológico, químico, etc.

Un teorema muy importante demostrado por Takens (1981) permite reconstruir «artificialmente» la dinámica de las trayectorias en el espacio de fases. Teniendo una serie temporal $x(t)$, de una de las variables presentes en el fenómeno, se usa el método de los rezagos en el tiempo, basados en el hecho que la interacción entre las variables es tal que cada componente contiene información sobre la dinámica acoplada y compleja del sistema. El procedimiento consiste en crear los vectores d -dimensionales en el espacio de fases como:

$$y(t) = [X(t), X(t + \tau), X(t + 2\tau), \dots, X(t + (D - 1)\tau)]$$

El conjunto de $y(t)$'s captura la evolución del sistema no lineal en tanto que la trayectoria se mueve en un espacio d -dimensional. Obviamente, el atractor así reconstruido no es exactamente el original pero toda la información topológica es preservada. Esta posibilidad refleja el hecho de que, aunque con una serie temporal se está midiendo solamente uno de los grados de libertad del sistema, su evolución está íntimamente afectada por los demás grados de libertad de un sistema acoplado de ecuaciones, y por lo tanto contiene información sobre la evolución de los demás grados de libertad.

Este procedimiento encara dos dificultades. El primero es establecer el valor de τ para la reconstrucción por medio de rezagos de la misma serie, y el segundo es el problema de determinar el orden del espacio dimensional en el cual debe ser embebido el atractor, dado que la dinámica del sistema es desconocida a priori. Acerca de estos dos aspectos véanse los trabajos de Albano *et al.* (1989), Sauer y Yorke (1993), y Porporato y Ridolfi (1997).

3.4 Función de escalamiento entre distancias, $C(r)$.

La dimensión D_2 representa el escalamiento de las distancias entre los puntos discretos del atractor. Tal dimensión ayuda a caracterizar las propiedades del atractor. Según la ecuación (6), D_2 puede ser estimada como la pendiente del diagrama $C(r)$ vs. r en el espacio logarítmico. La relación $C(r)$ vs. r debe establecerse para valores diferentes (crecientes) de la dimensión en que se sumerge el atractor.

Distinguir señales estocásticas de señales caóticas no es una tarea fácil. En el pasado, la convergencia del estimador de la dimensión D_2 se tomó como una indicación de la naturaleza caótica del conjunto de datos (Grassberger y Procaccia, 1983). La demostración de que ciertos ruidos colorados con espectro de decaimiento potencial (procesos no estacionarios) también pueden dar lugar a una dimensión finita (Osborne y Provenzale, 1989), ha reducido la efectividad de esta prueba tradicional para cuantificar caos. Sin embargo, Cutler (1995) ha puesto rigor a la definición de D_2 , que sigue siendo válida para procesos estacionarios. La información que se desprende de la estimación de la dimensión de correlación D_2 es importante porque no sólo es más útil que la dimensión fractal como medida de representación de las propiedades métricas del atractor extraño, sino que permite definir la dimensión del espacio en el que evoluciona el atractor, y por tanto el número de grados de libertad necesarios para describir el fenómeno.

4. Datos utilizados y resultados

Para el examen de la posible presencia de caos determinístico de baja dimensionalidad, se usaron tres series hidrológicas extensas de Colombia, las cuales se presentan en la Figura 1, así: (1) la serie de precipitación mensual de Bogotá en el Observatorio Nacional, para el período 1866-1992; (2) la serie de precipitación mensual en Medellín para el período 1908-1990 y la serie de caudales medios mensuales del río Magdalena en Puerto Berrío (Antioquia), para el período 1936-1992. Para examinar las frecuencias significativas presentes en las se-

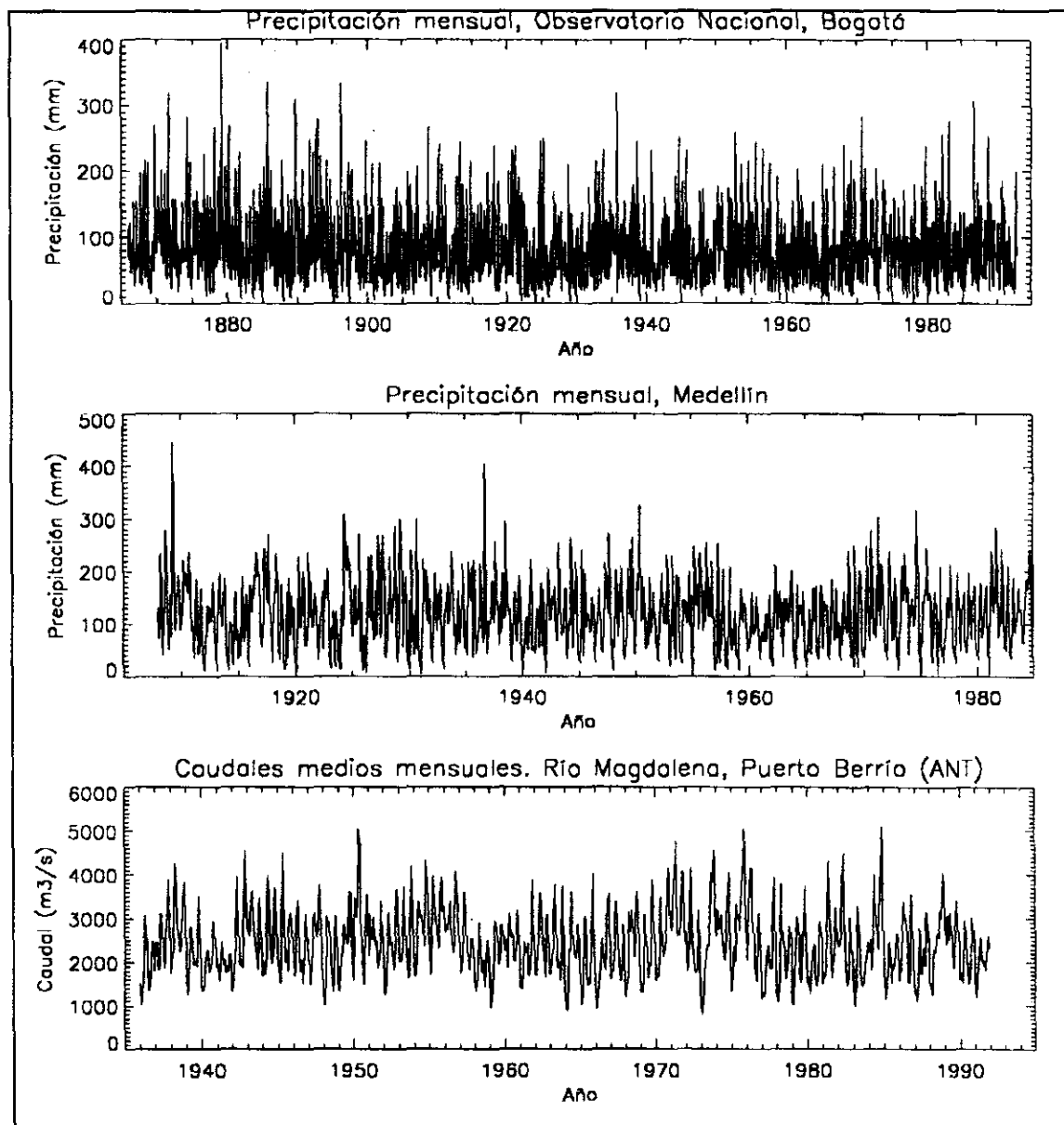


Figura 1

ries se estimó el espectro de potencias, después de estandarizar los registros mediante el escalamiento con respecto de la media y la división por la desviación estándar mensuales. Este procedimiento se utilizó para remover el efecto del ciclo anual, primordial en las series hidrológicas de Colombia, ya que se quiere examinar el efecto de la variabilidad a escala interanual. Para la estimación del Espectro de Potencias se usó el método de Máxima Entropía (Press et al., 1986, p.430). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 2, con el eje de

las abscisas variando entre 0 y 0.5 (frecuencia de Nyquist), los cuales indican la existencia de las siguientes periodicidades:

- Precipitación en Observatorio Nacional: 66 meses (5,5 años), la banda de frecuencia asociada al fenómeno ENSO; 25 meses (la banda de frecuencias asociada a la Oscilación Cuasi-Bienal de los vientos estratosféricos del trópico, también llamada QBO); 12,2 meses (un posible efecto del corrimiento de la

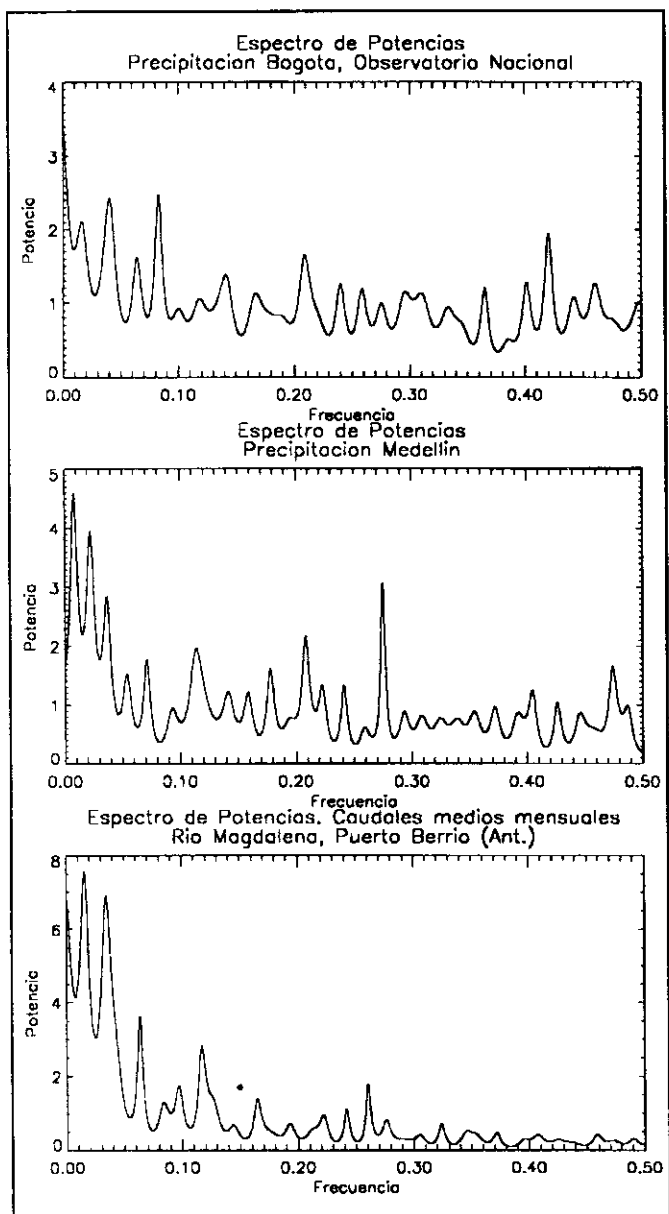


Figura 2

fase del ciclo anual, que hemos detectado en muchas series de la hidrología de Colombia, ver *Mesa et al.*, 1997); y 2,38 meses (una posible manifestación del efecto de las ondas de Madden-Julian, con periodicidad 30-60 días sobre el Océano Pacífico tropical).

- Precipitación en Medellín: 132 meses (11 años, acaso resultado de la posible manifestación de los ciclos de manchas solares?), 46 meses (la banda de frecuencias del fenómeno ENSO); 28 meses (la ban-

da de frecuencias de la QBO); 3,6 meses (una posible manifestación del carácter semi-anual de la lluvia en Medellín); 2,1 meses (posiblemente también el resultado de la Oscilación de Madden-Julian).

- Caudales medios del río Magdalena en Puerto Berrío: 66 meses (5,5 años), la banda de frecuencia asociada al fenómeno ENSO, similar a las lluvias en el Observatorio Nacional; 29 meses (la banda de frecuencias asociada a la QBO; 16 y 8 meses.

Estas (cuasi) periodicidades también son rasgos característicos de fenómenos caóticos, cuando están superpuestas sobre un espectro de banda ancha (*Poveda y Puente*, 1993), tal como lo observamos en la Figura 2.

4.1. EXPONENTES DE LYAPUNOV. La estimación del mayor exponente de Lyapunov para las series temporales se realizó usando la metodología propuesta por *Wolf et al.* (1985) incluyendo las mejoras propuestas por *Landa y Chetverikov* (1988). Ese algoritmo requiere estimar la divergencia promedio de trayectorias vecinas dentro del atractor, lo cual se logra tomando muchos puntos a lo largo de las trayectorias. Se comienza seleccionando una trayectoria de referencia en el atractor y un punto suficientemente cercano de una trayectoria vecina, separados una distancia $d(t_0)$ y luego se mide la tasa de separación de las dos trayectorias a medida que ambas evolucionan. Cuando la distancia entre las dos trayectorias se vuelve demasiado grande, el algoritmo busca una nueva trayectoria y define una nueva separación, realizándose el promedio sobre diferentes regiones del atractor.

El resultado de la estimación está dado en términos de unidades de bits por dato muestral. Así, un valor de +1 significa que la separación de órbitas cercanas se hace el doble en promedio en el intervalo de tiempo entre datos muestrales. El error es estimado como la pendiente del gráfico de la separación entre órbitas en unidades del diámetro de la hiper-esfera D -dimensional más pequeña que encierra el atractor en n pasos de tiempo sucesivos. El error se calcula como 2.5 veces la desviación estándar de la pendiente dividido por la raíz cuadrada del número de trayectorias seguidas. Hay tres parámetros que deben ser definidos. La dimensión de embebimiento D que debe ser mayor que la dimensión esperada del atractor. El parámetro n es el número de intervalos muestrales sobre el cual se sigue la trayectoria antes de escoger un nuevo par de puntos. Si n es muy grande las trayectorias se apartan mucho y se pierde la divergencia exponencial de las órbitas. Si n es muy pequeño, la estimación se hace computacionalmente muy lenta. Hay otro parámetro, E ,

Tabla 1. Exponente de Lyapunov (bits/mes). Serie de precipitación total del Observatorio Nacional en Bogotá, Los valores superiores son para el registro estandarizado y los valores inferiores son para el registro sin estandarizar.

n	D=3	D=4	D=5	D=6	D=7
3	0.741"0.03	0.446"0.03	0.356"0.02	0.332"0.02	0.304"0.02
	0.731"0.04	0.44"0.04	0.341"0.03	0.307"0.02	0.268"0.02
4	0.574"0.03	0.391"0.03	0.315"0.02	0.303"0.02	0.272"0.02
	0.576"0.04	0.386"0.03	0.298"0.027	0.263"0.02	0.236"0.02
5	0.461"0.03	0.305"0.02	0.28"0.02	0.288"0.02	0.256"0.01
	0.436"0.03	0.305"0.03	0.282"0.02	0.245"0.02	0.224"0.02
6	0.371"0.03	0.262"0.02	0.246"0.02	0.247"0.02	0.230"0.01
	0.375"0.03	0.251"0.02	0.226"0.02	0.227"0.02	0.207"0.02

que tiene que ver con la exactitud de los datos por debajo de la cual se espera que el ruido domine a la señal.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la estimación del mayor exponente de Lyapunov para la serie de precipitación mensual de Bogotá en el Observatorio Nacional (1866-1992; 1524 registros). El significado de D y n ha sido mencionado en el párrafo anterior. El valor del parámetro E se escogió como 0.0001 para las series estandarizadas y 0.00001 para las series no estandarizadas. Los resultados se presentan tanto para la serie estandarizada (casilla superior de las filas de la Tabla 1), como para la serie sin estandarizar (casilla inferior de las filas de la Tabla 1). En la Figura 3 se presentan los resultados gráficos de Bogotá, para los diversos valores de D y n .

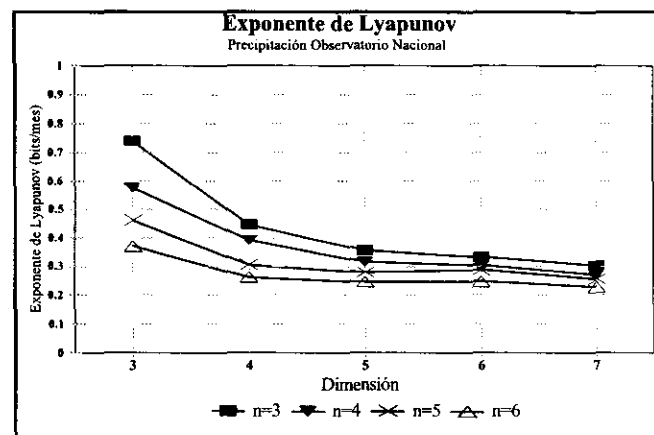


Figura 3. Estimadores del mayor exponente de Lyapunov para la serie de precipitación mensual estandarizada de Bogotá (Observatorio Nacional), con diferentes valores de D y n

Tabla 2. Exponente de Lyapunov (bits / mes). Serie de precipitación mensual de Medellín. Los valores superiores son para el registro estandarizado y los valores inferiores son para el registro sin estandarizar.

n	D=3	D=4	D=5	D=6	D=7
3	0.663"0.047	0.45"0.039	0.366"0.038	0.343"0.033	0.288"0.029
	0.65"0.05	0.407"0.04	0.368"0.013	0.308"0.030	0.237"0.03
4	0.531"0.040	0.392"0.035	0.337"0.033	0.284"0.032	0.258"0.028
	0.509"0.04	0.358"0.03	0.303"0.04	0.286"0.03	0.236"0.02
5	0.395"0.04	0.305"0.03	0.281"0.032	0.276"0.027	0.229"0.026
	0.406"0.04	0.291"0.03	0.295"0.04	0.244"0.03	0.206"0.03
6	0.345"0.03	0.265"0.03	0.249"0.03	0.238"0.03	0.215"0.03
	0.348"0.04	0.256"0.03	0.254"0.03	0.217"0.03	0.179"0.02
7	0.275"0.04	0.209"0.02	0.191"0.03	0.197"0.03	0.189"0.02
	0.29"0.03	0.202"0.03	0.215"0.03	0.217"0.03	0.185"0.02
8	0.249"0.03	0.186"0.02	0.189"0.02	0.188"0.02	0.169"0.02
	0.233"0.03	0.182"0.02	0.198"0.02	0.195"0.02	0.157"0.02

En la tabla 2 y en la Figura 4 se presentan los resultados de la estimación del mayor exponente de Lyapunov para la serie de precipitación mensual de Medellín (1908-1986). Los resultados se presentan tanto para la serie estandarizada como para la serie sin estandarizar.

En la Tabla 3 y la figura 5 se presentan los resultados de la estimación del mayor exponente de Lyapunov para la serie de caudales medios mensuales del río Magdalena en Puerto Berrío. Los resultados se presentan para la serie estandarizada y para la serie sin estandarizar.

Tabla 3. Exponente de Lyapunov (bits/mes). Serie de caudales medios mensuales del río Magdalena (Puerto Berrío). Los valores superiores son para el registro estandarizado y los valores inferiores son para el registro sin estandarizar.

n	D=3	D=4	D=5	D=6	D=7
3	0.634"0.05 0.604"0.06	0.443"0.05 0.412"0.05	0.383"0.05 0.349"0.05	0.369"0.04 0.291"0.04	0.302"0.04 0.239"0.04
4	0.456"0.05 0.473"0.05	0.369"0.05 0.390"0.04	0.359"0.04 0.305"0.04	0.340"0.0 0.271"0.03	0.258"0.04 0.230"0.03
5	0.416"0.05 0.394"0.05	0.314"0.04 0.309"0.04	0.301"0.04 0.302"0.04	0.303"0.04 0.257"0.03	0.240"0.03 0.197"0.03
6	0.335"0.05 0.320"0.043	0.275"0.04 0.245"0.03	0.257"0.04 0.257"0.03	0.257"0.03 0.249"0.03	0.225"0.03 0.186"0.03
7	0.278"0.04 0.264"0.04	0.195"0.03 0.221"0.04	0.213"0.04 0.206"0.03	0.219"0.03 0.181"0.03	0.208"0.03 0.182"0.02
8	0.263"0.04 0.237"0.04	0.215"0.03 0.202"0.03	0.209"0.03 0.176"0.03	0.207"0.03 0.181"0.02	0.178"0.02 0.158"0.02

De los resultados obtenidos para la estimación del mayor exponente de Lyapunov, λ , se desprenden los siguientes hechos:

- Todos los valores de λ se encuentran en el rango 0.15 a 0.75. La teoría indica que de acuerdo con estos resultados, las trayectorias de las series hidrológicas, en el espacio de fases D -dimensional, presentan divergencia exponencial (base 2), en promedio. Esto sugiere la existencia de caos en las series de la hidrología de Colombia. Sin embargo, la precisión de los resul-

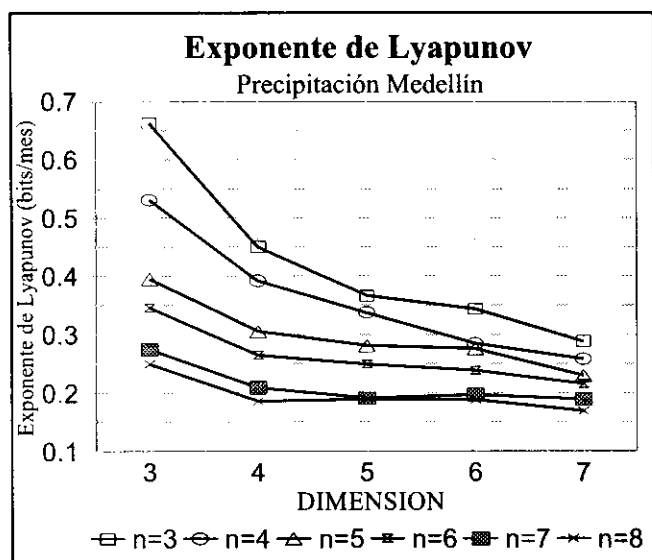


Figura 4. Estimación del mayor exponente de Lyapunov para la serie de precipitación mensual en Medellín

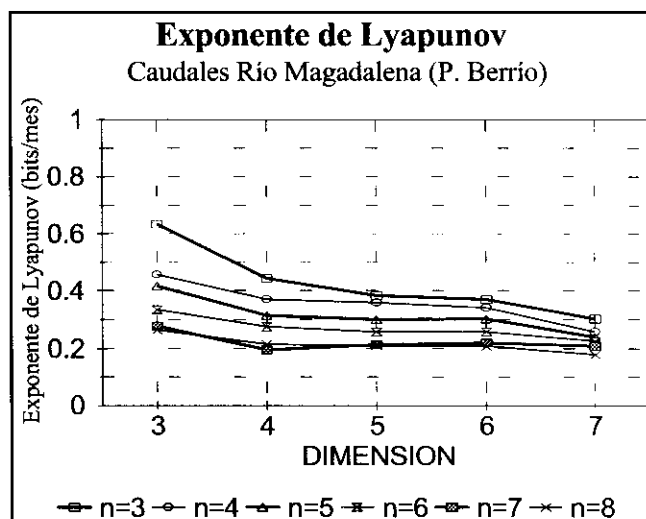


Figura 5. Estimadores del mayor exponente de Lyapunov para la serie estandarizada de caudales medios mensuales del río Magdalena (Puerto Berrío, Antioquia), para distintos valores de D y n

tados obtenidos está supeditada a la longitud de las series. Más adelante se discutirá este aspecto.

- En general, los valores de λ son más altos para la serie estandarizada que para la serie sin estandarizar. Las series estandarizadas son aquellas a las cuales se les ha Arestado“ el ciclo anual y por tanto mostrarían un atractor más complicado (más caótico) que el atractor de las series sin estandarizar. En estas últimas, el ciclo anual y semi-anual es muy fuerte y puede dominar el resto de la señal.
- Para el mismo valor de n , se observa una disminución del valor de λ a medida que D aumenta. Parecería presentarse una estabilización de λ con los valores más altos de D .
- En general, para un mismo valor de D , el valor de λ decrece en todas las series.
- Para $D=3$, la serie de precipitación de Bogotá presenta el más alto de los tres valores (ver por ejemplo, $n=3$ y $n=6$). En tanto que para $D=4$, 5 y 6, la serie de caudales del río Magdalena presenta los mayores valores. Para $D=7$, los valores del exponente de Lyapunov de la precipitación en Bogotá y de caudales del río Magdalena son casi indistinguibles y el menor valor lo presenta la serie de precipitación de Medellín.
- Para valores de D entre 3 y 6, el exponente de Lyapunov de la serie de Medellín ocupa un valor intermedio entre los de la precipitación en Bogotá y los caudales del río Magdalena.
- La magnitud de los exponentes de Lyapunov cuantifica la dinámica de los atractores en términos de información. Si $\lambda=0.1$ bits/mes y un punto inicial fuera

especificado con una precisión de una parte por millón (20 bits), después de 200 meses (20 bits/0.1 bits/mes) habremos perdido todo conocimiento del estado inicial del sistema. Por ello se dice laxamente que el inverso del exponente de Lyapunov λ^{-t} es el límite de predecibilidad del comportamiento de largo plazo del sistema (Rodríguez-Iturbe et al., 1989).

4.2 Dimensión de Hausdorff-Besikovitch

Los resultados de la estimación de la dimensión de Hausdorff-Besikovitch para las series hidrológicas de Colombia se muestran en la Tabla 4, en función de la dimensión, D , en que se embebe el atractor reconstruido artificialmente por el método de los rezagos en el tiempo.

4.3 Dimensión de escalamiento entre distancias en el atractor

Mediante el análisis de la función de escalamiento de las distancias entre parejas de puntos del atractor, $C(r)$ vs. r en espacio logarítmico, es posible examinar el comportamiento de la pendiente D_2 -la dimensión que aquí se ha llamado de escalamiento entre las distancias de parejas de puntos en el atractor- para distinguir si la serie temporal proviene de un proceso estocástico de infinitos grados de libertad, o determinístico de baja dimensionalidad o aún no estacionario. Para las series temporales bajo análisis se verificó el comportamiento del diagrama $C(r)$ vs. r , usando el algoritmo propuesto por Theiler (1987). En la Tabla 5 y Figuras 6, 7, 8 y 9 se presentan los resultados de la estimación de D_2 para diferentes valores de la dimensión D en que se reconstruye el atractor. Las letras N. D. (No Disponible) corresponden a una estimación de D_2 con un error de estimación del 100%.

Tabla 4. Estimación de la Dimensión de Hausdorff-Besikovitch para las series hidrológicas de Colombia. Registro Estandarizado (E), y sin estandarizar (No E).

SERIE	D=2	D=3	D=4	D=5
Bogotá (E)	1.829"0.331	2.075"0.375	2.807"0.507	3.288"0.594
Bogotá (No E)	1.730"0.313	2.337"0.430	3.051"0.551	3.598"0.65
Medellín (E)	1.637"0.374	2.161"0.494	2.492"0.57	2.468"0.565
Medellín (NoE)	1.792"0.41	1.947"0.446	2.609"0.597	3.000"0.686
Magdalena (E)	1.614"0.46	1.989"0.562	2.267"0.64	N.D.
Magdalena (NoE)	1.742"0.475	2.147"0.585	2.6"0.708	N.D.

Tabla 5. Estimación de la Dimensión de Escalamiento entre distancias, D_2 , para las series hidrológicas de Colombia. Las letras entre parentesis de la primera columna corresponden al Registro Estandarizado (E), y sin estandarizar (No E).

SERIE	D=2	D=3	D=4	D=5	D=6	D=7
Bogotá (E)	2.074 « 0.031	3.013 « 0.028	3.887 « 0.007	4.581 « 0.118	5.291" 0.11	N.D.
Bogotá (No E)	2.046 « 0.051	2.913 « 0.034	3.704 « 0.058	4.531 « 0.091	4.965 « 0.105	N.D.
Medellín (E)	2.075 « 0.024	3.025 « 0.039	3.924 « 0.032	4.731" 0.086	5.163 « 0.124	5.91"0.195
Medellín (NoE)	2.046 « 0.07	3.003 « 0.08	3.799 « 0.048	4.688 « 0.162	5.044 « 0.23	5.594 «0.23
Magdalena (E)	2.014 « 0.13	3.01 « 0.12	3.79 « 0.05	4.550 « 0.180	4.90 « 0.18	5.5 « 0.17
Magdalena(NoE)	2.03 « 0.07	3.00 « 0.118	3.651" 0.008	4.295 « 0.16	4.758 « 0.22	5.343 «0.23

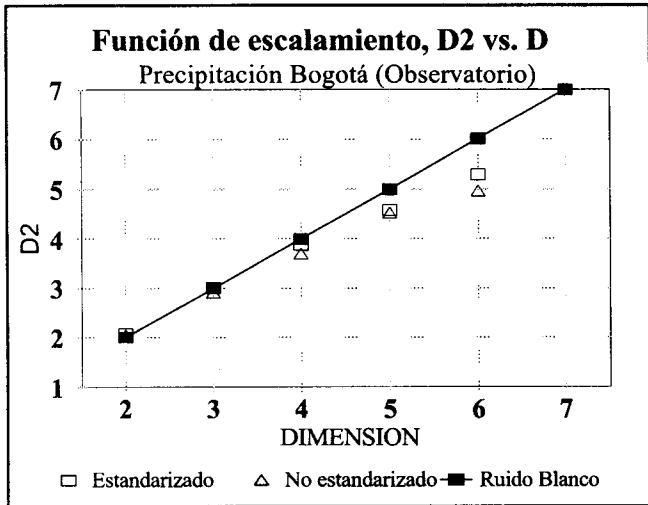


Figura 6. Variación del exponente de escalamiento D_2 en función de D . Para un ruido blanco la variación es lineal. Para la serie de precipitación mensual de Bogotá el crecimiento es más lento, aunque no muestra rasgos claros de convergencia o saturación.

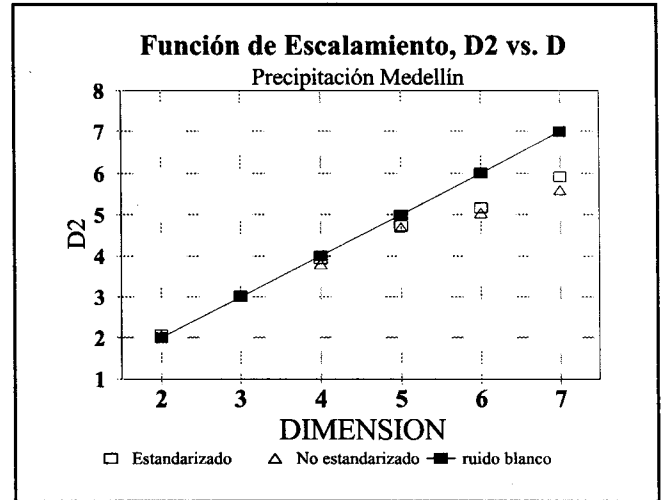


Figura 7. Variación del exponente de escalamiento D_2 en función de D . Para un ruido blanco el crecimiento D_2 es lineal con D . Para las series de Medellín el crecimiento es más lento, aunque no exhiben una convergencia definida.

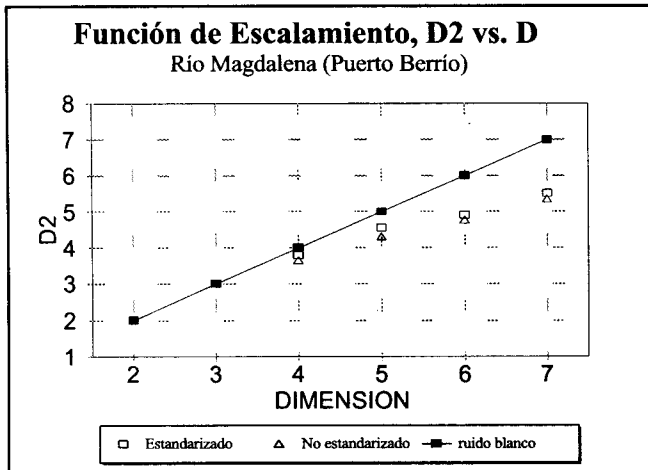


Figura 8. Variación del exponente D_2 en función de D para las series de caudales mensuales del río Magdalena (Puerto Berrío, Antioquia). Para un ruido blanco, D_2 crece linealmente con D . Aquí también se observa que el crecimiento es más lento para la serie de caudales que para un ruido blanco.

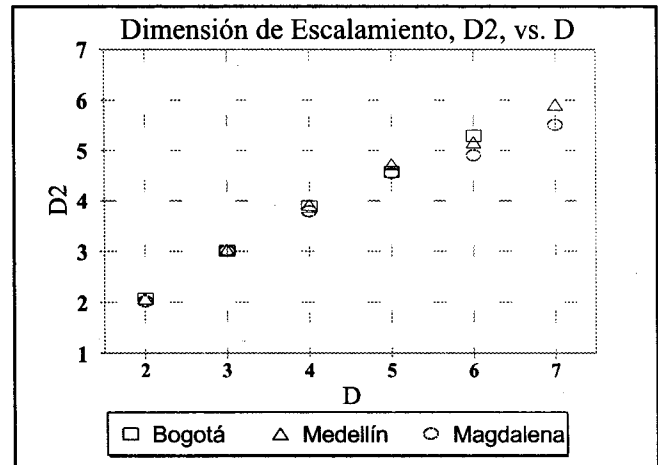


Figura 9. Variación del exponente de escalamiento D_2 en función de la dimensión D para las tres series estandarizadas de precipitación en Bogotá y Medellín y para los caudales medios del río Magdalena (Puerto Berrío, Antioquia)

A partir de los resultados de la estimación de la función de escalamiento entre pares de puntos, D_2 , en el atractor D -dimensional, es pertinente resaltar las siguientes conclusiones:

- Para las tres series hidrológicas estudiadas, el crecimiento de D_2 vs. D es más lento que el correspondiente a un ruido blanco (Figura 9). Es bien sabido que las series hidrológicas no corresponden a procesos de ruido blanco y su escala de fluctuación así lo confirma (ver *Betancur et al.*, 1993), más aún aquellas no estandarizadas. Las series estandarizadas tampoco presentan el diagrama de un ruido blanco. En estas últimas, aunque se ha removido el ciclo anual, todavía están presentes otros ciclos de gran escala que modulan la hidrología de Colombia, tales como el ciclo del ENSO (56 y 43 meses) y el ciclo de la Oscilación Cuasi-Bienal (26 meses), la oscilación de Madden-Julian (40-60 días) e inclusive hasta ciclos decadales de origen solar (Figura 2). Tales ciclos de gran escala temporal agregan persistencia de largo plazo a las series hidrológicas. A ello puede deberse el comportamiento observado en las figuras 6, 7, 8 y 9
- En ninguno de los diagramas de D_2 vs. D se observa una clara convergencia o saturación hacia un valor definido. En particular, es notable que no sea posible estimar el valor de D_2 para $D=7$ con la serie de Bogotá, a pesar de ser la serie de mayor longitud de las estudiadas aquí. La razón pudiera atribuirse a la clara tendencia decreciente que presenta esta serie (ver *Smith et al.*, 1996), pero este argumento juega más a favor de la convergencia, tal como se anotó para procesos no ergódicos (*Osborne y Provenzale*, 1989, *Cutler*, 1994).
- En la Figura 9 se presenta una comparación de los resultados de la estimación de D_2 para las tres series hidrológicas estandarizadas. El crecimiento más lento lo exhibe la serie de caudales del río Magdalena. Este resultado reafirma la evidencia hidrológica de una menor intermitencia y variabilidad (caos en una cierta manera) en las series de caudales mensuales que la existente en las series de precipitación mensuales. Por tanto no es extraño encontrar un valor mayor de la dimensión de Hausdorff-Besikovich o de la Dimensión D_2 (ver Tablas 4 y 5) para procesos de lluvia que para procesos de caudales mensuales, particularmente de una cuenca del tamaño de la del río Magdalena.

4. Conclusiones

Este trabajo explora con herramientas de sistemas dinámicos no lineales, sobre la posible presencia de caos de baja dimensionalidad en la hidrología de Colombia. En particular se ha estimado el Espectro de Potencias, que confirma la presencia de (cuasi) periodicidades asociadas a la interacción no lineal de diversos fenómenos macro-climáticos sobre la hidrología de Colombia. En particular es manifiesta la influencia del fenómeno ENSO y de la QBO, así como de las ondas de Madden-Julian. El ciclo perfecto de 11 años identificado para la precipitación en Medellín podría ser una evidencia de la influencia de las manchas solares, pero esta conclusión todavía necesita más exploración. También se estimaron el mayor exponente de Lyapunov y las dimensiones fractal y de escalamiento de distancias en el atractor. Los resultados obtenidos no permiten tener conclusiones definitivas, aunque se han estimado exponentes de Lyapunov positivos entre 0.15 y 0.75, lo cual parece indicar que hay divergencia exponencial de las trayectorias en el espacio de fases, un signo de caos. El período de predecibilidad de un fenómeno está dado como el inverso del mayor exponente de Lyapunov, por lo que se desprende un período entre 2 y 7 meses como el horizonte de predecibilidad de las series hidrológicas estudiadas. Los resultados de la estimación de la Dimensión Fractal no son concluyentes para decir inequívocamente si hay caos en las series estudiadas. En particular es interesante destacar que la serie de precipitación mensual en Bogotá, por tener una tendencia decreciente muy marcada, estadísticamente significativa (*Smith et al.*, 1996) presenta estimadores de D_2 para $D \geq 7$ con barras de error del 100%, lo que manifiesta la incertidumbre asociada. La teoría predice convergencia de D_2 para procesos no estacionarios (ver *Cutler*, 1994) y en nuestro caso, no se observa. Es necesario seguir investigando en otras series de gran longitud de variables de la hidro-climatología de Colombia, para confirmar la existencia de una componente caótica dominante.

La reconstrucción del atractores de un sistema dinámico utilizando únicamente una serie de tiempo mediante el método de los rezagos es un piedra fundamental en análisis de caos. Los requerimientos de datos representan otra restricción en la estimación de la dimensión D_2 . Varios investigadores han propuesto límites al número de datos que se requieren. Entre otros, *Ruelle* (1990) propone un tamaño de $10^{D_2/2}$, mientras que *Essex y Neremberg* (1991) sugieren que $2^{D_2} (D_2+1)$ puntos son suficientes para la reconstrucción del atractor. Las series hidrológicas de Colombia cuentan con una longitud de registros de 1524

para la precipitación en Bogotá, 948 para la precipitación en Medellín y 684 para los caudales del río Magdalena. Con el criterio de *Essex y Neremberg* (1991) se tienen los siguientes requerimientos:

D_2	3	4	5	6	7	8
Puntos requeridos en el atractor	32	80	196	448	1024	2304

De tal manera que si el valor de la dimensión del atractor fuera entre 6 y 7, la longitud de las series no sería una restricción para la estimación de D_2 en la hidrología de Colombia. De todas formas, el número de datos requeridos para determinar la dimensión de un atractor depende de la estructura del atractor, de su dimensionalidad y del intervalo de discretización del fenómeno. En trabajos separados, *Lorenz* (1991) y *Read* (1991) señalan que la longitud de las series de variables meteorológicas es muy corta para poder efectuar una estimación adecuada de las dimensiones de los atractores, dado el comportamiento altamente complejo del sistema climático que involucra muchos grados de libertad. Sin embargo, estudios de modelos y de la atmósfera misma demuestran que hay aspectos fundamentales de la dinámica atmosférica de gran escala (en espacio y tiempo) que parecen mostrar una cierta simplicidad que puede ser representada por pocos grados de libertad.

A escalas temporales menores la variabilidad se considera el ruido de las escalas mayores.

Los procesos caóticos exhiben una altísima sensibilidad a las condiciones iniciales. Sin embargo su carácter determinístico puede ser aprovechado para efectuar predicciones de corto plazo con muy buenos resultados. El conocimiento de las inestabilidades (o estabilidades) locales dentro del atractor puede ayudar a mejorar en mucho las predicciones. Entre los métodos de predicción en régimen de caos se destacan: MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines; *Lewis et al.*, 1994), método de los análogos (*Kostelich y Lathrop*, 1994), método de reconstrucción del atractor filtrado (*Sauer*, 1994), métodos de promediación de los vecinos próximos en el atractor (*Wayland et al.*, 1993), el método de funciones base radiales (*Casdagli*, 1989). Todas estas herramientas pueden ser usadas para la predicción de la hidrología de Colombia, teniendo en cuenta que la variabilidad natural del clima ocurre en todas las escalas de tiempo y que el grado de predecibilidad de los procesos está determina-

do por la misma escala temporal involucrada. Las variaciones diarias del tiempo pueden predecirse con buen suceso para algunos días, las variaciones estacionales pueden predecirse con una anticipación temporal del orden de estaciones, como también es posible obtener buenas predicciones de las variaciones anuales e interanuales con uno o más años de anticipación. La predicción del clima bajo escenarios de cambio global también muestran posibilidades de predicción aunque falta mucho por entender acerca del papel real que juegan las nubes en la dinámica energética de la tierra y de la retroalimentación de los procesos océano-atmósfera-tierra. En cualquier caso las interacciones no lineales y la posible existencia de caos deben jugar un papel fundamental en el terreno de la predicción climática e hidrológica.

Referencias

- Albano, A. M., A. Passamante, & M. E. Farrell.** 1991. Using higher-order correlations to define an embedding window, *Physica D*, 54, 85-97.
- Barnet, T. P.**, The interaction of multiple time scales in the tropical climate system", *J. Climate*, 4, 269-285.
- Betancur, C. M., L. F., Sánchez, & G., Poveda** 1993. Estimación de la escala de fluctuación en series de lluvias y caudales en Colombia, *Revista Atmosfera*, No. 20. 1993. Por:
- Casdagli, M.**, 1989. Nonlinear prediction of chaotic time series", *Physica D*, 35, 335-356.
- Chang, P., B. Wang, T. Li, & L., Ji.** Interactions between the seasonal cycle and ENSO-frequency entrainment and chaos in a coupled atmosphere-ocean model, *Geophys. Res. Lett.*, 21, No. 25, 2817-2820, 1994.
- Cutler, C. D.**, 1994. A theory of correlation dimension for stationary time series, *Phil. Trans. R. Soc. Lon. A*, 348, 343-355.
- Diaz, H. F., & V. Markgraf,** (eds.), 1993. *El Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press. 476 p.
- Enfield, D. B.**, 1989. El Niño, past and present, *Rev. Geophys.*, 27, 159-187.
- Essex, T. L., & Neremberg, M. A. H.**, 1991. Comment on Deterministic chaos: The science and the fiction by D. Ruelle, *Proc. R. Soc. Lon. A*, 435, 287-292.
- Essex, T. L., T. Lookman, & M. A., Neremberg,** 1987. The climate attractor over short time scales, *Nature*, 326, 64-66.
- Fraederich, K.**, 1986. Estimating the dimensions of weather and climate attractors, *Jour. Atmos. Sci.*, 43, 419-432.
- Glantz, M., R. Katz & N. Nicholls,** (eds.), 1991, *Teleconnections linking worldwide climate anomalies*. Cambridge University Press. 535 p.
- Grassberger, P.**, 1986. Do climatic attractors exist?, *Nature*, 323, 609-612.
- Hense,** 1987. On the possible existence of a strange attractor for the Southern Oscillation, *Beitr. Phys. Atmosph.*, 60, 34-47.

- Hentschel, H. G. E., & I. Procaccia.** 1983. The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors, *Physica D*, 8, 435-444.
- Jin, F.-F., J.D. Neelin, & M., Ghil.** 1994. El Niño on the Devil's Staircase: Annual subharmonic steps to chaos, *Science*, 264, 70-72.
- Kostelich, E. J. & D. P. Lathrop,** 1994. Time series prediction by using the method of analogues. En: *Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past* (Eds. A.S.Weigend y N. A. Gershenfeld), SFI Studies in the Science of Complexity, Proc. Vol. XV, Addison-Wesley, 283- 295.
- Landa, P.S., & V. I., Chetverikov.** 1988. On the evaluation of the maximum Lyapunov exponent from a single experimental time series, *Soviet Phys. Tech. Phys.* 33, 236-268.
- Lewis, P.A. W., B. K. Ray, & J.G., Stevens.** 1994. Modeling time series by using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS), En: *Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past* (Eds. A.S.Weigend y N. A. Gershenfeld), SFI Studies in the Science of Complexity, Proc. Vol. XV, Addison-Wesley, 297-318.
- Lorenz, E. N.,** 1963. Deterministic nonperiodic flow, *J. Atmos. Sci.* 20, 130-141.
- _____, 1991. Dimension of weather and climate attractors, *Nature*, 353, 241-244.
- Mandelbrot, B. B.,** 1982. *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman and Co., San Francisco.
- Mesa, O. J., G. Poveda & L. F. Carvajal.** 1997. *Una Introducción al Clima de Colombia*. Imprenta Universidad Nacional, Bogotá, 1997.
- Münnich, M., M. A., Cane, & S. E., Zebiak.** 1991. A study of the self-excited oscillations in a tropical ocean-atmosphere system. Part II: Nonlinear cases, *J. Atmos. Sci.*, 48, 1238-1248.
- Nicolis, C. & G. Nicolis.** 1984. Is there a climatic attractor?, *Nature*, 311, 529-532.
- _____, 1986. Reconstruction of the dynamics of the climatic system from time-series data, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 83, 536-540.
- Osborne, A. R., & A., Provenzale.** 1989. Finite correlation dimension for stochastic systems with power law spectra, *Physica D35*, 357-381.
- Philander, S. G.,** 1990. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*, Academic Press, San Diego, USA, 293 p.
- Pool, R.,** 1989. Is something strange about the weather?, *Science*. 243, 1290-1293.
- Porporato, A., & L., Rindolfi.** Nonlinear analysis of river flow time sequences, *Water Res. Res.*, 33, 1353-1367.
- Poveda, G.,** Funciones Ortogonales Empíricas en el análisis de la relación entre los caudales medios en Colombia y las temperaturas de los océanos Pacífico y Atlántico, *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 131-144, 1994.
- Poveda, G., & O., Mesa.** 1995. The Relationship between ENSO and the hydrology of tropical South America. The case of Colombia. *Proceedings of the Fifteenth Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, 227-236, Atherton, CA, USA, Hydrology Days Publications.
- _____, 1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale oceanic-atmospheric phenomena, *J. Climate*, Vol. 10.
- Poveda, G., & C., Puente.** 1993. Strange attractors in the atmospheric boundary layer turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol 64. No. 1-2, 175-197.
- Press, W. H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, & W. T. Vetterling.** 1986. *Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 818 p.
- Read, P. L.,** 1991. Applications of chaos to meteorology and climate, En: *Chaos and related non-linear phenomena*, Ed. T. Mullin, Oxford University Press.
- Rodríguez-Iturbe, I., B., Febres de Power, M. B., Sharifi, & K. P., Georgakakos.** 1989. Chaos in rainfall, *Water Res. Res.*, 25, 1667-1675.
- Ruelle, D.,** 1990. Deterministic chaos: The science and the fiction, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 427, 241-248.
- Sauer, T.,** 1994. Time series prediction by using delay coordinate embedding, En: *Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past* (Eds. A.S.Weigend y N. A. Gershenfeld), SFI Studies in Science of Complexity, Proc. Vol. XV, Addison-Wesley, 175-193.
- Sauer, T., & J. A., Yorke.** 1993. How many delay coordinates do you need?, *Inter. Jour. Bifurcation and Chaos*, 3, 737-743.
- Takens, F.,** 1981. Detecting strange attractors in turbulence. In: *Dynamical Systems and Turbulence*. Lecture Notes in Mathematics. No. 898, 366-381, Springer-Verlag.
- Theiler, J.,** 1987. Efficient algorithm for estimating the correlation dimension from a set of discrete points, *Phys. Rev. A*. 36. 4456-4462.
- Tsonis, A. A., & J. B. Elsner.** 1989. Chaos, strange attractors and weather, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 70, 14-23.
- Tziperman, E., L., Stone, M. Cane, & H., Jarosh,** El Niño chaos: overlapping of resonances between the seasonal cycle and the Pacific ocean-atmosphere oscillator, *Science*, 264, 72-74. 1994.
- Vallis, G. K.,** 1986. El Niño: chaotic dynamical system?, *Science*, 232, 243-245.
- _____, 1988. Conceptual models of El Niño and the Southern Oscillation, *Jour. Geo. Res.*, 93, 13 979-13 991.
- Wayland, R. D., Pickett, D. Bromley, & A., Passamante.** 1993. Measuring the predictability of noisy recurrent time series, *Int. Jour. Bifur. Chaos*, 3, 797-802.
- Wolf, A., J. B., Swift, Swinney, H., & J. A., Vastano.** 1985. Determining Lyapunov exponents from a time series, *Physica D*, 16, 286-317.
- Webster, P. J., & S., Yang.** 1992. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 118, 877-926.

CRECIMIENTO DE CUATRO ESPECIES DE LOS HUMEDALES FORESTALES DEL LITORAL PACIFICO COLOMBIANO

por

Jorge Ignacio del Valle - Arango¹

Resumen

Del Valle -Arango, J.I.: Crecimiento de cuatro especies de los humedales forestales del litoral Pacífico colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(81): 445-466, 1997. ISSN: 0370-3908.

Durante 12 años se estudió el crecimiento en diámetro de *Otoba gracilipes* (Cuángare), *Eugenia* spp. (guayabillo), *Swartzia amplifolia* var. *rigida* (cuña) y *Pithecellobium latifolium* (pinde) en asociaciones de “guandal” y “cuangarial” en el delta del río Patía. Para estas especies disetáneas del sotobosque, el subdosel y el dosel, y mediante métodos estadísticos se establecieron modelos de las tasas de crecimiento según el modelo de von Bertalanffy en cuatro formas. Se obtuvieron ecuaciones de crecimiento diamétrico para cuatro variables, las cuales se discuten críticamente.

Palabras claves: Modelos de crecimiento, humedales forestales *Otoba gracilipes*, *Swartzia amplifolia*, *Pithecellobium latifolium*, costa pacífica, modelo de von Bertalanffy. Colombia. Bosques tropicales.

Abstract

During 12 years, growth in diameter of *Otoba gracilipes* (Cuángare), *Eugenia* spp. (Guayabillo), *Swartzia amplifolia* var. *rigida* (Cuña) and *Pithecellobium latifolium* (Pinde) was studied in “guandal” and “cuangarial” associations in the delta of the Patía river. For these species of the understory, the subcanopy and the canopy, models of growth were established using von Bertalanffy’s model in four forms. Equations of growth in diameter were obtained for four variables, which are discussed critically.

Key words: Growth models, Pacific coast, swamp forest, Colombia, von Bertalanffy’s model.

¹ Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Apartado Aéreo 1779, Medellín. E mail: jidvalle@perseus.unalmed.edu.co

Introducción

El estudio y modelación del crecimiento de los árboles tropicales es un tema de gran importancia en varios campos de las ciencias biológicas, en especial, en la demografía, la teoría sucesional y la silvicultura. La ausencia de anillos de crecimiento en muchas especies, o sus irregularidades en otras, han conducido a un precario desarrollo de la epidimetría en especies naturales del trópico húmedo. Esta investigación intenta hacer un aporte a los métodos de la epidimetría y, en especial, al estudio del crecimiento de tres especies nativas de los humedales forestales turbosos del Pacífico Sur colombiano, localmente conocidos como bosques de *guandal*; son ellas: cuángare (*Otoba gracipiles* (Smith) Gentry: Myristicaceae), cuña (*Swartzia amplifolia* var *rigida* Cowan: Fabaceae), pinde (*Pithecellobium latifolium* (L.) Benth.: Mimosaceae) y de tres morfoespecies aun indeterminadas conocidas con el nombre de guayabillo (*Eugenia* spp.: Myrtaceae).

El problema

Gran parte de los estudios del crecimiento diamétrico de los árboles tropicales que no forman anillos anuales de crecimiento se han basado en el seguimiento del diámetro normal o a "la altura del pecho" (D) de numerosos árboles cuyos diámetros se marcan y miden en el mismo lugar durante varios años. Por lo regular, se establecen clases diamétricas de amplitudes relativamente arbitrarias, pudiendo ser mayores las de las especies de mayor tamaño. Luego se saca el promedio del crecimiento anual de los árboles ubicados en dicha clase al inicio del experimento. A partir de este punto se puede, bien estimar, o trazar una curva del diámetro en función del tiempo t (edad). Para ello se divide la amplitud de la primera clase diamétrica entre su crecimiento promedio, obteniendo su "tiempo de paso"; esto es, los años requeridos para que el "árbol promedio" atraviese la clase diamétrica menor; a esta se le suman los sucesivos "tiempos de paso" de las siguientes clases diamétricas. De esta manera se van obteniendo los años acumulados para alcanzar los sucesivos límites superiores de cada clase diamétrica. Con base en estos puntos se puede trazar una curva a través de los puntos del diámetro en función del tiempo. A veces se armoniza una curva entre los crecimientos medios por clase diamétrica *versus* las marcas de cada clase, ya sea a "mano alzada" o mediante modelos matemáticos apropiados (Foggie, 1945; Miller, 1952; Keay, 1961; Prince, 1971; Bell, 1971; Misra, 1974; Dance y Malleux, 1976; del Valle, 1979, 1985; Rai, 1980; Enright y Hartshorn, 1981; Luna, 1981), entre otros. Pocos han

empleado modelos compatibles de derivación-integración mediante los cuales se ajustan ecuaciones de la tasa de crecimiento diamétrica en función del diámetro ($dD/dt = f(D)$) los cuales, al integrarlos, producen una función $D = f(t)$ (del Valle, 1986; Vásquez, 1988; Chauchard, 1993; González, 1994); para ello se ha empleado la ecuación diferencial de crecimiento de von Bertalanffy (1976), también llamada de Richards y Chapman (Richards, 1959; Chapman, 1961). Hasta ahora pocos han registrado la varianza del crecimiento diamétrico o del área basal (Manokaran y Swaine, 1994; Alder, 1995; Contreras *et al.*, 1996), aunque sin consecuencias en el resultado final. Excepcionalmente (del Valle, 1996a) se han empleado los valores individuales del crecimiento diamétrico de cada uno de los árboles de la muestra, aunque Alder (1995) si lo hizo con los incrementos en el área basal. Autores como Lieberman y Lieberman (1987) han optado por una aproximación no determinística sino estocástica y proponen un método que permite determinar la trayectoria mínima, máxima y mediana del diámetro en función del tiempo. Esta es una aproximación interesante pero tiene el inconveniente de que las tres curvas se juntan en el diámetro máximo presente en la muestra, no permitiendo estimar la edad de árboles de la misma especie pero de dimensiones mayores de los muestreados, aunque crezcan en el mismo bosque.

Las aproximaciones determinísticas descritas son deficientes cuando se trata de determinar la curva de crecimiento de los árboles de grandes dimensiones de una especie, empleando el crecimiento promedio de todos los brinzales, latizales y fustales contenidos en la muestra por cuanto la mortalidad natural tiende a ser mayor en los árboles pequeños con menores tasas de crecimiento. En relación con este asunto Manokaran y Swaine afirman, basándose en experimentos de muy largo plazo (1949-85, 1947-85) realizados en las selvas malayas, lo siguiente: "Tanto en las parcelas de Bukit Lagong como de Sungei Menyala, la mortalidad fue significativamente mayor que el promedio en los árboles con incremento diamétrico negativo o que casi no crecieron y significativamente menor en los árboles de más rápido crecimiento" (Manokaran y Swaine, 1994 pág. 61). Las tasas de crecimiento bajas y aun negativas aportadas por los individuos que mueren en estadios juveniles afectan las curvas del $D = f(t)$ tendiendo a aumentar las edades requeridas para que los árboles alcancen un determinado diámetro. Si tal planteamiento es correcto, tendría sentido proponer que al construir la curva de crecimiento diamétrico de los árboles de grandes dimensiones, con base en la información de crecimiento aportada por ár-

boles de la misma especie, desde brinzales hasta los árboles más grandes disponibles en la muestra, sólo deben tenerse en cuenta los ejemplares de crecimiento más rápido. Esta hipótesis no es nueva; ya había sido planteada por **Nicholson** en 1965 según cita tomada de **Enright** y **Hartshorn** (1981); pero surge la pregunta "cuáles son los árboles de mayor crecimiento? Según **Whitmore** (1975) **Nicholson** empleó para estimar la edad de los árboles más grandes de Sepilok, Sabah, sólo el árbol de más rápido crecimiento en cada clase diamétrica de 9,55 cm de amplitud con el fin de determinar la "edad mínima" requerida para alcanzar su diámetro máximo. La "edad promedio" la determinó empleando todos los árboles de cada clase diamétrica. Tal respuesta motiva entonces otros interrogantes como estos: "por qué sólo un individuo? "no habrá un procedimiento más adecuado? "qué verificación o validación da fuerza a tal procedimiento? En particular, la validación es una de las mayores falencias en este tipo de estudios (**Alder**, 1995). Aquí se pretende abordar este tema empleando algunas especies de árboles que crecen en humedales forestales turbosos del delta del río Patía en Colombia.

Se conoce muy poco acerca del crecimiento de los árboles esciófitos cuyos individuos rara vez o nunca alcanzan el dosel y, por tanto, casi toda su vida transcurre en condiciones de penumbra. Ello se debe, muy probablemente, al poco interés que para la economía maderera tienen estas especies de tamaño pequeño, maderas densas, bajas tasas de crecimiento y, por lo regular, poco abundantes. En efecto, la gran mayoría de los estudios publicados se han concentrado en las llamadas especies comerciales de elevado valor económico y características contrastantes con el grupo antes mencionado; no obstante, las bajas tasas de crecimiento registradas para las especies del sotobosque y del subdosel, sugieren que algunos de sus ejemplares pueden ser tan o más viejos que los de especies emergentes; tal hipótesis se intentará verificar en esta investigación.

Materiales y métodos

Area de estudio

La información procede de los bosques de *guandal* del delta del río Patía en el Pacífico Sur colombiano. Aquí existen unas 125.000 ha de estos humedales forestales turbosos (Figura 1), en las llanuras de inundación localizadas entre los ríos del delta y la llanura mareal habitada por manglares (**del Valle**, 1996b). El clima ecuatorial con alta nubosidad durante gran parte del año sólo per-

mite 3,6 horas diarias en promedio de brillo solar; la temperatura promedio anual es de 26°C con muy pocas variaciones mensuales. La precipitación en los sitios de registro, según las isoyetas, varía de 3.500 a 4.000 mm anuales; la humedad relativa promedio es 89% (**del Valle**, 1994).

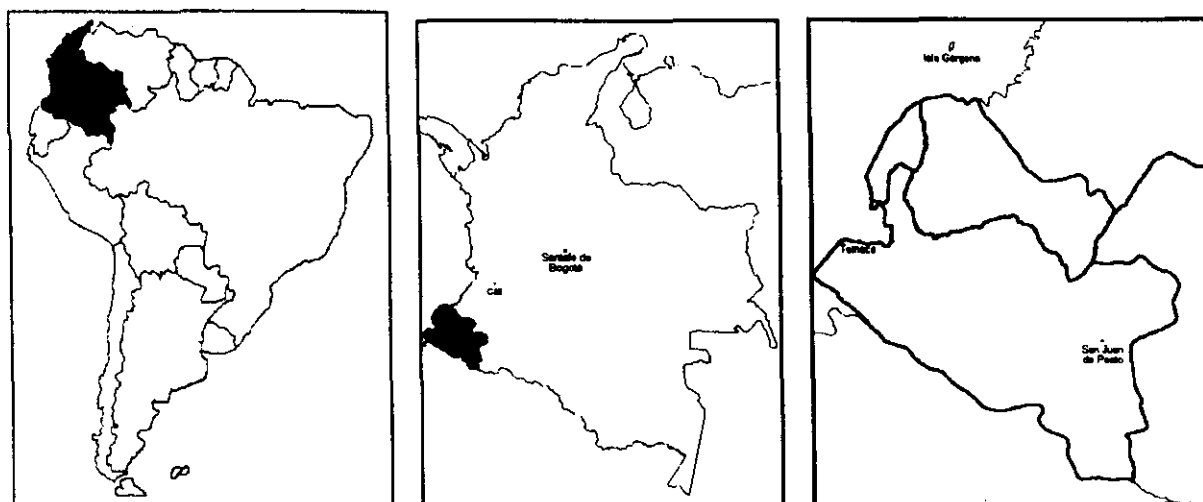
Los suelos, son histosoles formados por capas alternas de turba y sedimentos; se clasifican dentro del suborden Tropofibríst y se encuentran permanentemente saturados de agua dulce producto de las lluvias y, por tanto, oligotróficas; estas aguas son de color marrón rojizo oscuro, negras en apariencia, por su alto contenido de sustancias orgánicas; sus pHs entre 3,7 y 4,5 son extremadamente ácidos (**del Valle**, 1996b).

Parcelas permanentes

La información acerca del crecimiento de las especies procede de 12 parcelas permanentes cuyos diámetros normales (D); esto es, medidos a 1,30 m sobre el suelo, se midieron cada uno o dos años entre 1984 y 1996 (Tabla 1); el área total de las parcelas suma 8,0 ha. En los árboles con D ³ 10 cm se pintó una marca perimetral de color amarillo con pintura de alta calidad resistente a la intemperie, en lo posible de sólo un centímetro de ancho. Sobre esta misma franja se ha colocado la cinta diamétrica metálica (0,5 mm de precisión), en todas las mediciones. Los árboles con D ³ 10 cm de la parcela "El Esteron 4" se midieron con Microdendrómetro Sueco y precisión de 0,01 mm. Los árboles se numeraron consecutivamente tanto con pintura como con etiqueta de aluminio cuando su tamaño lo permitió; en los más pequeños sólo se empleó la etiqueta. Los árboles cuyas dimensiones se encuentran entre 1 y 10 cm se midieron con calibrador digital. (precisión de 0,01 mm); en éstos sólo se marcaron cruces en los puntos de apoyo iniciales del calibrador; sobre estos mismos puntos se efectuaron las mediciones todos los años. El diámetro mínimo de medición sobre todos los árboles de las parcelas fue de 10 cm en unas parcelas y de 5 cm en otras. Los árboles de tamaño menor se midieron en subparcelas contenidas dentro de algunas de las parcelas.

Selección de las especies

Se seleccionó la especie cuángare (*Otoba gracilipes* (Smith) Gentry: Myristicaceae) que, aunque es esciófita en su edad juvenil, como lo demostró **Moreno** (1996), emerge sobre el dosel y alcanza alturas hasta de 40 m y diámetros normales de 100 cm. También se seleccionaron cuatro especies o grupos de especies afines esciófitas



SURAMERICA

COLOMBIA

NARIÑO

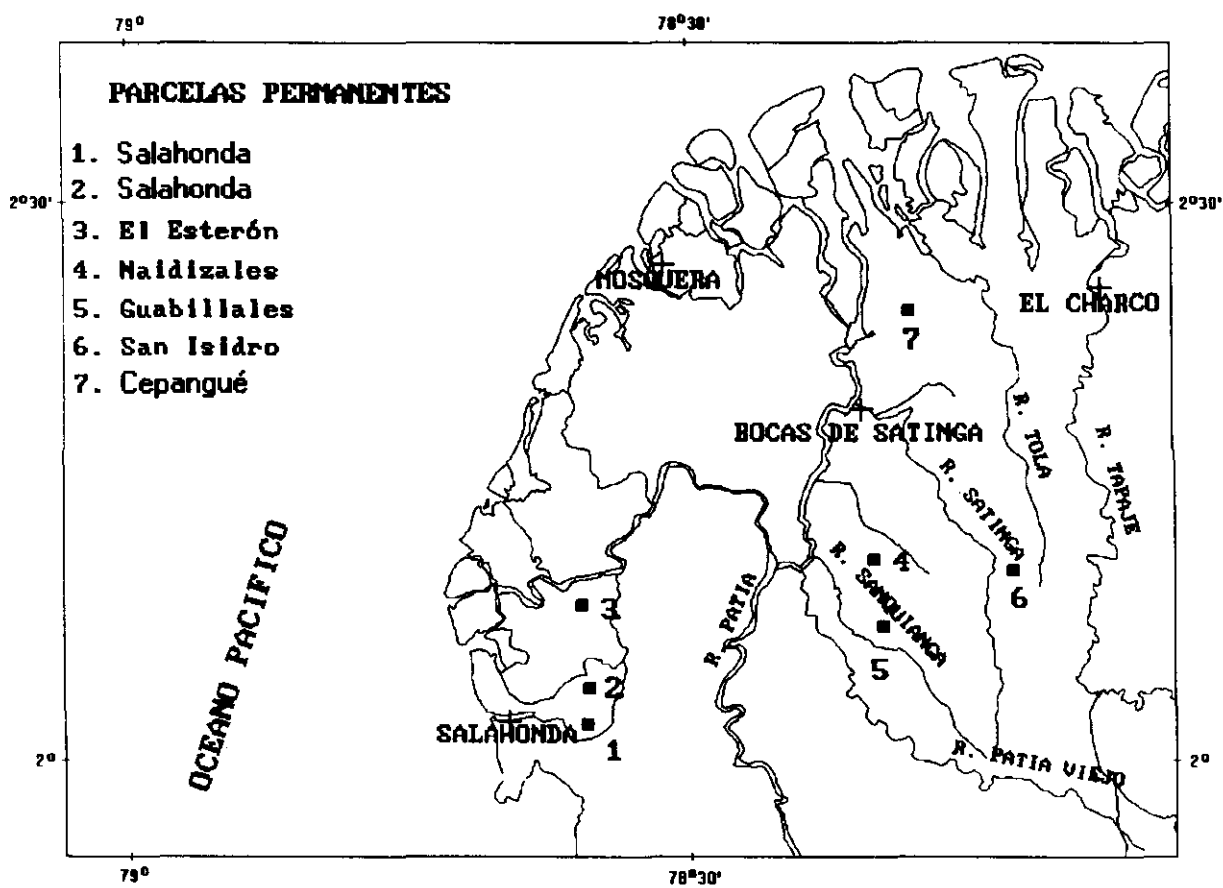


Figura 1: Area de estudio y localización de las parcelas permanentes.

cuyo tamaño casi nunca les permite llegar al dosel. Estas son: pinde (*Pithecellobium latifolium* (L.) Benth.: Mimosaceae), tres morfoespecies denominadas localmente guayabillo (*Eugenia* spp.: Myrtaceae) y cuña (*Swartzia amplifolia* var. *rigida* Cowan: Fabaceae). Pinde es una especie arbórea típica del sotobosque que rara vez sobrepasa los 15 cm de diámetro normal y excepcionalmente supera los 20 cm y 10 m de altura. Cuña rara vez sobrepasa los 25 cm de diámetro normal y excepcionalmente llega a los 35 cm y 15 m de altura. El complejo de tres morfoespecies denominado guabillo, comprende árboles cuya talla máxima es de 45 cm de diámetro y 25 m de altura; eventualmente estas especies pueden alcanzar el dosel, que en estos bosques se encuentra entre los 25 y 30 m de altura. Por sus tallas máximas se considera al pinde como especie del sotobosque, en tanto que a cuña y guayabillo del subdosel.

Cuángare es una especie de crecimiento relativamente rápido (del Valle, 1995) y muy abundante en estos bosques, al punto que en las asociaciones denominadas *guan dal* mixto y *cuangarial* tiende a ocupar el primero o segundo lugar en cuanto a su índice de valor de importancia (del Valle, 1996b), es una especie de madera sua-

ve (densidad \pm desviación estandar, $r = 0,308 \pm 0,050$; $n = 30$ árboles muestreados en el corazón a 1,30 m sobre el suelo) intensamente explotada para emplearla en la industria de la construcción. Su estructura diamétrica en J invertida da cuenta de su carácter disetáneo (Figura 2). Su arquitectura monopódica muestra un fuerte control epinástico, característica que sólo tiende a perderse en algunos ejemplares emergentes. Estas fueron las razones para seleccionar la especie. Pinde, guayabillo y cuña, aunque más escasas que el cuángare, se escogieron por cuanto se encuentran entre las especies más abundantes e importantes entre las dicotiledóneas del sotobosque y del subdosel; pero además, parecen ser muy ubicuas. Las tres especies tienen maderas relativamente densas (Pinde: $r = 0,608 \pm 0,038$; $n = 12$; Cuña: $r = 0,598 \pm 0,047$; $n = 10$. Guayabillo: $r = 0,668 \pm 0,046$; $n = 10$.) sus estructuras poblacionales tienden a ser disetáneas (Figura 2), crecen lentamente y revelan menor control epinástico predominando en ellas, por tanto, arquitecturas simpódicas.

Modelo de crecimiento

Se parte de la teoría del crecimiento expuesta por Ludwig von Bertalanffy en 1941 (Richards, 1959;

Tabla 1. Parcelas permanentes empleadas para el estudio

Parcela	Area m ²	Períodos de crecimiento años	Número de árboles							
			inicial ⁴				final ⁴			
El Esteron 1	7.740 ¹	1984/85-85/88-88/90-90/94-94/96	105	21	4	4	133	27	7	3
El Esteron 2	6.160 ¹	1984/85-85/88-88/90-90/92-92/95	132	27	0	0	196	20	0	0
El Esteron 3	5.000 ¹	1995/96	66	3	0	0	66	3	0	0
Salahonda 1	9.320 ¹	1988/90-90/92-92/95	195	39	3	8	93	24	0	0
Salahonda 2	4.200 ¹	1988/90-90/92-92/95	70	33	8	3	27	13	1	1
Cepangué 3	5.000 ²	1991/93-93/95	23	3	7	0	24	3	5	0
Cepangué 4	5.000 ²	1991/93-93/95	14	1	5	0	13	3	1	0
Naidizales 1	10.000 ¹	1990/92-92/94	87	6	0	0	102	16	1	0
Naidizales 2	5.000 ¹	1990/92-92/94	21	2	0	0	20	0	1	0
Naidizales 3	2.500 ³	1990/92-92/95	46	20	85	59	40	15	75	45
Guabillales	5.000 ²	1993/95	162	7	7	11	162	7	7	11
San Isidro	10.000 ¹	1993/95	51	0	8	0	51	0	7	0
Total	74.920		972	172	127	85	927	131	105	60

¹ D \geq 10 cm en toda la parcela; 1 cm \leq D < 10 cm en sub parcelas.

² D \geq 5 cm.

³ 1cm \leq D \leq 10 cm.

⁴ Cuángares, cuñas, guayabillos y pindes, respectivamente.

Chapman, 1961), e incluida en su libro años más tarde (von Bertalanffy, 1976). Para von Bertalanffy el crecimiento surge de la oposición entre el anabolismo y el catabolismo (Fotosíntesis y respiración en los vegetales, respectivamente); o sea, los árboles crecen cuando la fotosíntesis supera la respiración. Estas dos variables se expresan como funciones alométricas simples

$$dD/dt = h(D)^m - g(D) \quad m < 1, \quad (1)$$

donde: dD/dt = tasa de crecimiento diamétrico, cm año⁻¹,

D = diámetro normal, cm,

h = constante de proporcionalidad anabólica,

g = constante de proporcionalidad catabólica,

m = constante alométrica del anabolismo.

González (1994) propone la siguiente expresión

$$dD/dt = g'(D) - h'(D)^m \quad m > 1, \quad (2)$$

con $g' = -g$, y $h' = -h$.

La variable tiempo o edad (t) resulta de la integración de las ecuaciones (1) y (2). En $m = 1$ existe una indefinición matemática denominada "muro de Gompertz" (Osumi e Ishikawa, 1983); ello se subsana haciendo m muy próxima a la unidad por exceso o defecto. Si se establece la condición inicial: $D = D_0$ cuando $t = t_0$, entonces

$$D = A (1 - be^{-k(t-t_0)})^{1/(1-m)} \quad (3)$$

donde: $A = (h/g)^{1/(1-m)}$, asíntota del diámetro, cm,

$$k = (1-m)g,$$

$$b = 1 - (D_0/A)^{(1-m)},$$

$t - t_0$ es la edad (años) asociada con cada diámetro (D),

D_0 = diámetro inicial en t_0 , cm.

La forma de la curva depende del valor de m : si $m > 1$ la curva es sigmoideal, tipo logístico; en $m = 2$ se llama logística. Si $m < 1$ se llama tipo Mitscherlich y tiende a ser cóncava hacia abajo; en $m = 0$ se llama de Mitscherlich (Osumi e Ishikawa, 1983).

Con frecuencia sucede que en la muestra no se encuentran representados árboles de las mayores dimensiones de cada especie. Esta es la situación en los bosques de *guandal* del presente estudio por cuanto han sido intervenidos intensamente para la extracción maderera du-

rante las últimas cinco décadas (del Valle, 1993). Cuando esto sucede, la determinación de la asíntota basada en los estimadores de h , g y m , obtenidos mediante regresión de los modelos (1) y (2), empleando árboles muy pequeños en comparación con el máximo local de la especie, puede producir grandes sub o sobreestimaciones. En estas situaciones del Valle (1986) propone el siguiente procedimiento. En el mismo bosque se localizan y miden los árboles de mayor diámetro y que, de acuerdo con los habitantes locales, correspondan al máximo tamaño para la especie en el sitio; también es posible encontrar esta información en los registros de inventarios confiables realizados en el mismo bosque. Estimada la asíntota se procede así:

si $A = (h/g)^{1/(1-m)}$, entonces $g = h(A^{m-1})$; luego

$$dD/dt = h(D^m - A^{(m-1)} D), \quad (4)$$

donde: A = diámetro del árbol de mayor tamaño conocido en el bosque, el cual se asume como asíntota.

Con base en datos de inventarios y otras observaciones llevadas a cabo en los bosques de *guandal*, se obtuvieron las siguientes asíntotas para el diámetro normal: cuángare 100 cm, guayabillo 45 cm, cuña 35 cm, pinde 21 cm. Reemplazando estos valores en el modelo (4) se estiman h y m por mínimos cuadrados mediante regresión no lineal.

Algunas parcelas se han medido durante 12,5 años (El Esterón 1) en tanto que otras sólo durante año y medio a tres años (Guabillales, San Isidro, El Esterón 3); para hacer más comparable la información de crecimiento se ha fraccionado el aporte de los árboles de cada parcela entre un mínimo de 1,2 años y un máximo de cuatro años (Tabla 1). De esta manera cada árbol de las especies seleccionadas presente en la parcela El Esterón 1, por ejemplo, y que sobrevivió los 12,5 años, aportó cinco registros independientes: 1884/85, 85/88, 88/90, 90/94, 94/96. Tal fraccionamiento, además de homogenizar el aporte de las diferentes parcelas, está más de acuerdo con el cálculo diferencial que requiere que los Dd y Dt sean pequeños como para poder asumir las tasas de crecimiento anual diamétricas como dD/dt .

Con base en el método descrito se calculan las curvas de crecimiento de las cuatro especies en estas cuatro formas: 1. Con los registros individuales aportados por todos los árboles; 2. Con todos los registros de los árboles individuales a partir de la clase diamétrica de 30 cm en que los árboles superan el dosel (cuángare), o se pueden considerar "adultos" para las demás especies: 12 cm para

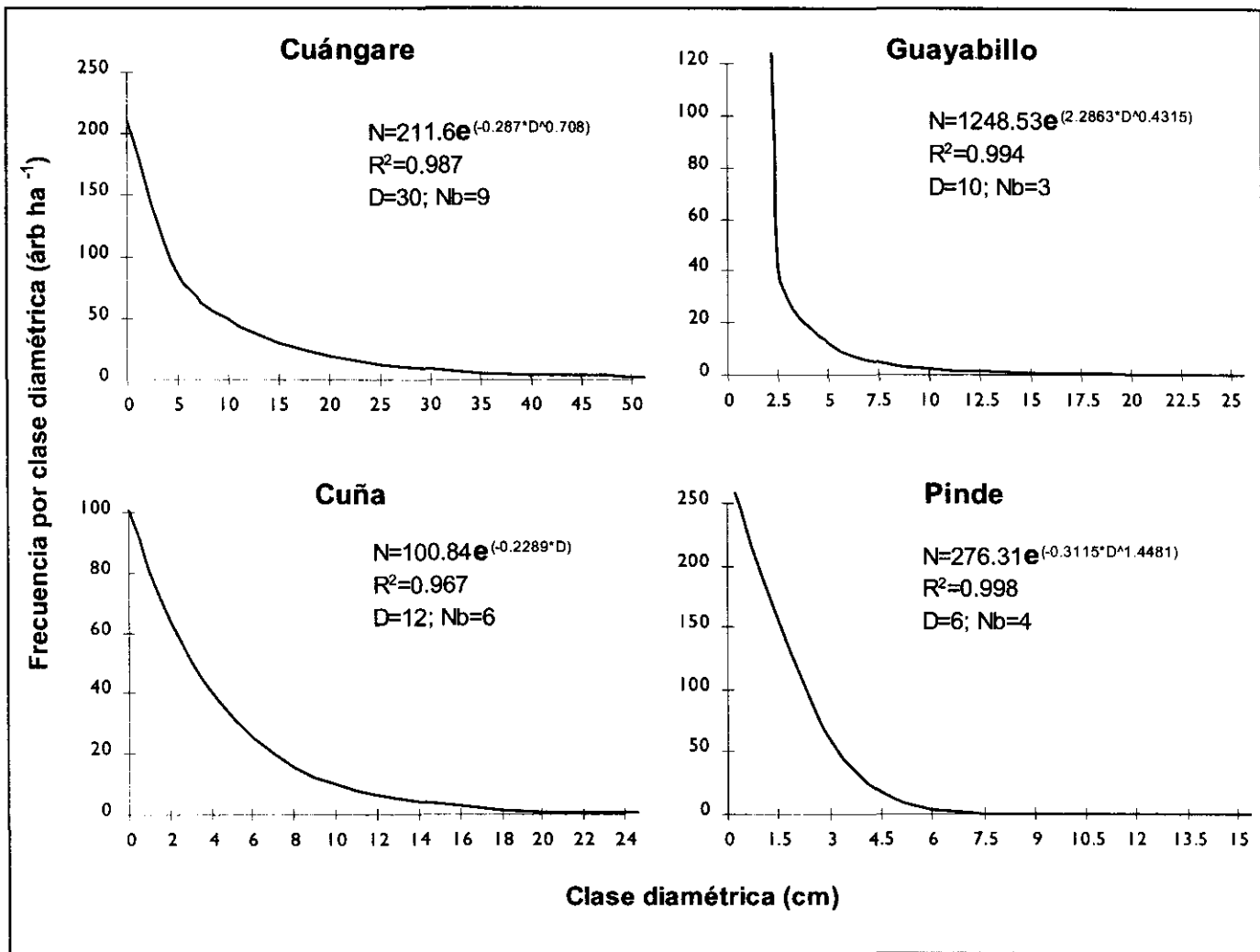


Figura 2. Estructura diamétrica de las cuatro especies; en cada una se señala el diámetro tope (D) y el número de árboles (Nb) tomados como base para calcular las curvas de mayor crecimiento. Para cuángare aportaron todas las parcelas de la tabla 1 excepto Naidizales 2, Naidizales 3 y El Esterón 3. Para guayabillo aportaron Naidizales 3, Cepangué 3 y 4 y San Isidro. Para cuña aportaron Naidizales 3, El Esterón 1 y 2 y Salahonda 1 y 2. Para pinde aportaron Naidizales 3, Salahonda y Guabillales.

cuña, 6 cm para pinde y 10 cm para guayabillo. Mediante las ecuaciones de las estructuras diamétricas contenidas en la Figura 2, se determinó el número de árboles por hectárea para éstos diámetros resultando para las cuatro especies 9, 3, 6 y 4 árboles ha^{-1} , respectivamente. Para las clases diamétricas inferiores a los límites previamente definidos, sólo se tuvo en cuenta la proporción correspondiente de los registros seleccionándolos por su mayor crecimiento. Así, por ejemplo, para la clase 30 cm cuángare, arrojó en una hectárea 9 árboles; para la clase

25-30 cm se tendrían en cuenta, entonces, sólo los 9 árboles; ha^{-1} de mayor crecimiento y no los de 11 restantes de la estructura diamétrica (Figura 1); pero como en esta clase hay 256 registros de crecimiento, este número equivalió a 209 registros seleccionados entre los de mayor crecimiento. De igual manera se procedió con todas las clases menores al límite establecido y para todas las especies. Este procedimiento se denominará en lo sucesivo árboles de mayor crecimiento; **3**. Con los promedios por clase diamétrica de todos los árboles ponderados por el número

de registros que aportan a cada promedio; 4. Con los promedios más la desviación estándar por clase diamétrica.

Validación

Se propone llevar a cabo una validación del método con base en las cuatro especies incluidas. Para ello se determinó la edad con C^{14} a muestras de madera extraídas del centro anatómico de secciones transversales en torno de 1,30 m sobre el suelo, o cuando el diámetro se normalizó si había contrafuertes en la base. Las muestras fueron cilindros torneados de 1,2 a 2,0 cm de diámetro y de 25 a 35 cm de longitud, cuyos pesos secos a 100 ± 1 °C oscilaron entre 30 y 90 gr. Este procedimiento permite determinar la edad de árboles cuya madera más antigua contenida en la sección se formó antes de 1950; esto es, la edad antes del presente (año de 1950). Cuando la madera se formó después de este año se empleó el llamado "efecto de las bombas" producido por las explosiones nucleares superficiales efectuadas en las décadas de los cincuenta y los sesenta (404 en esta última década según **Worbes** y **Junk** (1989). Estas explosiones aumentaron el contenido de C^{14} en la atmósfera alcanzando su máximo en el hemisferio norte entre 1963 y 1965 (**Stuiver et al.**, 1981; **Worbes**, 1995; **Worbes** y **Junk**, 1989). A partir de este punto nuevamente el contenido de C^{14} declinó. Entonces, determinando en una muestra extraída del centro del árbol su concentración de C^{14} (% moderno) y comparándola con los contenidos publicados para la evolución de estas variables en la atmósfera a partir de 1950, se determina la fecha de formación de esa madera y, por tanto, la edad del árbol debido a que la madera contiene C^{14} en igual proporción que el contenido de este isótopo en la atmósfera en el momento de su formación. Ahora bien, a una determinada concentración de C^{14} (% moderno) en la madera formada después de 1950, le pueden corresponder dos fechas diferentes por cuanto puede intersectar en dos puntos la curva del C^{14} atmosférico (Figura 3). Esta duda se resolvió determinando la concentración de C^{14} (% moderno) de una segunda muestra paralela al cilindro central de cada sección, pero situada unos 1,5 a 2,0 cm del centro. Ello permite dilucidar cual es la edad correcta en las edades posteriores a 1950. Pero, también, son una importante ayuda en muestras cuya madera se formó antes de ésta fecha. El pico de C^{14} (% moderno) es mayor en las altas latitudes que en el trópico y mayor en el hemisferio norte que en el sur (**Worbes** y **Junk**, 1989; **Stuiver et al.**, 1981); no obstante, como lo revelan las curvas de **Stuiver et al.** (1981), estas se juntan a partir de 1970. Para la datación se empleó la misma curva utilizada por **Worbes** y compañeros, tanto

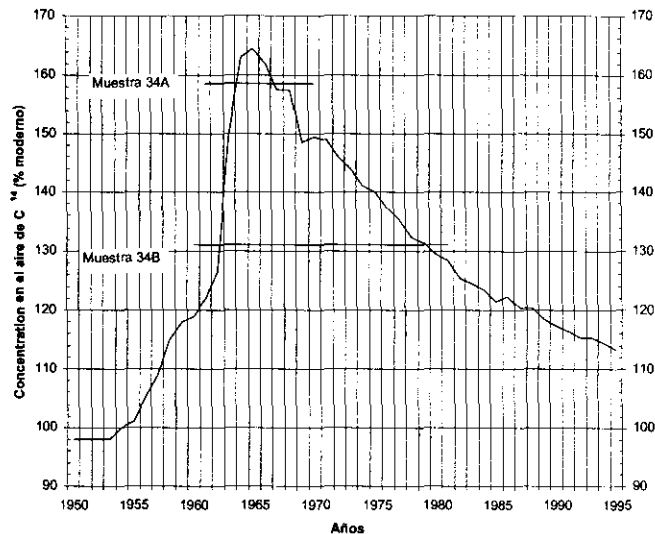


Figura 3. Niveles de radiocarbón en el aire del trópico de acuerdo con **Worbes** (1995) y **Worbes & Junk** (1989) hasta 1980; a partir de esta fecha se han empleado los datos gráficos de **Fruholmen**, Noruega, pero con el ritmo anual sugerido por los datos tabulares de **Smilde**, Holanda, (datos publicados por **Meijer et al.**, 1995). La muestra del centro del árbol 34 (34A) pudo haberse formado en 1964 o en 1967. La muestra lateral indica también dos fechas de formación posible: 1962 y 1978. Dado que esta muestra es más joven, se concluye que la fecha correcta de la muestra 34 A es 1967. El árbol tiene 29 años (1996-1967).

para el trópico sur en la Amazonia cerca de Manaus (**Worbes et al.**, 1992; **Worbes** y **Junk**, 1989) como en el trópico norte en las sabanas de Venezuela y en Costa Rica (**Worbes**, 1995; **Worbes** y **Junk**, 1989) la cual se extiende hasta 1980. A partir de este año y hasta 1994 se completó la curva con los datos gráficos de DC^{14} (‰) correspondientes a **Fruholmen**, Noruega, la cual presenta continuidad con la anterior, pero correlacionándola con los datos tabulares de **Smilde**, Holanda, para conservar las variaciones anuales según información publicada por **Meijer et al.** (1995). DC^{14} (‰) se transformó en C^{14} (% moderno) mediante la ecuación

$$C^{14} (\% \text{ moderno}) = (DC^{14} \text{‰}/10) + 100;$$

el resultado se aprecia en la Figura 3. Los análisis de C^{14} fueron realizados por el laboratorio *Beta Analytic Inc. de Miami, USA*, mediante la técnica radiométrica convencional: pretratamientos por lavado con alcali-ácido-alcali y síntesis final del benceno al que se le determinó el contenido de C^{14} en un espectrómetro de destellos (*Scintillation spectrometer*). El laboratorio empleó la dendrocalibración

de Pretoria (Vogel *et al.*, 1993) para transformar las edades AP en AD (*anno domine*) o edad calendario.

Selección de los árboles para análisis de C^{14}

Para el cuálgare se seleccionaron de las parcelas permanentes de El Esterón seis de los árboles de mayor diámetro. En cuanto a pinde, guayabillo y caña se seleccionaron de a cuatro: ocho en la parcela "El Esterón 1", uno en El Esterón 2, uno en guabillales y dos en el área de El Esterón fuera de las parcelas, buscando también los de mayores dimensiones.

Resultados y discusión

La Tabla 2 contiene las cuatro ecuaciones de regresión de las tasas de crecimiento, correspondientes al ajuste del modelo 4 para cada una de las cuatro especies; ellas son: 1, para todos los registros sin agrupar; 2, para los árboles de mayor crecimiento; 3, para los registros promediados por clase diamétrica; 4, para el promedio por clase diamétrica más la desviación estándar. A pesar de la amplia dispersión observada en los registros de crecimiento, y aún en sus promedios por clases diamétricas y en las desviaciones estándar (Figuras 5 a 8), 9 de las 16 regresiones fueron estadísticamente significativas ($p < 0,01$). En todos los casos la regresión que empleó el promedio de datos por clase diamétrica ponderada por el número de registros aportados mostró los mejores ajustes por cuanto explicó desde cerca del 81% de la varianza en el pinde hasta más del 98% en el cuálgare. El resultado es lógico por cuanto el promedio disminuye en gran medida la varianza asociada con el crecimiento dentro de cada clase diamétrica. Mientras en cuálgare y en guayabillo sólo las segundas regresiones no fueron significativas, en caña fueron significativas la segunda y la tercera y en el pinde la única que resultó significativa fue la tercera; en las demás, su coeficiente de determinación fue cero, reflejando el peor ajuste del modelo entre las cuatro especies.

La amplia dispersión de los registros de crecimiento individuales con crecimientos positivos muy altos e, inclusive, con crecimientos negativos, podría contener algunas observaciones extremas (*outliers*) y, por tanto, posibles de descartar desde la perspectiva estadística; ello no se hizo por cuanto la aleatoriedad de los errores implica que si se descartan los valores negativos la regresión se sesgaría hacia tasas de crecimiento mayores; además, el análisis cuidadoso de las mediciones sucesivas de los árboles que produjeron esos registros revelan que son coherentes y confiables.

La integración de las ecuaciones de tasas de crecimiento producen las respectivas ecuaciones de crecimiento diamétrico presentadas en la Tabla 3 y representadas en la Figura 9. Por su origen matemático y no estadístico se desconoce el ajuste de estas ecuaciones. Nótese en la citada figura que las ecuaciones para cada especie tienden a la equifinalidad en razón del empleo de la misma asíntota. Esta tendencia la concibió von Bertalanffy (1976) desde la formulación de su modelo.

Puesto que las edades estimadas con C^{14} corresponden al promedio del núcleo central analizado, cuyo diámetro fluctuó entre 1,2 y 1,5 cm, y no exactamente al centro del árbol, los diámetros de partida de las curvas (Do en la Tabla 3) que fluctúan entre 0,9 y 1,1 cm, tienen la virtud de compensar en gran medida el tiempo requerido por los árboles para la formación de dicho núcleo. No debe subestimarse la importancia de esta compensación por cuanto los modelos de este tipo son altamente sensibles a cambios en las condiciones iniciales como lo demostró Campos (1996) para el modelo logístico.

Las edades calibradas y sin calibrar de los 18 árboles analizados se presentan en la Tabla 4. Excepto los árboles 20, 14 y 8, a los que sólo se les analizó la muestra A, los demás presentan resultados de C^{14} para ambas muestras: A central, B lateral. Cuando ambas muestras fueron posteriores a 1950 sus contenidos de C^{14} (% moderno) permitieron una determinación muy segura de la edad. Además, las pequeñas desviaciones estándar de estas determinaciones (de $\pm 0,7\%$ a $\pm 0,9\%$) implican una probabilidad de error muy pequeña. Por ello, la determinación de la edad de los árboles 2, 10, 22, 19, 9 y 34, no presentó dudas. En dos árboles (5 y 15) la muestra A resultó posterior a 1950 y la B antes de este año, resultado contraevidente. Otro elemento que le agrega complejidad a la interpretación de las edades calibradas proviene del hecho de que en la porción de la curva de calibración útil para estos análisis, entre 1500 y 1950 AD, presenta cuatro máximos relativos y cuatro mínimos en razón de su trayectoria sinuosa (*wiggled*). Ello condujo a que las edades AP intersecaran en algunos casos varias veces la curva de calibración; como ocurre con la muestra 20A (200 ± 50 años AP) que la intersecó en cuatro puntos (Figura 8). Puesto que la mínima absoluta de la curva de calibración corresponde a $C^{14} \cong 92$ años AP y 1900 AD, las edades no calibradas (AP) menores de esta edad no intersecan la curva de calibración; por tanto, se desconocen sus edades calendario promedias, pero, de acuerdo con van Daalen *et al.* (1992), a quienes les resultaron varios árboles en esta situación, se puede afirmar que su madera se formó entre 1900 y 1950. Ello se

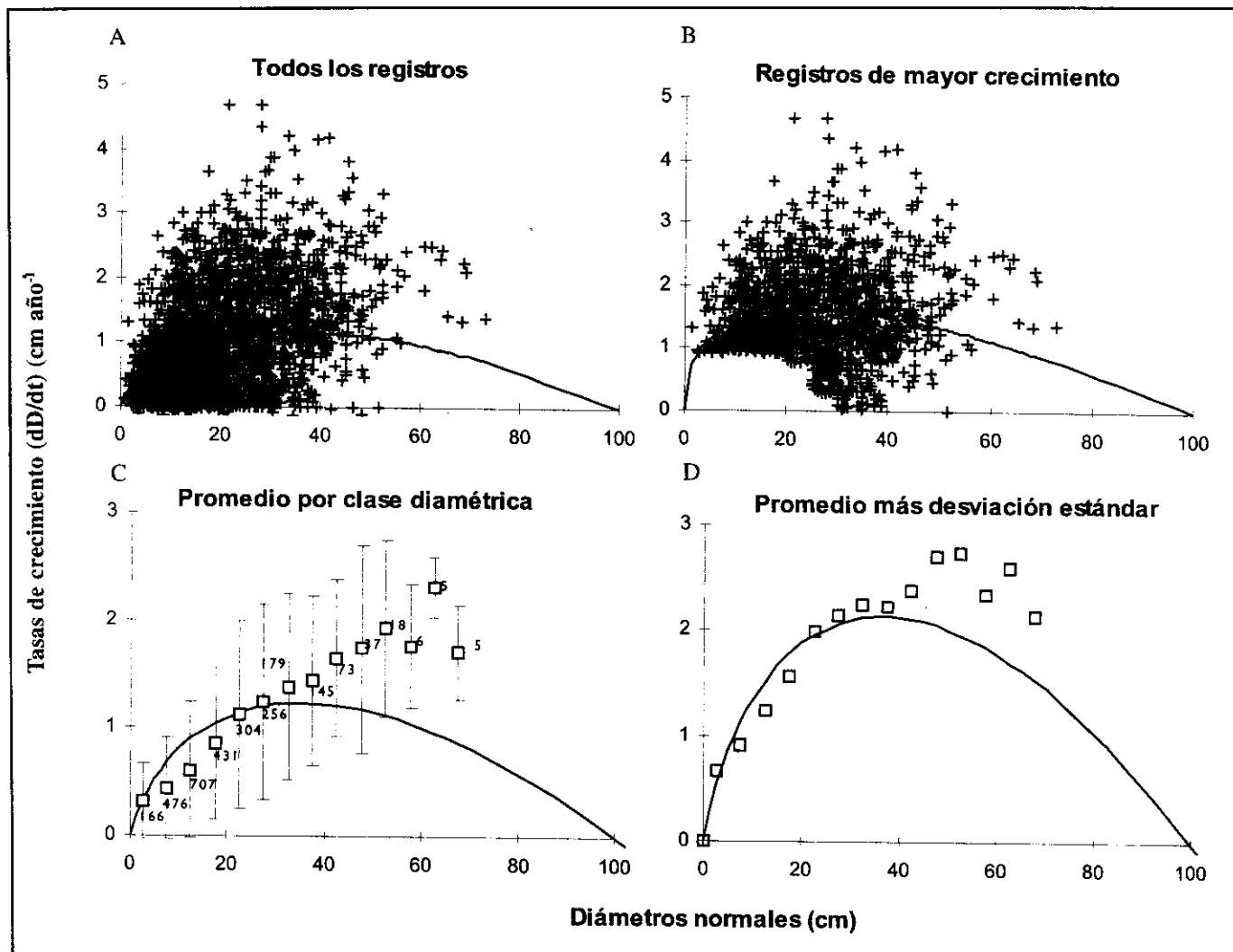


Figura 4. Datos experimentales y ecuación de las tasas de crecimiento para cuáangare; **A** los registros de todos los árboles; **B** los registros de árboles de mayor crecimiento; **C** empleando el promedio ponderado por clase diamétrica, se presenta \pm la desviación estándar; **D** con base en el promedio de la desviación estándar.

presentó en ambas muestras del árbol 6 así como en la 17B, 15B y 18B. En estos casos, las intersecciones de 1σ ó 2σ aportan alguna ayuda. Finalmente, las edades C^{14} sin calibrar arrojaron desviaciones desde ± 50 hasta ± 60 años AP, muy altas comparadas con las obtenidas por van Daalen *et al.* (1992) para *Pterocarpus angolensis* en Sur Africa (de ± 15 a ± 21 años AP), pero de rango similar o inferior a las de Ash (1983, 1985, 1986) para *Agathis robusta* (± 55 a ± 85 años AP), *A. vitiensis* (± 48 a ± 100), así como las de Enright (citado por Enright y Hartshorn, 1981) para dos especies de *Araucaria* (± 80 a ± 115 años AP), todas estas especies del trópico de

Australia y de la isla de Fiji. Tan amplias desviaciones estándar en árboles relativamente jóvenes dificultan aún más el análisis en una porción de la curva considerada por Stuiver (1978), autor de una de las curvas de calibración más empleadas, como particularmente difícil de interpretar.

Se sabe que en los árboles pueden migrar compuestos orgánicos formados con posterioridad al núcleo central de la madera hacia el centro del árbol (Worbes y Junk, 1989; van Daalen *et al.*, 1992; Tamers y Hood, 1997). Estos "contaminantes" pueden dar lugar a dataciones con

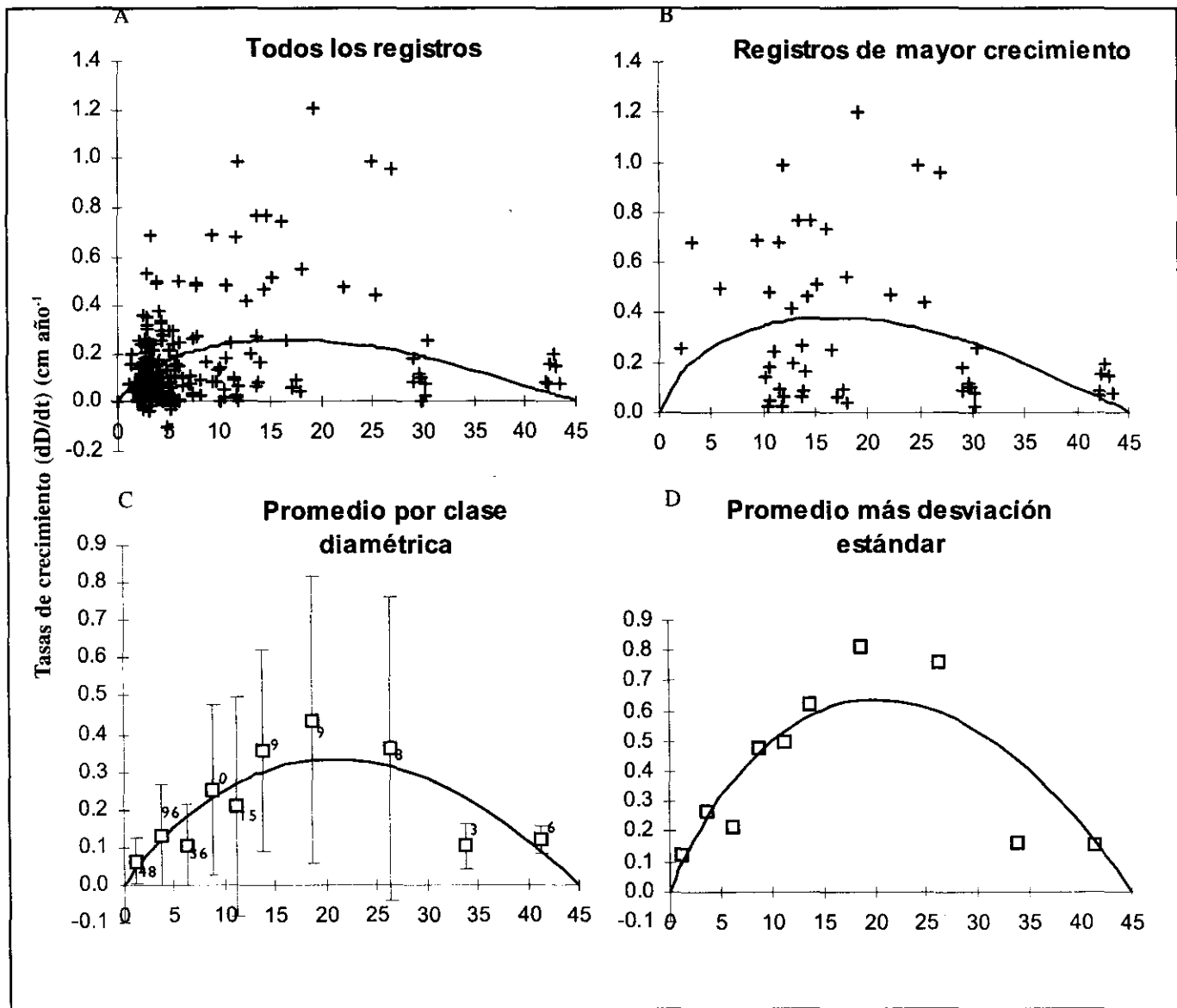


Figura 5. Como en la Figura 4 pero para guayabillo; más detalles en el texto.

radiocarbon muy jóvenes o muy viejas; los pretratamientos ácido-alcalí-acido tienden a eliminar tales compuestos orgánicos, en particular el lavado con NaOH pero, puesto que no aseguran su total eliminación, en ocasiones se acude al análisis de la celulosa pura (van Daalen *et al.*, 1992). El análisis por espectrometría de aceleración de masas, previa transformación de la muestra en grafito puro, también arroja resultados muy satisfactorios (Worbes y Junk, 1989), pero a menudo los hace prohibitivos. También debe tenerse en cuenta que las curvas de calibración se han elaborado analizando muestras compuestas de 10 a 20 años

de los árboles empleados en la calibración (van der Plich y Mook, 1987; Tamers y Hood, 1997); por tanto, poco detectan las variaciones del C^{14} producidas cada 11 años por las manchas solares (van der Plich y Mook, 1987). Puesto que muchas muestras pueden no cumplir con el criterio de los 10 a 20 años, las edades C^{14} se deben considerar como aproximaciones (Tamers y Hood, 1997).

Resta aún otro factor que puede disminuirle exactitud a la estimación de la edad de los árboles con C^{14} . En rodales densos los árboles juveniles presentes en el

Tabla 2. Ecuaciones de tasas de crecimiento de las cuatro especies, manipulando los datos en cuatro diferentes formas (véase nota de pie de página). Se incluye el tamaño de la muestra (n) y el coeficiente de determinación (% r²)

Especie	dD/dt (cm año ⁻¹) =	n ⁵	%r ²
Cuángare ¹	$3,6685(D^{0,9910} - 100^{(-0,0090)}. D)$	2808	17,27**
Cuángare ²	$0,6665(D^{0,4873} - 100^{(-0,5127)}. D)$	1253	0,00 ns
Cuángare ³	$0,6357(D^{0,9299} - 100^{(-0,0701)}. D)$	13	98,51**
Cuángare ⁴	$7,6150(D^{0,9908} - 100^{(-0,0092)}. D)$	13	65,48**
Guayabillo ¹	$0,9992(D^{0,9837} - 45^{(-0,0163)}. D)$	239	12,24**
Guayabillo ²	$1,2428(D^{0,9801} - 45^{(-0,0199)}. D)$	51	2,32 ns
Guayabillo ³	$-0,0034(D^{1,6494} - 45^{(0,6494)}. D)$	10	93,24**
Guayabillo ⁴	$-0,0103(D^{1,5661} - 45^{(0,5661)}. D)$	10	70,29**
Cuña ¹	$0,0747(D^{0,4415} - 35^{(-0,5585)}. D)$	250	0,001ns
Cuña ²	$0,3927(D^{-0,2665} - 35^{(-1,2665)}. D)$	106	14,81**
Cuña ³	$0,0799(D^{0,3646} - 35^{(-0,6354)}. D)$	11	94,17**
Cuña ⁴	$0,1572(D^{0,6087} - 35^{(-0,3913)}. D)$	11	19,5 ns
Pinde ¹	$1,1101(D^{0,9775} - 2I^{(-0,0225)}. D)$	151	0,00 ns
Pinde ²	$1,7537(D^{0,9718} - 2I^{(-0,0282)}. D)$	39	0,00 ns
Pinde ³	$1,8721(D^{0,9870} - 2I^{(-0,0130)}. D)$	6	80,75**
Pinde ⁴	$4,7251(D^{0,9867} - 2I^{(-0,0133)}. D)$	6	0,00 ns

¹Todos los registros individuales.

² Árboles de mayor crecimiento (Más detalle en el texto).

³Promedio ponderado de los registros por clase diamétrica.

⁴Promedio más la desviación estándar.

⁵Número total de registros (para 1 y 2) o de promedios por clase diamétrica (para 3 y 4).

**Significativo para p > 0,01.

ns. no significativo.

sotobosque captan CO₂ de la respiración del suelo y, por ello, tienen un contenido de radiocarbon diferente del atmosférico (Medina y Minchin, 1980)

A pesar de las dificultades mencionadas, la confrontación de los anillos de crecimiento en árboles tropicales

con su contenido de C¹⁴ ha demostrado ser de gran utilidad en estudios dendroclimatológicos y silviculturales (Ash, 1983, 1985, 1986; Worbes y Junk, 1989; Worbes, 1995) y ha servido para demostrar la existencia de anillos anuales tanto en árboles de las *várseas* amazónicas como del trópico australiano. Pero, a diferencia de los autores

Tabla 3. Ecuaciones de crecimiento de las cuatro especies correspondientes a la integración de las ecuaciones de las tasas de crecimiento (Tabla 2). Do es el diámetro menor registrado para cada especie (D = Do cuando t = to). Los superíndices de cada especie tienen igual significado que en la tabla 2, i en D_i tiene valores de 1 a 4 de acuerdo con el superíndice

Espece	Do ^s cm	D _i = cm
Cuángare ¹	0,9	$100(1 - 0,0415 \exp[-0,0317(t - t_0)])^{111,1111}$
Cuángare ²	0,9	$100(1 - 0,9106 \exp[-0,0322(t - t_0)])^{1,9505}$
Cuángare ³	0,9	$100(1 - 0,2812 \exp[-0,0323(t - t_0)])^{14,2653}$
Cuángare ⁴	0,9	$100(1 - 0,0424 \exp[-0,0671(t - t_0)])^{108,6956}$
Guayabillo ¹	1,1	$45(1 - 0,0587 \exp[-0,0153(t - t_0)])^{61,3497}$
Guayabillo ²	1,1	$45(1 - 0,0712 \exp[-0,0229(t - t_0)])^{50,2512}$
Guayabillo ³	1,1	$45(1 + 10,1356 \exp[-0,0261(t - t_0)])^{-1,5399}$
Guayabillo ⁴	1,1	$45(1 + 7,1743 \exp[-0,0503(t - t_0)])^{-1,7665}$
Cuña ¹	1,1	$35(1 - 0,8552 \exp[-0,0057(t - t_0)])^{1,7905}$
Cuña ²	1,1	$35(1 - 0,9875 \exp[-0,0055(t - t_0)])^{0,7886}$
Cuña ³	1,1	$35(1 - 0,8890 \exp[-0,0530(t - t_0)])^{1,5738}$
Cuña ⁴	1,1	$35(1 - 0,7418 \exp[-0,0153(t - t_0)])^{2,5556}$
pinde ¹	1,0	$21(1 - 0,0662 \exp[-0,0234(t - t_0)])^{44,4444}$
Pinde ²	1,0	$21(1 - 0,0798 \exp[-0,0454(t - t_0)])^{35,4610}$
Pinde ³	1,0	$21(1 - 0,0388 \exp[-0,0234(t - t_0)])^{76,9231}$
Pinde ⁴	1,0	$21(1 - 0,0385 \exp[-0,0603(t - t_0)])^{75,1880}$

citados que contaron con árboles con anillos claramente visibles y concéntricos, los aquí estudiados carecen de ellos. A continuación se explica como se llegó a la edad calibrada de los árboles que presentaron dificultades.

Árbol 5: la muestra A arroja 41 años de edad de acuerdo con su contenido de C¹⁴ (% moderno), pero estas mediciones muy cercanas a 1950 pueden, en opinión de van Daalen *et al.* (1992), resultar con C¹⁴ (% moderno) levemente por encima del 100%, aunque hayan vivido durante poco tiempo después de 1950 y parte de su madera se haya formado antes de este año. Mediante tasas de crecimiento (diámetro dividido entre el crecimiento promedio anual basado en 12,5 años de mediciones) se estimó la edad en 30 años. En la muestra B, más joven, su edad C¹⁴ produce edades calibradas de 71, 181, 261 y

306 años, inconsistentes con la muestra A. Se decidió asignar a este árbol el promedio de la muestra A, 41 años, y la edad calibrada más reciente de la B 71 años, resultando 56 años. **Árbol 6:** ninguna de las dos fechas C¹⁴ sin calibrar intersectó la curva de calibración. Ello demuestra que su madera se formó entre los años 1900 y 1950. 2 s en la curva de calibración s = desviación estándar arroja edades para la muestra A, de 61 a 191 años y de 251 a 316 años; para la B estas son 271 a 321 años y 51 a 146 años; mediante tasas de crecimiento durante 12,5 años se estima la edad en 46 años. Por tanto, la edad más probable es de 61 años. **Árbol 7:** la edad C¹⁴ de la muestra A al intersectar la curva de calibración sugiere estas edades: 51, 196, 221 y 321 años; la muestra B: 81, 116, 161 y 171 años. La edad más cercana a la estimada con tasas de crecimiento (35 años para 12,5 años

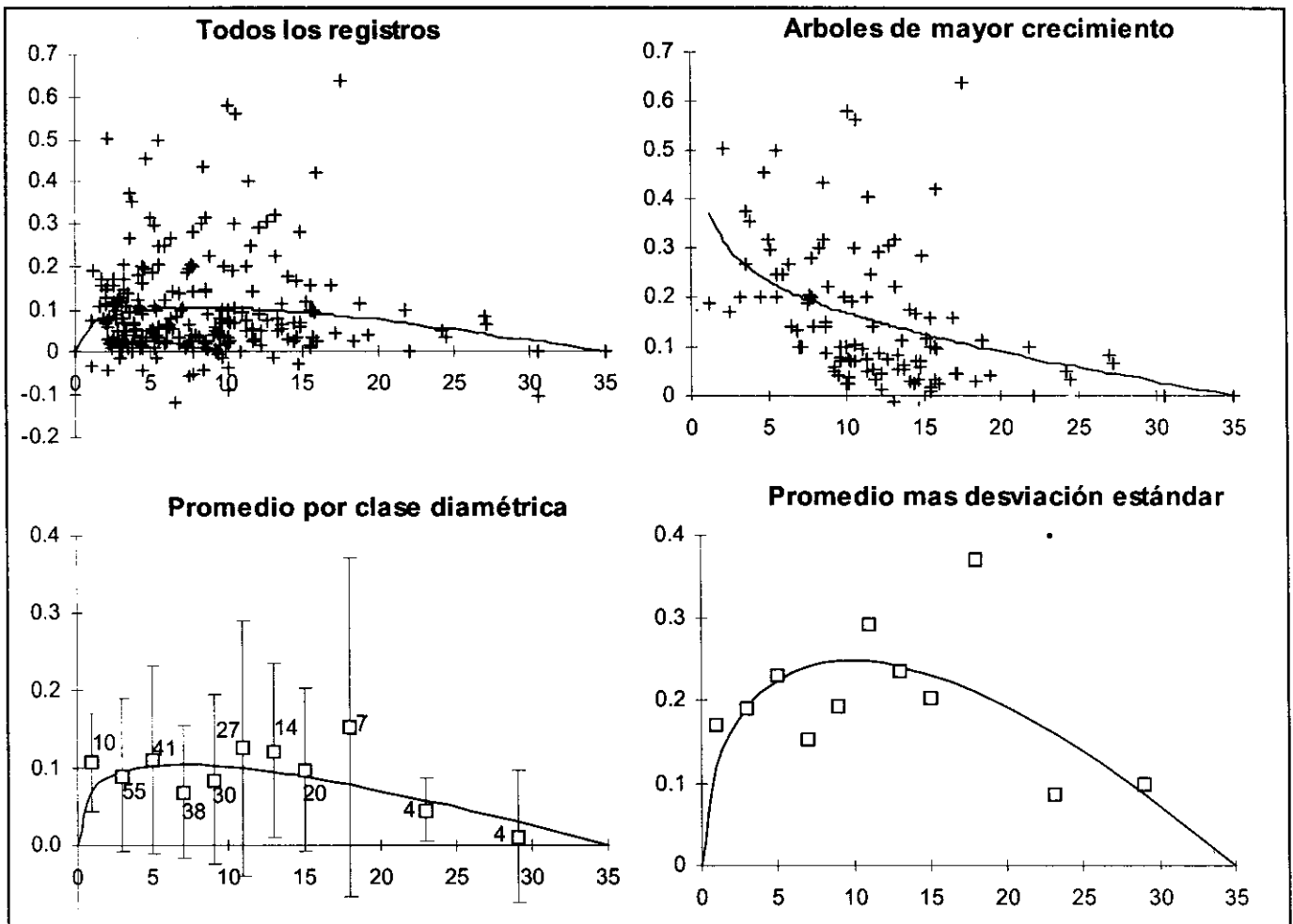


Figura 6. Como en la Figura 4 pero para cuña; más detalles en el texto.

de mediciones) son los 51 años de la muestra A; no obstante, los 81 años de la muestra B son contraevidentes por cuanto se sabe que esta muestra es más joven. Analizándola para 2σ A indica edades de 46 a 351 y la B de 46 a 331. Por tanto, se puede aceptar 51 años como la edad más probable del árbol. **Árbol 12:** la edad C^{14} de la muestra A interseca la curva de calibración en cuatro puntos correspondientes a las edades: 61, 191, 251 y 316 años. La muestra B arroja 40 años en la Figura 3. La edad más probable del árbol es de 61 años. Aunque pareciera demasiado tiempo 21 años entre la muestra central y la lateral, es muy posible que la muestra lateral tuviese compuestos de carbono formados tanto antes como después de 1950; otras fuentes de error, ya discutidas, tampoco se pueden descartar. **Árbol 17:** la edad C^{14} de la muestra A interseca en cuatro puntos la curva de cali-

bración sugiriendo estas edades: 56, 196, 226, 321 años; la edad C^{14} de la muestra B no intersecó la curva de calibración, arrojando edades 1s de 76 a 136 años, 141 a 176 años y 276 a 296 años y 2σ de 56 a 196 años y 226 a 321 años. La edad estimada con tasas de crecimiento (mediciones durante 4,5 años) fue de 113 años. La edad más probable de este árbol es de 56 años. **Árbol 20:** con sólo información de la muestra A y sin datos de crecimiento por cuanto el árbol fue cortado fuera de las parcelas permanentes, la decisión sobre la edad probable es muy subjetiva. La edad C^{14} interseca la curva de calibración en cuatro puntos, cuyas edades son: 51, 201, 216, y 326 años; con 1s se obtiene: 46 a 66 años, 186 a 256 años y 311 a 341 años. Dentro del contexto del crecimiento de esta especie la edad más probable es de 201 años y 1s de 186 a 256 años. **Árbol 14:** su edad de acuerdo

con el C^{14} (% moderno) es de 42 años en la única muestra disponible; no habiendo otra muestra que aporte evidencias y dada la cercanía del árbol al origen de la curva donde esta es poco precisa, por cuanto la madera más cercana al centro del árbol pudo haberse formado antes de 1950 y, además, por la poca pendiente de la curva, se ha decidido considerar que su edad es mayor de 42 años, pero este dato no se tendrá en cuenta en análisis posteriores. **Árbol 15:** el C^{14} (% moderno) de la muestra A sugiere 42 años pero, podría ser que la muestra tuviese parte formada antes de 1950; la muestra B más joven, sugiere que su madera se formó poco antes de 1950 lo cual es contraevidente con la edad de la muestra A. En la muestra B la edad C^{14} de 40 años AP no interseca la curva de calibración; sólo lo hace con 2σ sugiriendo es-

tos rangos: 71 a 181 años y 261 a 300 años. Por estar muy por debajo de la mínima absoluta de la curva de calibración (1900 AD) sólo la edad de 71 años tiene sentido. Se decidió promediar la edad de la muestra A con ésta última edad y se le asignó a este árbol 56 años. **Árbol 16:** la edad C^{14} de la muestra A produce seis edades calibradas: 76, 136, 141, 176, 276 y 296 años; la edad C^{14} de la muestra B, arroja al calibrarla 331 años, mayor que todas las edades de la muestra A, a pesar de que se sabe que es más joven; no obstante, si la muestra B tuviese 205 años AP, edad comprendida entre 220 ± 60 años AP de la muestra, interseccionaría la curva de calibración en cuatro puntos arrojando edades de 51, 46, 205 y 313 años. Ello permite detectar dos edades posibles: 76 y 276 años. En el contexto del crecimiento de la especie es más probable

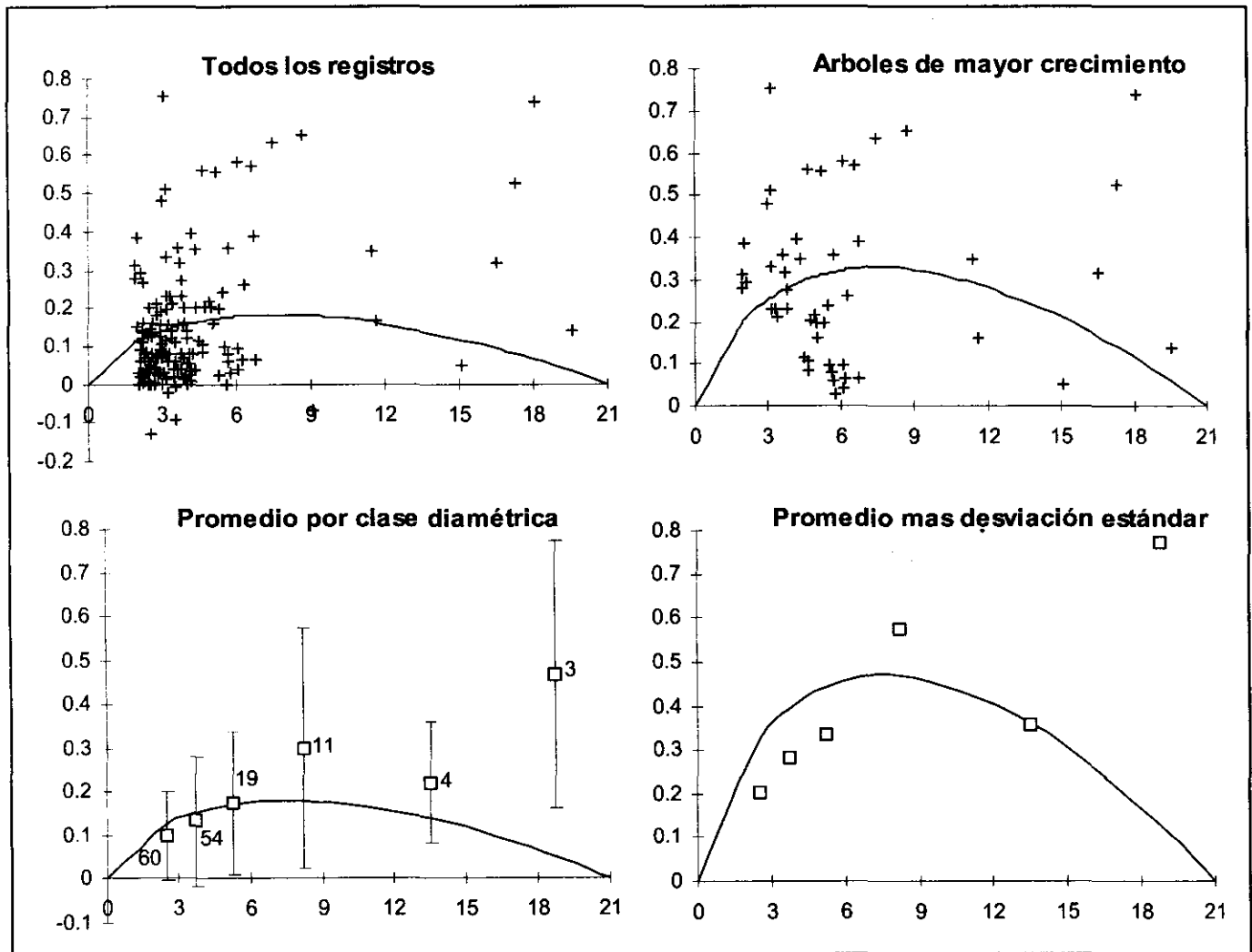


Figura 7. Como en la Figura 4 pero para pinde; más detalles en el texto.

Tabla 4. Resultados de la determinación de la edad de los árboles con C¹⁴. Los diámetros normales (D) y las edades en años corresponden a octubre de 1996

N ^{o1}	Muestra B. Analytic ²	Especie	D cm	Edad C ¹⁴ años	
				Sin calibrar ³	Calibrada
2A	099974	Cuángare	57,8	140,5 ± 0,9%	21
2B	099992			132,7 ± 0,8%	
5A	099975	Cuángare	62,5	102,5 ± 0,8%	56
5B	099993			140,0 ± 50AP	
6A	099976	Cuángare	51,4	40 ± 60 AP	61
6B	099994			90 ± 50 AP	
7A	099977	Cuángare	44,68	190 ± 50 AP	51
7B	099995			110 ± 60 AP	
10A	099980	Cuángare	59,4	118,0 ± 0,8%	37
10B	099997			150,4 ± 0,9%	
22A	099989	Cuángare	74,5	101,2 ± 0,6%	41
22B	100004			142,9 ± 0,8%	
12A	099981	Cuña	20,3	160 ± 50 AP	61
12B	099998			104 ± 0,7%	
17A	099985	Cuña	17,6	180 ± 60 AP	56
17B	100001			60 ± 60AP	
19A	099987	Cuña	14,1	142,3 ± 0,9%	23
19B	100003			131,9 ± 0,8%	
20A	099988	Cuña	31,3	200 ± 50 AP	201
14A	099982	Guayabillo	43,8	100,6 ± 0,7%	>42
15A	099983	Guayabillo	30,6	100,2 ± 0,7%	56
15B	099999			40 ± 50 AP	
16A	099984	Guayabillo	30,16	120 ± 50 AP	76
16B	100000			220 ± 60 AP	
18A	099986	Guayabillo	18,1	210 ± 50 AP	46
18B	100002			40 ± 50 AP	
8A	099978	Pinde	19,9	142 ± 0,8%	33
9A	099979	Pinde	12,06	105,8 ± 0,7%	40
9B	099996			121,0 ± 0,7%	
23A	099990	Pinde	17,08	110 ± 50AP	58
23B	100005			119,5 ± 0,7%	
34A	099991	Pinde	15,38	158,5 ± 0,8%	29
34B	100006			131,0 ± 0,8%	

¹ A corresponde al núcleo central extraído de cada árbol y B a la muestra auxiliar extraída a 1-2 cm del centro.

² Número del laboratorio Beta Analytic.

³ Los valores en % corresponden a C¹⁴ (% moderno) cuando la muestra es posterior a 1950. AP; antes del presente, significa antes de 1950.

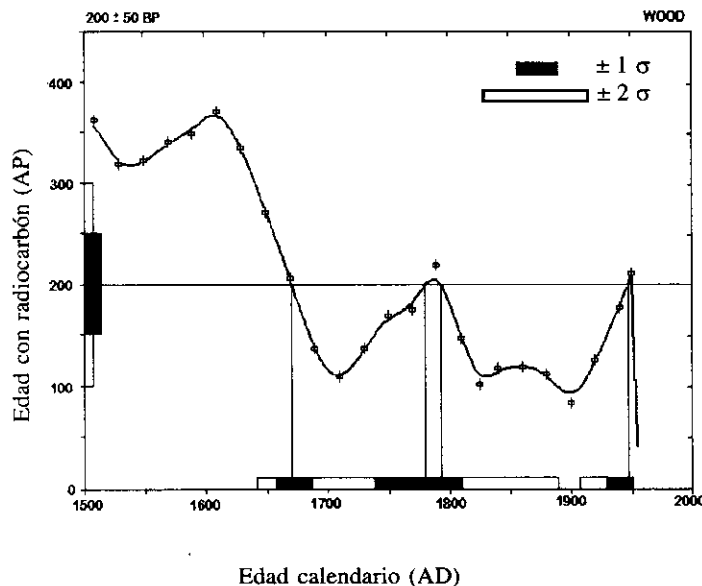


Figura 8. Porción de la curva de dendrocalibración de Pretoria (Vogel *et al.*, 1993) entre 1500 y 1950 AD y calibración de la muestra 20A con 200 ± 50 años AP; se presentan cuatro intersecciones o posibles edades calendario de la muestra. En la abscisa se incluyen también una o dos desviaciones estándar (1σ y 2σ), y sus intersecciones en la ordenada.

la edad menor. **Árbol 18:** la edad C^{14} de la muestra A transecta la curva de calibración en dos puntos que corresponden a 46 y 326 años; la edad C^{14} de la muestra B no toca la curva de calibración en ningún punto, sólo lo hace con 2σ y estos rangos de edades: 261 a 306 años y 71 a 181 años; pero al no atravesar la curva de calibración, la edad correspondiente al siglo XX es la única posible. Luego la edad más probable de este árbol es 46 años. **Árbol 8A:** la única muestra de C^{14} (% moderno) transecta la curva de calibración (Figura 3) en dos fechas sugiriendo dos edades de formación de la madera central de este árbol: 33 y 22 años, la edad estimada con tasas de crecimiento (medidas durante 12,5 años) es de 73 años; se considera entonces que la edad más probable del árbol es 33 años. **Árbol 23:** la edad C^{14} de la muestra A interseca la curva de calibración en cinco puntos que sugieren estas edades: 81, 116, 165 y 171 años. La muestra B evidencia que se formó después de 1950 por cuanto su contenido de C^{14} (% moderno) atraviesa la curva de calibración en dos fechas correspondientes a 36 u 8 años de edad siendo esta última muy improbable. Tampoco parece probable que el árbol haya requerido como mínimo 45 años (81-36) para crecer 1,0 cm, distancia promedio entre las muestras A y B. El promedio de estas dos edades, 58 años, se consideró como la edad más adecuada para el árbol.

Sobre los gráficos de la Figura 9 se representan los diámetros de las sucesivas mediciones de los árboles teniendo en cuenta la edad correspondiente al diámetro de la última medición (Tabla 4). Lo primero que se advierte es la gran similitud en las trayectorias de las ecuaciones

D_1 y D_3 correspondientes a la integración de las ecuaciones de tasas de crecimiento para todos los registros individuales y para los datos agrupados, al punto que para caña y pinde las dos curvas virtualmente se superponen durante todo su recorrido. Para cuángare y guayabillo D_3 siempre superó a D_1 aunque sus diferencias no alcanzaron a ser significativas (Tabla 5). Entonces, agrupar o no los registros de tasas de crecimiento, tiene poco o ningún efecto en las curvas de crecimiento, al menos para los cuatro casos aquí analizados. Por el contrario, las curvas D_2 y D_4 , se presentan con trayectorias distintas resultando significativamente diferentes para cuángare y guayabillo, más no para caña y pinde. En todos los casos los diámetros fueron mayores con la curva resultante de la integración de la ecuación de las tasas de crecimiento por clases diamétricas más la desviación estándar (D_4) que con los árboles de mayor crecimiento (D_2) (Figura 8). Para las cuatro especies y durante gran parte del recorrido de las curvas se cumple que, para igual edad, ellas predicen diámetros según la secuencia: $D_4 > D_2 > D_3 > D_1$. La observación visual de los diámetros de todas las especies permite afirmar que las curvas D_1 y D_3 tienden a subestimar el crecimiento de los árboles. En todos los casos las curvas D_2 o D_4 predicen mejor los diámetros de los árboles datados. Para una verificación más rigurosa de lo planteado se han efectuado varias pruebas presentadas en la Tabla 6. Para cuángare D_2 mostró los valores más bajos de residuales, diferencia agregada y *t* de Student, prueba mediante la cual no se rechaza la hipótesis nula, así como el mayor valor de *Z* en la prueba de

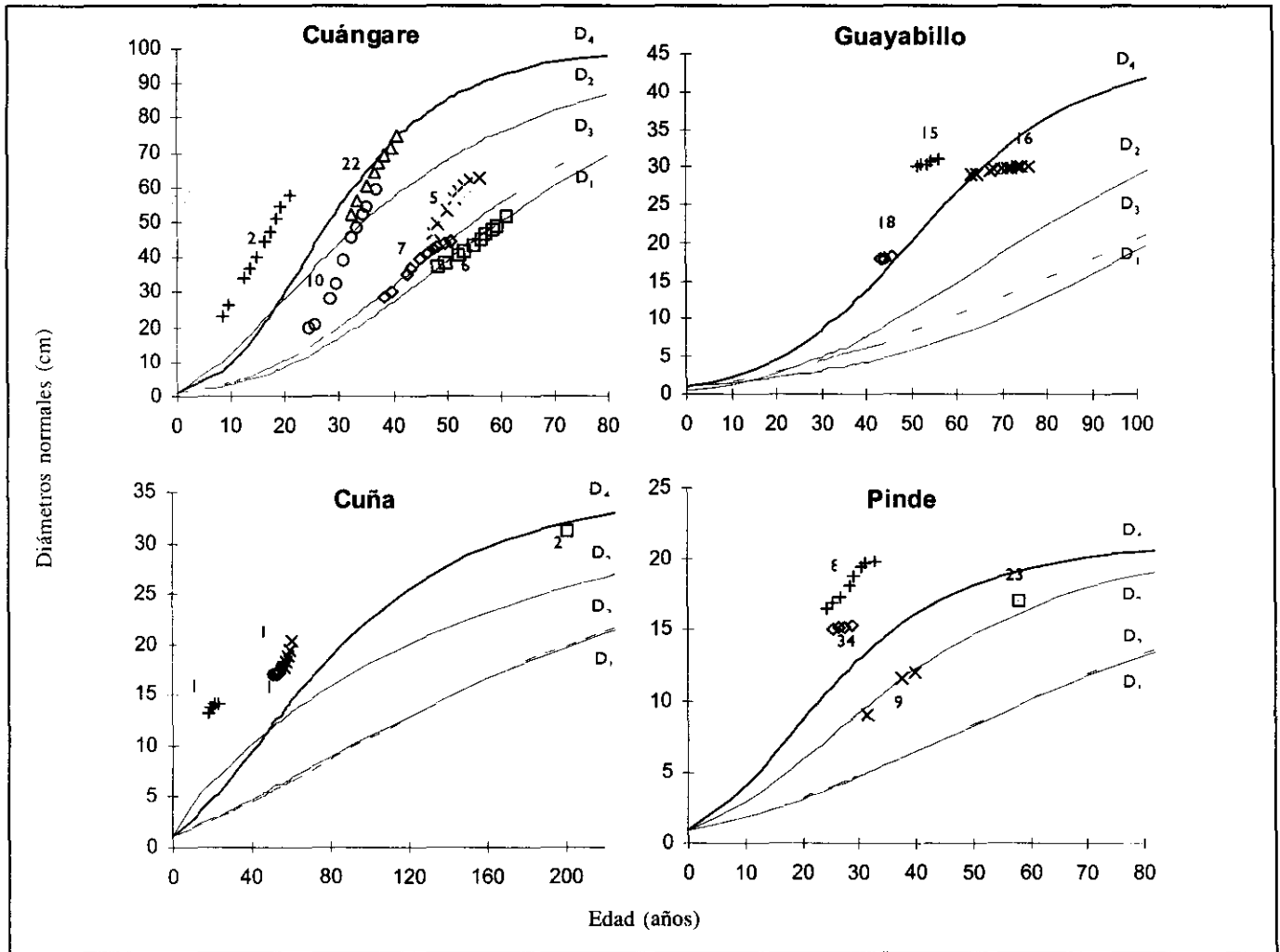


Figura 9. Curvas de crecimiento de las cuatro especies correspondientes a las ecuaciones de la tabla 3. D_1 , D_2 , D_3 y D_4 corresponden a la integración de las curvas de las tasas de crecimiento de todos los registros individuales, de los árboles de mayor crecimiento de las tasas de crecimiento promediadas por clases diamétricas y de los promedios más la desviación estándar, respectivamente.

rangos de Wilcoxon la cual conduce a aceptar la hipótesis nula. Por tanto, esta ecuación refleja mejor el crecimiento de la especie. Para guayabillo el conjunto de las pruebas conduce a seleccionar la ecuación D_4 , la cual no rechaza la hipótesis nula (valor de t), pero que si es aceptada por la prueba de Wilcoxon. En la especie cuña las ecuaciones D_2 y D_4 parecen similares en varias pruebas, no obstante, la disposición de los diámetros medidos en la Figura 8, el valor de t que acepta la hipótesis nula para $\mu = 0,05$ más no para $\mu = 0,01$, conduce a considerar D_4 como la curva más representativa. En pinde todas las pruebas son más favorables para D_4 a pesar de que t rechaza la hipótesis nula, pero la prueba de Wilcoxon la acepta para

$\mu = 0,05$, siendo este un argumento estadísticamente más contundente que el de la prueba anterior.

Las dificultades encontradas para datar con exactitud varios árboles mediante C^{14} no permiten una comprobación contundente de la hipótesis de partida, pero toda la evidencia parece demostrar que los modelos que emplean toda la información del crecimiento de los árboles, obtenida de la medición durante varios años de los diámetros en parcelas permanentes (Ecuaciones D_1 y D_3), subestiman el crecimiento de los árboles que pueden llegar al dosel o a su estado adulto. Para los árboles, materia de este documento, el procedimiento de sumarle al crecimen-

to medio por clase diamétrica su desviación estándar (Ecuaciones D_4) fue superior en tres de las cuatro especies. Sólo en cuángare el procedimiento denominado "árboles de mayor crecimiento" (ecuación D_2), estima mejor el crecimiento de los árboles datados. Obsérvese que se llegaría al mismo resultado si sólo se tuviesen en cuenta los cinco árboles datados con muy bajos márgenes de error (2, 10, 22, 19, 9, 54). En todos las curvas D_1 y D_3 subestimarían grandemente sus diámetros. Las curvas D_2 y D_4 representarían mejor sus crecimientos.

La especie con árboles más viejos fue cuña. Los cuatro árboles datados arrojan 85,2 años de edad promedio y 20,8 cm de diámetro normal. En segundo lugar se encuentra guayabillo; tres árboles con diámetro normal promedio de 26,3 cm arrojaron 59,0 años de edad promedio. Luego se encuentra cuángare con 44,5 años y 58,8 cm de diámetro normal promedio de seis árboles. Finalmente pinde: sus cuatro árboles arrojaron 40,0 años y 16,1 cm de diámetro normal promedio. Las tasas de crecimiento promedio fueron: cuángare 1,32 cm año⁻¹, guayabillo 0,44 cm año⁻¹, pinde 0,40 cm año⁻¹ y cuña 0,24 cm año⁻¹. Se verifica entonces la hipótesis planteada según la cual los árboles de pequeñas dimensiones del subdosel y del sotobosque son tan o más viejos que los árboles del dosel en virtud de sus bajas tasas de crecimiento; para los árboles datados ello implica que cuángare crezca desde más de cinco veces más rápido que cuña hasta tres o más veces que guayabillo o pinde.

Debe destacarse la poca edad de los árboles analizados a pesar de haber sido seleccionados entre los más grandes de las parcelas permanentes y aún, por fuera de ellas. Su edad promedio es apenas de 55,6 años, y si no se tuviese en cuenta el individuo más viejo, un cuña de

Tabla 5. Comparación de las ecuaciones correspondientes a las curvas de crecimiento D_1 vs. D_3 y D_2 vs. D_4 , mediante el empleo de ji-cuadrado y 15 valores de cada curva dentro del rango de las mediciones

Especies	χ^2	
	D_1 vs D_3	D_2 vs D_4
Cuángare	6,59 ns	30,90 **
Guayabillo	12,79 ns	71,79 **
Cuña	,05 ns	12,74 ns
Pinde	0,01 ns	12,77 ns

** Diferencias significativas $\mu = 0,01$.

ns No hay diferencias, se acepta la hipótesis nula.

201 años, el promedio de los restantes bajaría a 46, 6 años. Se afirma que estos árboles son jóvenes por cuanto al compararlos con las edades de otros árboles del trópico húmedo cuyas edades se han estimado por métodos diversos: anillos de crecimiento, C^{14} , tasas de crecimiento, ello se hace evidente. La mayoría de las siete *Araucaria hunsteinii* datadas por Enright (citado por

Tabla 6. Comparación entre los valores de diámetros predichos mediante las ecuaciones de crecimiento D_1 , D_2 , D_3 y D_4 y los diámetros medidos para las cuatro especies. La última edad de cada árbol se determina mediante C^{14} , las demás edades con las fechas de medición de los árboles

	D_1	D_2	D_3	D_4
Residuales al cuadrado¹				
Cuángare	41813,8	20509,0	34678,9	45899,3
Guayabillo	5489,81	3136,41	7219,76	419,42
Cuña	1823,6	492,1	1766,2	470,1
Pinde	2185,0	962,1	2204,1	393,2
Diferencia agregada²				
Cuángare	-87,3	8,4	-62,1	25,9
Guayabillo	-156,8	-82,8	-236,6	-4,6
Cuña	-187,0	-50,0	-178,8	-43,6
Pinde	-229,1	-73,1	-232,8	-24,2
Prueba de t de dos colas³				
Cuángare	8,9**	-1,5 ns	6,9**	-4,5**
Guayabillo	13,7**	8,7**	16,1**	0,7 ns
Cuña	6,9**	3,2**	6,9**	2,2*
Pinde	13,8**	7,7**	13,8**	3,5**
Prueba de Wilcoxon de dos colas (Z)				
Cuángare	9,28E-10**	9,69E-02 ns	5,16E-07**	4,78E-05**
Guayabillo	1,80E-04**	1,80E-04**	1,80E-04 ns	5,70E-01 ns
Cuña	1,94E-03**	1,94E-03**	1,94E-03**	2,53E-03**
Pinde	3,97E-04**	1,02E-03**	3,97E-04**	1,00E-02*

¹ $\sum_{i=1}^n (D_i - \hat{D}_i)^2$; n es 56,18,12 y 16 para las cuatro especies, respectivamente,

² $\left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{D}_i - \sum_{i=1}^n D_i \right)}{\sum_{i=1}^n \hat{D}_i} \right] * 100$

³ Grados de libertad: 110, 34, 22 y 30 respectivamente,

* Diferencias significativas $\alpha=0,05$

** Diferencias significativas $\alpha=0,01$

ns Diferencias no significativas,

Enright y Hartshorn, 1981) empleando las tres técnicas previamente mencionadas, variaron entre 100 y 400 años; para *Agathis robusta* Ash (1983) encontró por C^{14} edades para cuatro árboles adultos entre 285 y 620 años. El mismo autor dató cinco *A. vitiensis* de la isla Fiji cuyas edades con anillos de crecimiento y con C^{14} fluctuaron entre 400 y 600 años (Ash, 1985). Ashton *et al.* (1980) recopilaron alguna información acerca de este tema; mencionan a Wyatt-Smith quien estima que las edades máximas de las Dipterocarpaceas de Malasia fluctúan entre 200 y 450 años, a Jones quien estima que las especies africanas *Lophira alata* y *Guarea cedrata* viven entre 300 y 350 años y a Heinsdijk quien atribuye 450 años como promedio para árboles de la selva amazónica con diámetros de 145 a 155 cm. Más aún, hay árboles gigantes en las selvas tropicales que pueden vivir hasta 1.400 años como un *Bertholletia exelsa* del río Jarí, Brasil, con 4,2 m de diámetro o el *Balanocarpus heimii* de Malasia que puede alcanzar también esta edad (Murça-Pires y Cousens, respectivamente, citados por Ashton *et al.*, 1980). Whitmore (1975) informa que un gigantesco árbol de *Nothofagus pullei* con 1,8 m de diámetro se dató en 550 ± 85 años, un *Shorea curtissii* en 800 ± 70 años, ambos de los trópicos asiáticos y que un enorme boabab (*Adansonia digitata*) de las sabanas africanas cuyo diámetro alcanzó 4,5 m se dató en 1.000 ± 100 años.

Mediante tasas de crecimiento Nicholson (citado por Whitmore, 1975) estimó la edad media y mínima de 19 especies de árboles de los bosques tropicales del norte de Borneo. Las especies emergentes y del dosel principal tardarían en promedio 110 a 300 años para alcanzar 38 cm de diámetro y, como mínimo, basándose en el árbol más precoz en cada clase diamétrica con amplitud de 9,55 cm, 60 a 170 años; para los del subdosel éstas edades fueron 310 a 720 años en los que podían alcanzar este diámetro; otras del subdosel, cuyo diámetro máximo no supera los 29 cm requerirían para alcanzar dicho diámetro entre 250 y 490 años en promedio y entre 110 y 250 años como mínimo.

Se puede tener una aproximación al ciclo vital de estas especies calculando el tiempo para que alcancen el 99% de sus asíntotas respectivas empleando la ecuación D_2 en cuángare y D_4 en las demás especies; igualmente, se puede calcular el crecimiento medio en dicho punto de la curva. Mediante este cálculo los ciclos de vida de cuángare, guayabillo, cuña y pinde son: 140, 160, 340 y 91 años, respectivamente, y los siguientes crecimientos medios: 0,71, 0,28, 0,10 y 0,23 cm año⁻¹. Cuángare se revela entonces como especie de rápido crecimiento no siendo pionera y a pesar de permanecer durante gran parte

de su vida bajo el dosel. Guayabillo y pinde tienen tasas de crecimiento bajas y las de cuña son muy bajas.

La juventud de los árboles puede atribuirse a los reiterados aprovechamientos a que han estado sometidos estos humedales forestales durante las últimas cinco décadas (del Valle, 1993). Aunque de las especies estudiadas sólo cuángare tiene valor en el comercio de la madera, las demás especies pueden también sufrir el impacto de las explotaciones. Parece entonces que la mayoría de estos árboles nacieron después de las primeras intervenciones madereras, o eran aún juveniles sobrevivientes del impacto de las explotaciones.

Existen razones para considerar que cuángare no es una especie muy longeva. El autor ha comprobado que, con frecuencia, árboles de esta especie con 70 a 80 cm de diámetro cortados por los campesinos, tienen podrido el corazón, síntoma de que su muerte está cercana; igualmente, tres árboles de esta especie se debieron descartar para datarlos en esta investigación por igual razón.

Agradecimiento

Decenas de mis alumnos del curso de Silvicultura Tropical han participado en el levantamiento de las parcelas y medición de los árboles entre 1984 y 1996; igualmente, muchos profesores e ingenieros forestales colegas. A todos les agradezco por igual su trabajo y dedicación aunque el espacio no me permite mencionarlos por sus nombres. Deseo dejar constancia explícita de reconocimiento a mis asistentes, ingenieros Javier Martínez y Hernán Darío Posada, por su gran ayuda en la obtención y preparación de las muestras para C^{14} y en el procesamiento de toda la información. También a mi secretaria Nelly Valencia por su empeño y dedicación en la digitación y corrección de todo el documento y al profesor Flavio Moreno quien leyó el manuscrito y me hizo varias sugerencias incluidas en el texto. Entre 1984 y 1991 la investigación fue financiada por la Universidad Nacional (CINDEC), entre 1992 y 1995 por el Proyecto Guandal PNUD Col 89/011. Finalmente, las últimas mediciones (1996) y todos los costos que hicieron posible la realización de esta investigación, los asumió íntegramente el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) mediante el contrato No 093/96 con la Universidad Nacional de Colombia.

Bibliografía

- Alder, D. 1995. Growth Modelling for Mixed Tropical Forests. Oxford Forestry Institute, Forestry Research Programme, Tropical Forestry Paper N° 30, 231 p.

- Ash, J. 1983. Growth rings in *Agathis robusta* and *Araucaria cunninghamii* from tropical Australia. *Australian Journal of Botany* 31: 269-275.
- _____. 1985. Growth rings and longevity of *Agathis vitiensis* (Seemann) Benth. & Hook. f. ex Drake in Fiji. *Australian Journal of Botany* 33: 81-88.
- _____. 1986. Growth rings, age and taxonomy of *Dacrydium* (Podocarpaceae) in Fiji. *Australian Journal of Botany* 34: 197-205.
- Ashton, P.S., M. K. Hopkins, L. J. Webb, W.T. Williams & J. Palmer. 1980. El bosque natural: biología, regeneración y crecimiento de los árboles. En Unesco Cifca (eds.). *Ecosistemas de los Bosques Tropicales: Informe Sobre el Estado de los Conocimientos*, pp. 204 - 264. Paris.
- Bell, T. I. W. 1971. Management of Trinidad Mora Forest with Special Reference to Matura Forest Reserve. Forestry Division. Trinidad and Tobago. 70 p.
- Campos, D. 1996. Modelo logístico: un paradigma en la teoría del caos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* 20 (78): 503-518.
- Contreras, F., W. Cordero & J.C. Licona. 1996. Tiempos de paso para cuatro especies forestales de lomerío. Informe Interno Proyecto Belfor (Bolivia), 4 p.
- Chapman, D. G. 1961. Statistical problems in population dynamics. In Proc. Fourth Berkeley Symp. Math. and Prob. Univ. of Calif. Press, Berkeley.
- Dance, C. & O. J. Malleux. 1976. Estudios de una metodología para la determinación de edades en bosques naturales. *Revista Forestal del Perú* 6(1-2): 33-40.
- Del Valle, J. I. 1979. Curva preliminar de crecimiento del cativo (*Prioria copaifera*) en bosque virgen empleando el método de los tiempos de paso. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 32(2): 19-26.
- _____. 1985. Crecimiento del Roble (*Tabebuia rosea*) y del Cedro (*Cedrela odorata*) en la Región de Urabá, Antioquia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Medellín, 106 p.
- _____. 1986. La ecuación de crecimiento de von Bertalanffy en la determinación de la edad y el crecimiento de árboles tropicales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 39(1): 61-74.
- _____. 1993. Silvicultura y uso sostenido de los bosques: referencia especial a los guandales, Nariño. En Leyva, P. (ed.), *Colombia Pacífico*. Tomo II, pp. 692-713. Fondo Fen, Santafé de Bogotá.
- _____. 1994. Anotaciones sobre el clima de los bosques de *guanadal* del delta del río Patía. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 47 (1 y 2): 145 - 159.
- _____. 1995. Evaluación del crecimiento diamétrico de árboles de humedales forestales del Pacífico colombiano. *Interciencia* 20 (5): 273 - 282.
- _____. 1996a. Silvicultura en los bosques de *guanadal* del Pacífico Sur colombiano. En CIFOR Seminario-Taller "Experiencias Prácticas y Prioridades de Investigación en Silvicultura de Bosques Naturales en América Tropical". Center for International Forestry Research (Cifor), Pucallpa, Perú junio 17-21.
- _____. 1996b. Los bosques de *guanadal* del delta del río Patía (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 20(78): 475-489.
- Chauchard, L. M. 1993. Modelo de crecimiento individual del raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp. et Endl.) Oerst. *Revista de Agricultura, Piracicaba* 68 (fasc. 3): 247 - 267.
- Enright, M. J. & G. S. Harshorn. 1981. The demography of tree species in undisturbed tropical rain forests. In Borman, F. H. & G. Berlyn (eds.) *Age and Growth Rate of Tropical Trees: New Directions for Research*, pp. 107-120. Yale Univ. School of Forestry and Environmental Studies, Bulletin N° 94, New Haven.
- Foggie, A. 1945. On girth increment and age of trees with special reference to management in irregular tropical forest. *Empire Forestry Review* 24(2): 176-191.
- González, H. 1994. Generalización de un modelo determinístico para el análisis del crecimiento de organismos vivos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 47 (1 y 2): 89 - 98.
- Keay, R. W.J. 1961. Increment in the Okumi Forest Reserve, Benin, Nigeria. *Forestry Information Bulletin (New Series), IBADAN*, No. 11. 34 p.
- Lieberman, D. & M. Lieberman. 1985. Simulation of growth curves from periodic increment data. *Ecology* 66:632-635.
- Luna, A. 1981. Estudio preliminar sobre el crecimiento y edad del pino lazo *Podocarpus rospigliosii* P. en el bosque San Eusebio, Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana (Venezuela)* 1:19-32.
- Manokaran, N. & M.D. Swaine. 1994. Population Dynamics of Trees in Dipterocarp Forests of Peninsular Malaysia. Forest Research Institute, Malaysia, *Malayan Forest Records* N° 40, Kuala Lumpur, 173 p.
- Medina, E. & P. Minchin. 1980. Stratification of ^{13}C values in Amazonian forests. *Oecologia* 45: 377-378.
- Meijer, H. A. J., J. van der Plicht, J. S. Gislefoss & R. Nydal. 1995. Comparing long-term atmospheric ^{14}C and ^3H records near Groningen, the Netherlands with Fruholmen, Norway and Izaña, Canary Islands ^{14}C Stations. *Radiocarbon* 37 (1): 39-50.
- Miller, R. G. 1952. A girth increment study of *Baikiaea plurijuga* in Northern Rhodesia. *Empire Forestry Review* 31(1): 42-45.
- Misra, R. 1974. Determination of age of trees in natural tropical deciduous forest of Chalkia. *Tropical Ecology (India)* 15 (1-2): 43-52.
- Moreno, F. H. 1996. Fotosíntesis y crecimiento en plántulas de sajo (*Camposperma panamensis*) y cuángare (*Otoba gracilipes*) bajo diferentes ambientes lumínicos. Tesis Magister en Silvicultura y Manejo de Bosques, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 144 p.
- Ogden, J. 1981. Dendrochronological studies and the determination of tree ages in Australian tropics. *Journal of Biogeography* 8: 405-420.
- Osumi, S. & Y. Ishikawa. 1983. Applicability of the Richards growth function to analysis of growth of trees. Laboratory of Forest Management, Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural Univ., Kyoto, Japan, Scientific Report 35: 49-76.

- Prince, A. J.** 1973. The rate of growth of Green Heart (*Ocotea rodiaei*). Commonwealth Forestry Review **52**(2): 143-146.
- Rai, S. N.** 1980. Diameter increment of *Terminalia paniculata* and *Lagerstroemia lanceolata*. Indian Forester **106**(12): 856-864.
- Richards, F. J.** 1959. A flexible growth function for empirical use. Journal of Experimental Botany **10**(29): 290-300.
- Stuiver, M.** 1978. Atmospheric CO₂ related to carbon reservoir changes. *Science* **199**: 253 - 258.
- Stuiver, M., A. de Luca Rebello, J. C. White & W. Broecker.** 1981. Isotopic indicators of age/ growth in tropical trees. In Bormann, F. H. & G. Berlyn (eds.) Age and growth Rate of Tropical Trees: New Directions for Research, pp. 75-82. Yale Univ., School of Forestry and Environmental Studies, Bulletin N° 94, New Haven.
- Tamers, M. & D. G. Hood.** 1997. Analytical procedures and final report. Beta Analytic Inc, Radiocarbon Dating Service, 7 p.
- Van Daalen, J. C., J. C. Vogel., F. S. Malan. & A. Fuls.** 1992. Dating *Pterocarpus angolensis* trees. South African Forestry Journal N° 162: 1-7.
- Van der Plicht, J. & W. G. Mook.** 1987. Automatic radiocarbon calibration: illustrative examples. *Paleohistoria* **29**: 173-182.
- Vásquez, G. L.** 1988. Crecimiento de un bosque de guandal explotado en el litoral Pacífico colombiano. *Crónica Forestal y del Medio Ambiente (Medellín)* **5**: 35-62.
- Vogel, J. C., A. Fuls, E. Visser & B. Becker.** 1993. Pretoria calibration curve for short lived samples. *Radiocarbon* **35**(1): 73-86.
- Von Bertalanffy, L.** 1976. *Teoría General de Sistemas*. Trad. Del inglés por J. Almeda, Fondo de Cultura Económica, México.
- Whitmore, T. C.** 1975. Tropical Rain Forests of the Far East. Clarendon Press, Oxford, 282 p.
- Worbes, M.** 1985. Structural and other adaptations to long-term flooding by trees in Central Amazonia. *Amazoniana* **9**(3): 459-484.
- _____. 1995. How to measure growth dynamics in tropical trees. A review *Iawa-Journal*. **16**(4): 337 - 351
- Worbes, M & W.F. Junk.** 1989. Dating tropical trees by means of ¹⁴C from bomb test. *Ecology* **70** (2): 503-507.
- Worbes, M., H. Klinge, J. D. Revilla & M. Christopher.** 1992. On the dynamics, floristic subdivision and geographical distribution of várzea forests in Central Amazonia. *Journal of Vegetation Science* **3**: 553-564.

UNA APLICACION DEL ANALISIS DE VARIANZA DE MEDIDAS REPETIDAS EN UN EXPERIMENTO CON METALES PESADOS

Por

Ramón Giraldo H^{*1}. & Néstor Hernando Campos^{**2}

Resumen

Giraldo, R. & N. H. Campos: Una aplicación del análisis de varianza de medidas repetidas en un experimento con metales pesados. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(81): 467-472, 1997. ISSN: 0370-3908.

Se presenta una revisión, dentro de un contexto ecológico, de conceptos relacionados con el análisis de varianza de medidas repetidas. Se discuten aspectos tales como el tipo de experimentos en los que la técnica es aplicable, las hipótesis de interés y su preferencia sobre otras técnicas tradicionales como regresión y análisis de varianza convencional. Como un ejemplo, la técnica fue aplicada a un experimento llevado a cabo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia, en el cuál se midió la concentración de cadmio $\mu\text{g/g}_{p,s}$ en hojas de mangle negro *Avicennia germinans* en varias estaciones de monitoreo y a través de varios intervalos en la toma de muestras.

Palabras claves: Análisis de varianza, medidas repetidas, *Avicennia germinans*, metales pesados.

Abstract

A revision of some basic concepts related to the analysis of variance of repeated measures is presented within an ecological context. Topics such as the types of experiments in which the technique is applicable, the hypotheses of interest, and its preference over other traditional techniques such as regression and conventional analysis of variance, are discussed. As an example, the technique was successfully applied to an experiment carried out at Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia, in which the concentration of cadmium $\mu\text{g/g}_{p,s}$ in leaves of the black mangrove *Avicennia germinans* was measured in several monitoring stations and throughout several sampling intervals representing seasons.

Key words: Analysis of variance, measures repeated, *Avicennia germinans*, heavy metals.

* Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR, A. A. 1016, Santa Marta, Colombia. e-mail. rgiraldo@santamarta.cetcol.net.co

** Inst. Cien. Nat., Universidad Nacional de Colombia, c/o INVEMAR, A A. 1016 Santa Marta, Colombia. e-mail nhcampos@ciencias.ciencias.unal.edu.co ó nhcampos@santamarta.cetcol.net.co

Introducción

Hay muchas situaciones en las cuales los ecólogos toman medidas repetidas sobre el mismo individuo, la misma unidad experimental, o el mismo sitio de observación. Probablemente la situación más común se presenta algunas características son medidas en diferentes tiempos. Por ejemplo, se puede estar interesado en cómo el peso del cuerpo, tamaño de la planta, tamaño de la población, nivel de un nutriente o un contaminante, cambian en el tiempo para diferentes poblaciones, sitios o tratamientos experimentales. En todos estos casos hay un interés explícito en el patrón de respuesta sobre el tiempo (von Ende, 1993).

Los resultados de experimentos como los mencionados arriba son en muchas ocasiones, analizados mediante gráficos simples y en otras oportunidades por medio de análisis univariados de varianza (ANOVA) o de regresión. La presentación gráfica ignora información potencialmente disponible concerniente a la tendencia sobre el tiempo o a la comparación de las tendencias de los diferentes tratamientos. Así mismo cuando se aplican análisis de varianza o de regresión tradicionales (Sokal & Rohlf, 1981) a estos experimentos, es frecuente que se violen algunos supuestos fundamentales de los análisis univariados (Gurevitch & Chester, 1986). Las técnicas anteriores además de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, requieren que las medidas tomadas sean independientes (Moser *et al.*, 1990). La violación de este supuesto conduce a estimaciones incorrectas de los cuadrados medios y de los valores F y por consiguiente a pruebas de hipótesis no confiables (Underwood, 1981; Draper & Smith, 1981; Fox, 1984).

En experimentos como los mencionados en el primer párrafo, en los que se realizan medidas en diferentes períodos de tiempo sobre la misma unidad experimental (experimentos de medidas repetidas), se tendrán datos completamente correlacionados (Underwood, 1981). Diseños experimentales con este tipo de estructura, requieren del uso de algunos análisis de varianza "especiales", como el análisis de varianza multivariado (MANOVA) o el análisis de varianza de medidas repetidas (Hair *et al.*, 1995).

Materiales y Métodos

En este artículo se sigue paso a paso el algoritmo del análisis de varianza de medidas repetidas presentado en

Tabla 1. Medidas de concentración de cadmio $\mu\text{g/g}_{\text{ps}}$ en muestras de 2 tipos de hojas de *Avicennia germinans* en cada una de cuatro estaciones de monitoreo del sistema CGSM y una estación de Bahía de Chengue y para cuatro épocas climáticas. CC= Caño Clarín; CG= Caño Grande; CH=Bahía de Chengue; RJ=Rincón del Jaguey; RS=Río Sevilla. Cada medida es el promedio de 5 hojas.

Estación	Tipo Hoja	Epoca Climática			
		Seca Mayor	Seca Menor	Lluviosa Menor	Lluviosa Mayor
CC	Joven	9,26	2,51	0,93	0,57
CC	Vieja	10,56	1,32	0,95	0,48
CG	Joven	7,65	2,80	1,08	0,65
CG	Vieja	7,74	1,41	1,22	0,67
CH	Joven	6,05	2,38	1,05	0,45
CH	Vieja	9,86	1,88	8,45	0,59
RJ	Joven	6,78	1,95	1,07	0,65
RJ	Vieja	6,97	3,66	1,36	0,84
RS	Joven	12,84	2,50	1,72	0,43
RS	Vieja	6,93	2,16	1,00	0,62

Gurevitch & Chester (1986) en un experimento en el que se midió la concentración de cadmio $\mu\text{g/g}_{\text{ps}}$ en hojas del mangle negro *Avicennia germinans* recolectadas en parcelas ubicadas en cuatro estaciones de monitoreo del ecosistema lagunar estuarino Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) y en una estación control ubicada en el ecosistema costero Bahía de Chengue, Costa Caribe colombiana (IGAC, 1973). Las mediciones fueron realizadas trimestralmente entre los meses de marzo y diciembre de 1993, cubriéndose así las cuatro épocas climáticas que rigen en la zona (seca mayor, lluviosa menor, seca menor, lluviosa mayor). En cada estación de observación se realizaron medidas en diez hojas (cinco jóvenes y cinco viejas) de *A. germinans* seleccionadas aleatoriamente de la parcela ubicada en cada una de ellas. Las cinco medidas de cada tipo de hoja fueron promediadas obteniéndose por consiguiente una sola medida para cada estación en cada época climática (Tabla 1). En este caso la unidad experimental es una parcela y las unidades de muestra son las cinco hojas seleccionadas aleatoriamente. Si bien las observaciones no son obtenidas en las mismas unidades de muestra (en cada época hay una extracción al azar de hojas), se considera que existe una estructura de dependencia o correlación entre las observaciones experimentales (promedio asignado a la parcela en cada época). Teniendo en cuenta lo anterior, se asumió que este diseño se ajusta a un experimento de medidas repetidas sin répli-

cas, con tres factores de interés: estación, tipo de hoja y época climática (factor de medidas repetidas).

En este caso existen cuatro hipótesis de interés: (1) Existen diferencias entre las estaciones con respecto a la concentración promedio de cadmio $\mu\text{g/g}_{p.s.}$ encontrada en hojas de *A. germinans*; (2) Existen diferencias entre las hojas jóvenes y las hojas viejas de *A. germinans* con respecto a la concentración promedio de cadmio $\mu\text{g/g}_{p.s.}$ encontrada en ellas; (3) La concentración de cadmio $\mu\text{g/g}_{p.s.}$ de las hojas de *A. germinans* cambia en el sistema a través de las diferentes épocas climáticas; (4) La tendencia mencionada en el numeral 3 difiere entre las estaciones.

La técnica empleada para probar las hipótesis anteriores, consiste en generar para cada unidad experimental (cada parcela) una suma ponderada de las mediciones obtenidas en cada época climática, realizando posteriormente con dichas sumas análisis de varianza convencionales (Sokal & Rohlf, 1981). En el caso de las dos primeras hipótesis los coeficientes ponderadores de cada medición son iguales a uno y en las dos restantes se requiere el uso de polinomios ortogonales para generar los coeficientes de ponderación (Steel & Torrie, 1985). Los polinomios ortogonales son utilizados en modelos lineales como un método de transformación de la matriz de diseño, de forma tal que se obtengan columnas independientes (Draper & Smith, 1981). Si el número de niveles del factor de medidas repetidas es n , se pueden realizar $(n-1)$ pruebas de hipótesis independientes (contrastes ortogonales), correspondientes al ajuste de polinomios de grado 1, 2, ..., $(n-1)$ (Graybill, 1961). Para el caso del experimento de estudio se cuenta con cuatro niveles en el factor de medidas repetidas, debido a lo cual, utilizando como ponderadores los coeficientes de la tabla 2, se generaron cuatro nuevas variables correspondientes a las sumas ponderadas (total y de tendencias

Tabla 2. Coeficientes para comparaciones ortogonales (independientes) con 4 tratamientos igualmente espaciados (épocas climáticas).

Grado del Polinomio	Contraste	Coeficientes del factor época climática			
		Seca Mayor	Seca Menor	Lluviosa Menor	Lluviosa Mayor
	Total	1	1	1	1
1	Lineal	-3	-1	1	3
2	Cuadrático	1	-1	-1	1
3	Cúbico	-1	3	-3	1

Tabla 3. Variables generadas como sumas ponderadas de los valores de cadmio $\mu\text{g/g}_{p.s.}$ observados en hojas jóvenes y viejas de *Avicennia germinans* en 5 estaciones para cuatro épocas climáticas utilizando como ponderadores los coeficientes de los polinomios ortogonales. Códigos de las estaciones como en la tabla 1.

Estación	Tipo Hoja	Total	Lineal	Cuadrático	Cúbico
CC	Joven	13,27	-27,65	6,39	-3,95
CC	Vieja	13,31	-30,61	8,77	-8,97
CG	Joven	12,18	-22,72	4,42	-1,84
CG	Vieja	11,04	-21,40	5,78	-6,50
CH	Joven	9,93	-18,13	3,07	-1,61
CH	Vieja	20,78	-21,24	0,12	-28,98
RJ	Joven	10,45	-19,27	4,41	-3,49
RJ	Vieja	12,83	-20,69	2,79	0,77
RS	Joven	17,49	-38,01	9,05	-10,07
RS	Vieja	10,71	-20,09	4,39	-2,83

lineal, cuadrática y cúbica) de las observaciones de cada parcela en cada una de las épocas climáticas (tabla 3). Con cada una de dichas variables se realizó un análisis de varianza en dos vías sin réplicas (tabla 4). El valor F asociado con la fuente estación en la tabla de análisis de varianza generada con la variable obtenida como una suma simple de las mediciones de las diferentes épocas, permitió probar la primera de las hipótesis arriba planteadas. La segunda hipótesis de interés fue probada mediante el cálculo del valor F para la fuente de variación conocida como gran media o media total (Gurevitch & Chester, 1986). Este valor se obtuvo como el cociente entre el cuadrado medio del contraste (cuadrado de la suma total de las sumas ponderadas dividido sobre el número total de éstas) y el cuadrado medio del error de este mismo. Cabe anotar que en este caso la suma de cuadrados del contraste y el cuadrado medio del contraste son iguales puesto que se cuenta con un sólo grado de libertad. El valor F asociado con la media total prueba cuando todas las medias son iguales a cero. Tradicionalmente ésto se omite de las tablas de análisis de varianza; sin embargo, en este caso probar la hipótesis de que todas las medias son iguales a cero, es equivalente a probar la hipótesis de tendencias (lineal, cuadrática, y cúbica) iguales a cero, lo que indicaría que los valores medidos no cambian durante el curso del experimento (Gurevitch & Chester, 1986). De otro lado, los valores

Tabla 4. Análisis de varianza de medidas repetidas para comparar las concentraciones de cadmio $\mu\text{g/g p.s.}$ en hojas de *Avicennia germinans* obtenidas en cuatro estaciones de la CGSM y una de Bahía de Chengue durante cuatro épocas climáticas.

a. Prueba de hipótesis para efectos entre estaciones (contraste total).

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Pr > F
Estación	4	20.84	5.2119	0.253	0.8943
Tipo Hoja	1	2.86	2.8622	0.139	0.7321
Error	4	82.46	20.6165		
Total	9	106.17			

b. Análisis de tendencias (contraste lineal)

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Pr > F
Media Total	1	5750.88	5750.88	145.7	0.0003
Estación	4	180.72	45.18	1.14	0.4494
Tipo Hoja	1	13.80	13.80	0.35	0.5919
Error	4				

c. Análisis de tendencias (contraste cuadrático)

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Pr > F
Media Total	1	241.96	241.96	56.06	0.0001
Estación	4	46.29	11.57	2.68	0.1813
Tipo Hoja	1	3.01	3.01	0.69	0.4588
Error	4	7.26	4.31		

d. Análisis de tendencias (contraste cúbico)

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Pr > F
Media Total	1	455.22	455.22	4.95	0.0902
Estación	4	217.79	54.44	0.59	0.6881
Tipo Hoja	1	65.28	65.28	0.71	0.4470
Error	4	368.01	92.00		

de F asociados con las fuentes estación y tipo de hoja en los contrastes lineal, cuadrático y cúbico permiten determinar si existe diferencia entre tendencias de cambio a través del tiempo de las cinco estaciones y de los dos tipos de hojas, respectivamente.

Resultados y Discusión

Los contenidos más altos de cadmio en *A. germinans*, se presentaron durante la primera toma de muestras en las cinco estaciones. El valor máximo (9.88 mg/g p.s.) fue medido en las estaciones del Río Sevilla. A partir de la segunda toma de muestras, después de una notoria disminución en los contenidos, éstos continuaron disminuyendo en las estaciones de la CGSM, hasta encontrar durante el mes de diciembre, los valores más bajos (0.52 mg/g p.s. en la estación del Rincón del Jagüey) (Fig. 1). A pesar de que el comportamiento del metal en la estación de la Bahía de Chengue fue similar al mostrado en

las estaciones de la CGSM, los contenidos presentaron un incremento notable en la tercera toma de muestras, contrariamente a lo observado en las estaciones restantes, en las cuales los contenidos continuaron bajando (**Campos y Gallo**, en prensa).

Los resultados del análisis de varianza obtenidos después de aplicar la metodología anteriormente expuesta al experimento de estudio (tabla 4), indican en primera instancia, de acuerdo con el nivel de significancia asociado a las fuentes estación y tipo de hoja en la tabla 4a ($\alpha > 10\%$), que la concentración promedio de cadmio mg/g p.s. encontrada en hojas de *A. germinans* no difiere significativamente entre las estaciones y los tipos de hojas considerados. Así mismo, con respecto a las restantes hipótesis de interés, es posible afirmar de acuerdo con el nivel de significancia asociado a la fuente media total ($\alpha < 10\%$) en los diferentes contrastes (tabla 4b, 4c, 4d), que existe un cambio significativo lineal y cuadrático en

la concentración de cadmio a través de las épocas climáticas y que este patrón de comportamiento no es significativamente diferente entre las estaciones o tipos de hojas. Esto último se deduce del nivel de significancia asociado con la fuente estación ($\alpha > 10\%$) para los contrastes lineal cuadrático y cúbico (tabla 4b, 4c, 4d). Las conclusiones anteriores son evidentes en el gráfico de concentración promedio de cadmio contra época (figura 1), en el que se observa que, con excepción de la estación Bahía de Chengue, la concentración de cadmio presenta una disminución a través de las épocas. La concentración más alta se encontró en la época seca mayor con valores promedios entre 6 y 10 $\mu\text{g Cd/g}_{\text{p.s}}$ y los valores mínimos se hallaron hacia el final del año en la época lluviosa mayor con concentraciones promedios cercanas a 1 $\mu\text{g Cd/g}_{\text{p.s}}$.

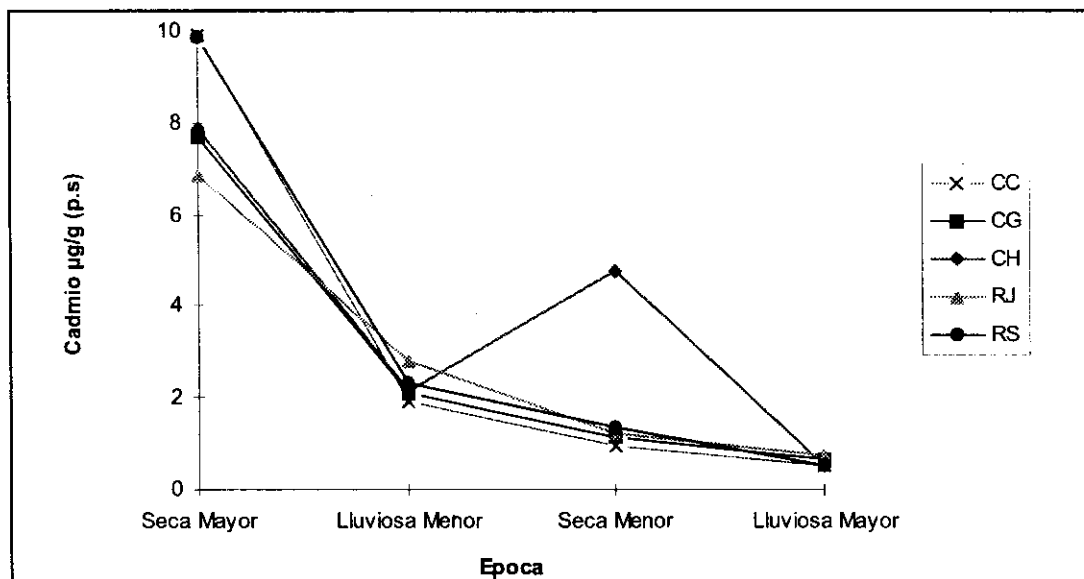
Resumiendo el análisis podemos afirmar que la concentración de cadmio en hojas de *A. germinans* presenta magnitudes similares en los sitios considerados. Además, dicha concentración varía significativamente con respecto a la época climática, dándose las diferencias más drásticas entre las épocas más extremas (seca mayor y lluviosa mayor). Esta diferencia podría ser explicable en el sistema CGSM, por el efecto de dilución que provoca la entrada de agua dulce en los meses de lluvias intensas, lo que a su vez logra disminuir la disponibilidad de metales al formar complejos con el material suspendido (Moore

& Ramamoorthy, 1984; Salomons et al., 1988; Silva et al., 1990). Así mismo en esta época se presentan incrementos en el pH que favorecen la adsorción de metales en el sedimento (Moore & Ramamoorthy, 1984), lo que explica el comportamiento del metal en la estación Bahía de Chengue en donde se esperaban valores de cadmio menores a los hallados en las estaciones de la CGSM, por estar ésta expuesta a una menor descarga de aguas lluvias. La concentración alta que se presentan en la estación RS durante el período seco mayor, refleja principalmente, los aportes de agua dulce provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta a través del Río Sevilla durante la época de lluvias precedentes. Durante la mezcla estuarina este metal puede precipitar con iones de fosfato o sulfitos o en ausencia de ellos puede estar disponible como Cd^{+2} y formar un complejo con material orgánico para poder ser transportado; no obstante en esta forma puede ser muy inestable (Moore y Ramamoorthy, 1984). Cuando se eleva la salinidad por la disminución de agua dulce en la CGSM a finales de diciembre (Campos, 1990), la forma bivalentes Cd^{+2} se hace presente (Moore y Ramamoorthy, 1984).

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR, al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología COLCIENCIAS

Figura 1. Concentración promedio de cadmio $\mu\text{g/g}_{\text{p.s}}$ en hojas de *Avicennia germinans* en cuatro épocas climáticas para diferentes tratamientos (sitios de monitoreo). Los promedios fueron calculados en cada época y sitio combinando las mediciones de hojas jóvenes y viejas. Para los códigos de las estaciones ver la tabla 1.



y a la facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo financiero brindado.

Bibliografía

- Campos, N.H.**, 1990. La contaminación por metales pesados en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Caldasia* **16** (77): 231-244.
- _____ & **M. C. Gallo**. 1997. Contenidos de Cd, Cu y Zn en *Rhizophora mangle* y *Avicennia germinans* de la Ciénaga Grande de Santa Marta y Bahía de Chengue, costa caribe colombiana. *Rev. Acad. Col. Cienc. Exact. Nat.*, **21** (79) : 73 - 90.
- Draper, N. R. & H. Smith**. 1981. Applied regression analysis. Second edition. John Wiley and Sons, New York, 709 p.
- Ende, C. N. von**. 1993. Repeated measure analysis: Growth and other time-dependent measures 6: 113-137. En: S. M. Scheiner and J. Gurevitch, (E). Design and analysis of ecological experiments. Chapman and Hall, New York, 445 p.
- Fox, J.** 1984. Linear statistical models and related methods with applications to social research. John Wiley and Sons, New York, 449 p.
- Graybill, F.** 1961. An introduction to linear statistical models, Vol. I. McGraw-Hill, New York, 463 p.
- Gurevitch, J. & S. T. Chester**. 1986. Analysis of repeated measures experiments. *Ecology*, **67**(1): 251(55).
- Hair, J. F., R. E. Anderson, R. L. Tatham & W. C. Black**. 1995. Multivariate data analysis with readings, fourth edition. Prentice Hall, New Jersey, 745 p.
- IGAC**. 1973. Monografía del Departamento del Magdalena. Inst. Geogr. Agustín Codazzi, Bogotá, 162 p.
- Moore, J. W. & S. Ramamoorthy**. 1984. Heavy metals in natural waters. Springer-Verlag, New York, 223 p.
- Moser, E. B., A. M. Saxton & S. R. Pezeshki**. 1990. Repeated measures analysis of variance: Application to tree research. *Can. J. For. res.*, **20**: 524 (35).
- Salomons, W., H. Kerdijk, H. Van Pagee, R. Klomp & A. Schreur**. 1988. Behaviour and impact assessment of heavy metals in estuarine and coastal zones: 157-198. En: U. Seeliger, L. D. de Lacerda y S. R. Patrchineelam (E). Metal in coastal environments of Latin America, Springer-Verlag, Berlin, 297 p.
- Silva C. A. R., L. D. Lacerda & C. E. Rezende**. 1990. Metals reservoir in a red mangrove forest. *Biotropica*, **22** (4): 339 - 345.
- Sokal, R. R. & F. J. Rohlf**. 1981. Biometry. The principles and practice of statistics in biological research, second edition. W. H. Freeman and Co., San Francisco, 859 p.
- Steel, R. G. D. & J. H. Torrie**. 1985. Bioestadística principios y procedimientos, segunda edición. McGraw-Hill, México, 622 p.
- Underwood, A. J.** 1981. Techniques of analysis of variance in experimental marine biology and ecology. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **19**: 513-605.

ECOLOGIA DE LOS MURCIÉLAGOS ANTOFILOS DEL SECTOR LA CURIA, SERRANIA LA MACARENA (COLOMBIA)

por

Yaneth Muñoz-Saba*, Alberto Cadena**, J. Orlando Rangel-Ch.***

Resumen

Muñoz-Saba Y., A. Cadena & J.O. Rangel: Ecología de los murciélagos antofilos del sector La Curia, Serranía La Macarena (Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(81): 473-486, 1997. ISSN: 0370-3908.

Las especies de murciélagos antófilos (visitantes de las flores) del Sector La Curia, Serranía La Macarena (Colombia) son *Artibeus jamaicensis*, *A. lituratus*, *A. obscurus*, *Glossophaga soricina*, *Carollia perspicillata*, *Sturnira lilium*, *Uroderma bilobatum* y *U. magnumstrum*. La dieta de estas especies se compone de 83% de frutos, 8% de insectos y 9% de néctar-polen. Los hallazgos de granos de polen de las familias Compositae, Myrtaceae, Gramineae y Euphorbiaceae en las heces y en los contenidos estomacales de los individuos examinados constituyen registros nuevos de plantas visitadas por murciélagos. Estas plantas no presentan las estrategias de la quiropterofilia, sino por el contrario evidencian síndromes de anemofilia, entomofilia y ornitofilia.

Palabras claves: Murciélagos, ecología, quiropterofilia, néctar, polen, Serranía La Macarena, Colombia.

Abstract

Bats species foraging on pollen and nectar in the La Curia region, Serrania La Macarena (Colombia), include *Artibeus jamaicensis*, *A. lituratus*, *A. obscurus*, *Glossophaga soricina*, *Carollia perspicillata*, *Sturnira lilium*, *Uroderma bilobatum* and *U. magnumstrum*. The diet of these species is composed of 83% fruits, 8% insects and 9% nectar and pollen. Findings of pollen grains from the families Compositae, Myrtaceae, Gramineae and Euphorbiaceae represent new reports of plants visited by bats. These plants lack chiropterophilic strategies, but, they evidence anemophilous, entomophilous and ornitophilous pollination syndromes.

Key words: Bats, ecology, chiropterophilic, nectar, pollen, Serrania La Macarena, Colombia.

* Instituto Alexander von Humboldt. A.A. 77038, Bogotá 2, D.C. Fax: 987-320 792. Colombia.

** E-mail: acadena@ciencias.ciencias.unal.edu.co.

*** E-mail: jerangel@ciencias.ciencias.unal.edu.co Instituto de Ciencias Naturales (ICN), Universidad Nacional de Colombia. A.A. 7495. Fax: 571-316 53 65. Colombia.

Introducción

Sánchez-Palomino et al. (1993) registraron para el Sector La Curía, Serranía La Macarena 44 especies de murciélagos pertenecientes a las familias Emballonuridae, Vespertilionidae y Phyllostomatidae. Dentro de esta última se encuentran las subfamilias Carollinae, Desmodinae, Glossophaginae, Phyllostominae y Stenoderminae. Hay variación estacional en la presencia de representantes de estas subfamilias, con excepción de las especies de Carollinae y Stenoderminae, que son constantes. Los murciélagos que consumen recursos florales (néctar y/o polen) son miembros de los géneros *Artibeus*, *Sturnira* y *Uroderma* (Stenoderminae), *Carollia* (Carollinae), *Glossophaga* (Glossophaginae), *Lonchophylla* y *Lionycteris* (Lonchophyllinae). En este trabajo se caracteriza la estructura trófica de los murciélagos consumidores de néctar y polen del sector La Curía, Serranía La Macarena (Colombia) y se registran nuevas plantas consumidas por estos murciélagos.

Generalidades de la zona de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Sector La Curía, parte norte de la Serranía La Macarena, Colombia (3° 18'N, 73° 57'W) entre 450 y 500 m de altura (fig.1). La Macarena presenta formaciones geológicas del Mesozoico y Paleozoico y está atravesada por fallas verticales que pueden ser de origen anterior al plegamiento de las cordilleras andinas (**Oppenheim**, 1941). En el extremo norte, se encuentran rocas sedimentarias cubiertas de areniscas gruesas sin fósiles, que pertenecen al Devónico (**Sánchez** et al., 1990).

En la estación meteorológica La Macarena (350 m) la temperatura promedio es 25.9°C y la precipitación media mensual es 196.2 mm. El régimen de distribución de las lluvias es unimodal, el periodo de alta precipitación va entre abril y octubre con el valor máximo en junio. La temporada seca va de noviembre a marzo y la transición de la época seca a la de lluvias se presenta entre marzo y abril. Octubre y noviembre son meses de transición entre la época de lluvias y la época seca (**Rangel-Ch.** et al., 1995).

La Serranía La Macarena ha sido señalada por **Koopman** (1982) como un sitio donde convergen la flora y fauna de tres zonas biogeográficas: la llanura amazónica, la vertiente oriental del norte de Los Andes y la Orinoquia. Para la zona de estudio se reconocieron tres tipos de hábitats en donde se hicieron las observaciones y se tomaron las muestras.

1. Sabana: Compuesta principalmente de gramíneas con una altura hasta de 60 cm, entre las cuales dominan *Axonopus pulcher*, *Trachypogon plumosus* y *Andropogon leucostachyus*. Se encuentran también algunas especies arbustivas de *Hyptis* (Labiatae) y de *Miconia* (Melastomataceae). Dentro de la sabana se encuentran parches de vegetación arborecente con un dosel de 10 a 15 m de alto, en donde las especies más frecuentes son *Didymopanax* (Schefflera) *morototoni*, *Erythroxylum macrophyllum*, *Jacaranda caucana*, *Pera arborea*, *Raimondia cherimolioides*, *Vismia macrophylla* y *Xylopia aromatica*.

2. Bosque de Galería: Vegetación con más de 20 m de altura; se diferenciaron cinco estratos. En el herbáceo, las especies dominantes pertenecen a los géneros *Ruellia* (Acanthaceae), *Pera* (Euphorbiaceae), *Stylosanthes* (Fabaceae), *Sinningia* (Gesneriaceae), *Heliconia* (Heliconiaceae), *Hyptis* (Labiatae) y *Lantana* (Verbenaceae).

En el estrato arbustivo predominan especies de *Clusia* (Clusiaceae), *Hirtella* (Chrysobalanaceae), *Davilla* (Dilleniaceae), *Siparuna* (Monimiaceae), *Piper* (Piperaceae), *Polygala* (Polygalaceae) y de *Miconia* (Melastomataceae). En el estrato subarbóreo, predominan especies de *Inga* (Mimosaceae) y *Cassia* (Caesalpinaceae). En el estrato arbóreo tanto inferior como superior, se establecen especies de *Fusaea* (Annonaceae), *Nectandra* (Lauraceae), *Machaerium* (Fabaceae), *Cecropia* (Cecropiaceae) e *Inga* (Mimosaceae). La topografía del terreno varía entre ondulada y plana. En este hábitat se observó una fuerte actividad antrópica, representada en tala y quemas.

3. Bosque Secundario: Vegetación también con cinco estratos. En el herbáceo, las especies más frecuentes pertenecen a los géneros *Senna* (Caesalpinaceae), *Mimosa* (Mimosaceae), *Mikania* (Compositae), *Miconia* (Melastomataceae) y *Davilla* (Dilleniaceae). En el estrato arbustivo se encuentran representantes de las familias Myrsinaceae, Myrtaceae, Sapotaceae, Rubiaceae, Melastomataceae e Hypericaceae. En el estrato subarbóreo, se encuentran especies de géneros como *Inga* (Caesalpinaceae), *Miconia* (Melastomataceae), *Bunchosia* (Malphiaceae) y *Cassia* (Caesalpinaceae) y en el arbóreo inferior de *Bunchosia* (Malphiaceae). Esta zona ha sido alterada por las quemas y la deforestación causada por los colonos de la región.

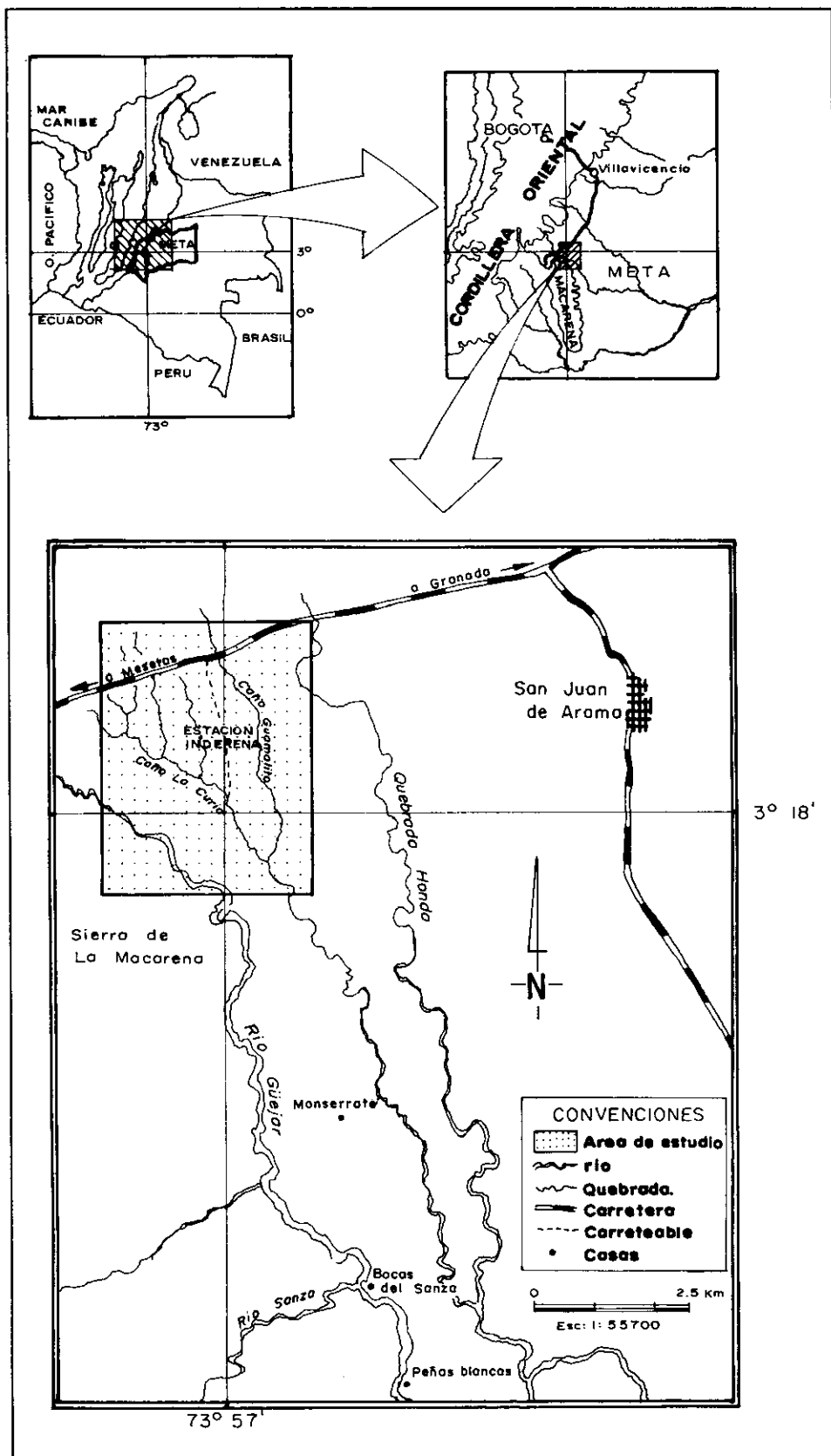


Figura 1. Ubicación de la Serranía La Macarena, (Meta, Colombia).

Metodología

La zona de estudio fue visitada durante 1991 y 1992. Se tomaron muestras en la época de lluvias (julio), en la transición de la temporada de lluvias a la temporada seca (octubre), en la época seca (febrero) y en el inicio de la época de lluvias (mayo). El registro duró 37 noches y se llevó a cabo desde las 17:00 hasta las 24:00 horas, lo cual equivale a 201 horas de estudio (tabla 1). La captura de murciélagos se realizó con mallas de niebla (12 m x 7 m). A todos los ejemplares capturados se les colectó el polen del pelo según la técnica de **Beattie** (citado por **Thomas**, 1988). Aunque se registraron 18 especies de murciélagos (tabla 2) para el estudio sólo se tuvieron en cuenta ocho. Se capturaron 273 individuos, se marcaron 221 (81%) con un anillo en el antebrazo y luego se liberaron, de estos solamente un individuo fue recapturado. De los individuos colectados 52 (19%) fueron preservados en alcohol al 70% al igual que sus heces y sus contenidos estomacales.

La totalidad de las heces y de los contenidos estomacales se vertieron sobre una caja de petri con una mezcla de agua y alcohol y se separaron los componentes macroscópicos; sus proporciones se estimaron de acuerdo con una escala porcentual en papel milimetrado que se colocó por debajo de la caja, procedimiento que sigue las recomendaciones de **Kurhy** (1988). Se consideraron dos componentes fácilmente distinguibles: frutos, semillas e insectos y uno no diferenciable que se denominó "parte blanda" (restos de frutos + néctar-polen), de la cual se observaron muestras bajo el microscopio para detectar la presencia de granos de polen. Para el análisis palinológico (microrestos) se empleó el procedimiento

Tabla 1. Parámetros del proceso de toma de muestras en la comunidad de murciélagos consumidores de néctar-polen. Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992.

	Julio	Octubre	Febrero	Mayo	Total
Noches de registro	10	9	9	9	37
Horas de registro	50	63	40	48	201
Mallas totales	29	27	24	24	104
Individuos capturados	90	77	28	78	273
Individuos liberados	82	73	16	50	221
Individuos colectados	8	4	12	28	52
Esfuerzo de captura (Horas x malla/noche)	145	189	107	128	565
Exito de captura (Individuos/horas-mallas %)	62	41	26	61	48

Tabla 2. Especies de murciélagos capturadas en el Sector La Curía, Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992.

Artibeus cinereus
Artibeus jamaicensis *
Artibeus lituratus *
Artibeus obscurus *
Carollia brevicauda
Carollia perspicillata *
Eptesicus brasiliensis
Glossophaga soricina *
Lonchorhina aurita
Micronycteris minuta
Phyllostomus discolor
Platyrrhinus helleri
Saccopteryx leptura
Sturnira lilium *
Tonatia bidens
Tonatia brasiliensis
Uroderma bilobatum *
Uroderma magnirostrum *

* Consumidoras de néctar-polen

de **Erdtman** (1969). Sólomente los granos de polen encontrados tanto en el pelo como en los contenidos estomacales y en las heces se tuvieron en cuenta para el cálculo de las frecuencias absolutas.

Al porcentaje del componente "parte blanda" se le restó la frecuencia relativas de granos de polen y lo restante se le sumó al porcentaje de frutos. Cuando no se encontraron granos de polen, se consideró al componente "parte blanda" como restos de frutos (tablas 3, 4).

Con estos datos se estableció la estructura trófica (ET) de las especies de murciélagos antófilos, así:

$$ET_x = \frac{\sum_{j=1}^N \% \text{ del recurso } j, \text{ consumido por la especie de murciélagos } x}{\text{No. total de individuos analizados en la especie de murciélagos } x}$$

donde:

ET_x: Estructura trófica de la especie de murciélagos x

j: Recurso consumido: Frutos, insectos, néctar-polen

Para hallar la estructura trófica de la comunidad de murciélagos antófilos se sumó el porcentaje de cada uno de los recursos consumidos por cada especie y se dividió por el número total de especies.

Tabla 3. Porcentaje de «parte blanda» y granos de polen registrados para la comunidad de murciélagos consumidores de néctar-polen.

Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992. N= 131 individuos.

Especie	No. campo	Parte blanda*	Polen**	Polen***
<i>A. jamaicensis</i>	SN-28	100	5	16
	132	100	16	52
	141	100	2	6.5
	148	100	1	3
	152	100	5	16
	153	100	2	6.5
Total			31	
<i>A. lituratus</i>	SN-52	100	10	8
	134	100	2	2
	135	100	2	2
	137	100	9	7
	138	100	34	27
	139	100	6	5
	146	100	9	7
	147	100	6	5
	149	100	8	6
	150	100	6	5
	151	100	29	23
	154	100	2	2
	155	100	1	1
Total			124	
<i>A. obscurus</i>	140	100	13	24
	142	100	25	47
	143	100	11	21
	145	100	4	8
Total			53	
<i>G. soricina</i>	SN-24	100	15	4
	SN-33	17	15	4
	YMS 17	100	11	3
	YMS 121	100	287	73
	YMS 23	100	2	0.6
	YMS 28	100	10	2.6
	YMS 59	100	3	0.8
	23547	100	48	12
Total			39	

* Restos de frutos + néctar-polen

** Frecuencia absoluta

*** Frecuencia relativa

Especie	No. campo	Parte blanda*	Polen**	Polen***
<i>C. perspicillata</i>	SN-19	100	2	0.2
	SN-20	100	4	0.4
	SN-21	100	61	5.8
	YMS 10	100	671	63.8
	23536	100	23	2
	23544	100	10	0.9
	23545	100	3	0.3
	23546	100	5	0.5
	23549	100	1	0.1
	23551	43	41	3.9
	23554	100	2	0.2
	23555	100	7	0.7
	23559	100	1	0.1
	23560	100	102	9.7
	23561	100	58	5.6
	23562	100	1	0.1
	23563	99	7	0.7
	23565	100	51	4.8
	23570	100	2	0.2
Total			1052	
<i>S. lilium</i>	23548	100	5	26
	23550	100	7	37
	23552	100	7	37
Total			19	
<i>U. bilobatum</i>	SN-25	100	17	8
	SN-37	100	2	1
	SN-38	100	11	5
	YMS 15	100	6	3
	YMS 36	100	3	1
	YMS 52	7	7	3
	YMS 54	100	1	1
	YMS 60	11	8	4
	23536	100	12	6
	23538	100	8	4
	23539	100	16	8
	23540	100	31	15
	23541	100	17	8
	23543	100	33	16
	23553	100	33	16
	23557	100	1	1
Total			206	
<i>U. magnirostrum</i>	YMS 37	100	5	26
	YMS 38	100	2	11
	YMS 40	100	3	16
	YMS 43	100	3	16
	YMS 49	100	1	5
	YMS 50	100	5	26
Total			19	

Tabla 4. Recursos alimenticios (%) registrados para la comunidad de murciélagos consumidores de néctar-polen.

Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992. N= 131 individuos.

Especie	No. campo	Frutos-semillas	Insectos	Néctar-Polen
<i>A. jamaicensis</i> N = 11	SN-18	100	0	0
	SN-28	84	0	16
	YMS 02	2	98	0
	116	100	0	0
	122	5	95	0
	130	100	0	0
	132	48	0	52
	141	93.5	0	6.5
	148	97	0	3
	152	84	0	16
153	93.5	0	6.5	
X		73	18	9
<i>A. lituratus</i> N = 18	SN-52	92	0	8
	YMS 35	65	35	0
	102	100	0	0
	121	0	100	0
	128	100	0	0
	134	98	0	2
	135	98	0	2
	137	93	0	7
	138	73	0	27
	139	95	0	5
	146	93	0	7
	147	95	0	5
	149	94	0	6
	150	95	0	5
	151	77	0	23
	154	98	0	2
	155	99	0	1
156	100	0	0	
X		87	7	6
<i>A. obscurus</i> N = 7	103	100	0	0
	123	100	0	0
	140	76	0	24
	142	53	0	47
	143	79	0	21
	145	92	0	8
	157	100	0	0
X		86	0	14

Especie	No. campo	Frutos-semillas	Insectos	Néctar-Polen
<i>G. soricina</i> N = 12	SN-24	96	0	4
	SN-33	13	83	4
	YMS 09	100	0	0
	YMS 17	97	0	3
	YMS 121	27	0	73
	YMS 23	99.4	0	0.6
	YMS 28	97.4	0	2.6
	YMS 48	100	0	0
	YMS 59	99.2	0	0.8
	23534	60	40	0
	23535	100	0	0
	23547	88	0	12
X		81	11	8
<i>C. perspicillata</i> N = 44	SN-19	99.8	0	0.2
	SN-20	99.6	0	0.4
	SN-21	94.2	0	5.8
	SN-29	100	0	0
	SN-36	100	0	0
	SN-46	100	0	0
	SN-47	0	100	0
	SN-48	0	100	0
	SN-49	100	0	0
	SN-50	84	16	0
	SN-51	100	0	0
	YMS 01	100	0	0
	YMS 03	100	0	0
	YMS 04	100	0	0
	YMS 08	100	0	0
	YMS 10	36.2	0	63.8
	YMS 11	100	0	0
	YMS 13	100	0	0
	YMS 14	100	0	0
	YMS 16	100	0	0
	YMS 18	100	0	0
	YMS 19	100	0	0
	YMS 31	100	0	0
	YMS 32	100	0	0
	YMS 51	100	0	0
	23536	98	0	2
	23544	99.1	0	0.9
23545	99.7	0	0.3	
23546	99.5	0	0.5	
23549	99.9	0	0.1	
23551	39.1	57	3.9	
23554	99.8	0	0.2	
23555	99.3	0	0.7	
23559	99.9	0	0.1	
23560	90.3	0	9.7	
23561	94.4	0	5.6	
23562	99.9	0	0.1	
23563	98.3	1	0.7	
23565	95.2	0	4.8	
23567	0	100	0	
23569	100	0	0	
23570	99.8	0	0.2	
23571	100	0	0	
23572	100	0	0	
X		89	9	2

Especie	No. campo	Frutos-semillas	Insectos	Néctar-Polen
<i>S. lilium</i> N = 5	SN-3	100	0	0
	YMS 30	100	0	0
	23548	74	0	26
	23550	63	0	37
	23552	63	0	37
X		80	0	20
<i>U. bilobatum</i> N = 25	SN-25	92	0	8
	SN-37	99	0	1
	SN-38	95	0	5
	SN-39	100	0	0
	YMS 05	100	0	0
	YMS 07	100	0	0
	YMS 10	100	0	0
	YMS 15	97	0	3
	YMS 36	99	0	1
	YMS 42	100	0	0
	YMS 52	4	93	3
	YMS 53	79	21	0
	YMS 54	99	0	1
	YMS 60	7	89	4
	23527	100	0	0
	23528	100	0	0
	23536	94	0	6
	23538	96	0	4
	23539	92	0	8
	23540	85	0	15
	23541	92	0	8
	23543	84	0	16
	23553	84	0	16
23557	99	0	1	
23558	100	0	0	
X		88	8	4
<i>U. magnirostrum</i> N = 9	YMS 22	100	0	0
	YMS 37	74	0	26
	YMS 38	89	0	11
	YMS 39	100	0	0
	YMS 40	84	0	16
	YMS 43	84	0	16
	YMS 49	95	0	5
	YMS 50	74	0	26
	YMS 55	0	100	0
X		78	11	11

En el análisis polínico se tuvieron en cuenta los granos de polen más abundantes (más de 10 granos/especie), tanto en el contenido estomacal como en el pelo de los murciélagos. La presencia de polen en el contenido estomacal se tomó como indicativo de visita por parte del murciélago a la flor, ya sea en busca de néctar o de polen.

En el tratamiento estadístico de los datos obtenidos se emplearon los siguientes índices:

Índice de Amplitud de Nicho de Levins (B).-Basado en el índice de diversidad de Simpson (λ_j), se define así:

$$B_i = \frac{1}{\sum_j (p_{ij}^2)}$$

donde:

P_j : Frecuencia de utilización del recurso i por la especie de j . de murciélago

Este índice establece el grado de preferencia por el recurso alimenticio, a partir de la frecuencia de utilización del recurso por cada especie de murciélago. Se empleó este índice, para obtener una aproximación sobre la competencia interespecífica. Cuando sólo se utiliza un recurso, B es igual a 1 y significa que hay preferencia absoluta por el recurso; cuando el valor de B no es 1, pero si un valor cercano, el organismo muestra preferencia por algún recurso y se habla de organismos que tienden a ser especialistas. Cuando se utilizan todos los recursos en la misma proporción B es igual a N y significa que no hay preferencia por ningún recurso; cuando el valor de B no es igual a N, pero si un valor cercano, se habla de organismos que tienden a ser generalistas (Rudwig & Reynolds, 1988). Se habla de preferencia, pero no en el sentido estricto de la palabra ya que puede existir un valor alto en la frecuencia de uso de un recurso, como una posible respuesta a su alta disponibilidad en el ambiente.

Índice de Valor de Importancia de las Plantas (IVIP).-Planteado por Amaya (1991), permite establecer la importancia de las plantas a nivel alimenticio para la comunidad de murciélagos, también muestra cuáles son las especies de murciélagos que más utilizan un recurso. Entre mayor sea el valor del IVIP, mayor es el uso que una especie da a la planta. El valor del IVIP se puede obtener mediante una razón de amplitud (P). Este valor de P (uso) se puede hallar empleando las frecuencias de registro del polen i en la especie x de murciélago (suma del número de individuos de la especie x de murciélago que fueron encontrados con el tipo de polen i), con rela-

ción al total de registros de polen de todos los recursos utilizados por las especies de murciélagos.

$$P_x = \frac{\sum_x^i \text{Frecuencia del recurso } i \text{ en la especie de murciélago } x}{\text{No. de recursos totales utilizados por la especie/murciélago}}$$

El IVIP suma el uso (P) que cada especie de murciélago hace sobre la planta (recurso i).

$$\text{IVIP} = \sum_x^i (P_x + P_y + \dots + P_j)$$

donde:

IVIP: Índice de Valor de Importancia del recurso floral i para la comunidad de murciélagos.

P: Grado de explotación del recurso floral i (frecuencia relativa de los granos de polen) por parte de la especie de murciélago x.

Índice de Sobreposición de Nicho de Petraitis.- Según este índice, la sobreposición entre las especies de una comunidad, es definida como la probabilidad de que las "curvas de utilización" (uso relativo que cada especie hace del recurso alimenticio) de todas las especies pueden derivarse de una "curva de utilización" común. Se empleó para establecer el grado de sobreposición de nicho en la comunidad de murciélagos antófilos (GO), cuando el estimador V es mayor que el valor de chi-cua-

drado entonces no hay sobreposición de las especies por el recurso alimenticio. También se empleó para establecer la relación de sobreposición de nicho entre pares de especies (So); cuando el valor de W es mayor de 2 entonces la relación entre pares de especies es la siguiente $i > k > m$ (Ludwig & Reynolds, 1988).

Resultados

Características del inventario.-El esfuerzo de captura fue de 565 horas/malla y el éxito de captura (relación entre el número de individuos totales sobre el esfuerzo de captura X 100) fue del 48%. El éxito de captura en julio fue del 62%, en mayo 61%, en octubre 41% y en febrero 26% (tabla 1).

Carollia perspicillata presenta la mayor abundancia relativa 38%, seguida de *Artibeus lituratus* y *Uroderma bilobatum* con 15% cada una. Los valores de abundancia relativa de *U. magnirostrum* y *Sturnira lilium* son los más bajos (tabla 5). *C. perspicillata* se registró durante todo el muestreo. Por el contrario, las especies de *Artibeus* disminuyen sensiblemente en la época seca, hasta ausentarse como lo hace *A. jamaicensis*. *U. bilobatum* se presentó durante todo el muestreo, especialmente en julio y *U. magnirostrum* en febrero y mayo. A *Glossophaga soricina* aunque en frecuencia baja se le registró durante todo el muestreo. *S. lilium* fue muy rara en la zona.

Estructura trófica.-La dieta de las ocho especies antófilas del área de estudio estaba conformada por frutos (83%), insectos (8%) y néctar-polen (9%).

La dieta de las especies de *Artibeus*, *Glossophaga*, *Carollia* y *Uroderma* se componía de frutos, insectos y

Tabla 5. Número de individuos (N) y abundancia relativa (AR %) de los murciélagos consumidores de néctar-polen, durante cuatro épocas de registro. Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992.

Especie	Julio		Octubre		Febrero		Mayo		Total	
	No.	AR	No.	AR	No.	AR	No.	AR	N	AR
<i>Carollia perspicillata</i>	34	38	28	37	11	39	29	37	102	38
<i>Artibeus lituratus</i>	14	16	14	18	1	4	11	14	40	15
<i>Uroderma bilobatum</i>	16	18	9	12	8	29	7	9	40	15
<i>Artibeus jamaicensis</i>	12	13	8	10	0	0	9	12	29	11
<i>Artibeus obscurus</i>	7	8	8	10	1	4	6	8	22	8
<i>Glossophaga soricina</i>	5	5	4	5	4	14	4	5	17	6
<i>Uroderma magnirostrum</i>	0	0	0	0	2	7	9	12	11	4
<i>Sturnira lilium</i>	1	1	3	4	0	0	1	1	5	2
Total	89	99	74	96	27	97	76	98	266	100

Figura 2. Composición de la dieta de las diferentes especies de murciélagos consumidores de néctar-polen. Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992.

Especie	Frutos	Insectos	Néctar-Polen
<i>C. perspicillata</i> N= 44	89	9	2
<i>U. bilobatum</i> N= 25	88	8	4
<i>A. obscurus</i> N= 7	86	0	14
<i>A. lituratus</i> N= 18	87	7	6
<i>G. soricina</i> N= 12	81	11	8
<i>S. lilium</i> N= 5	80	0	20
<i>U. magnirostrum</i> N= 9	78	11	11
<i>A. jamaicensis</i> N= 11	73	18	9

néctar-polen, en diferentes proporciones (fig. 2, tabla 4). Los frutos que consumieron los individuos del género *Artibeus* en su mayoría pertenecían a especies de *Clusia* (Clusiaceae), *Vismia* (Hypericaceae), *Miconia* (Melastomataceae) y *Ficus* (Moraceae). *G. soricina* consumió principalmente frutos de *Piper* (Piperaceae). Los frutos consumidos por *C. perspicillata* pertenecían a especies de *Clidemia* y *Miconia* (Melastomataceae), *Piper* (Piperaceae), *Vismia* (Hypericaceae) y Rubiaceae. *U. bilobatum* y *U. magnirostrum* consumieron frutos de diversas especies. *S. lilium* únicamente consumió frutos de especies de *Solanum* (Solanaceae) y de *Cecropia* (Cecropiaceae) y néctar-polen.

Análisis palinológico.-En las muestras del pelo y en la "parte blanda" de los contenidos estomacales de 131 murciélagos de las ocho especies estudiadas, se identificaron 19 tipos de granos de polen, que pertenecen a las familias Acanthaceae (géneros no diferenciados y *Trichanthera*), Bombacaceae (*Ochroma*), Caesalpinaceae, Cecropiaceae (*Cecropia*), Compositae, Convolvulaceae, Cruciferae, Euphorbiaceae (géneros no diferenciados y *Alchornea*), Gramineae, Lythraceae, Melastomataceae, Moraceae, Myrtaceae, Palmae, Piperaceae y Rubiaceae. Las identificaciones se hicieron al nivel más confiable familia y/o género en razón a la ausencia de un atlas palinológico regional. En la vegetación natural los representantes de estas familias se encuentran en los estratos herbáceo, arbustivo, subarbóreo y arbóreo inferior. El periodo de floración de la mayoría de las plantas de los diferentes hábitats se presentó durante la época seca (diciembre-febrero) e inicio de lluvias (abril).

Amplitud de nicho trófico

1. Con base en la dieta integral (frutos, insectos y néctar-polen) se estableció que de las ocho especies, *S.*

lilium y *A. obscurus* presentaron un valor de amplitud de nicho cercano a 1 ($Bi = 1.88$ y 1.86 , respectivamente), es decir que estas especies tienden a presentar una dieta especializada en el consumo de material vegetal ya sea en forma de frutos o de néctar-polen. Las otras seis especies se registraron dentro de un rango de $Bi = 2.09-2.28$, lo cual permite establecer que estas especies tienden a una dieta general (tabla 6).

2. Con base en el recurso néctar-polen se establecieron dos grupos de especies; en el primero se ubican las especialistas ($Bi = 1.65-1.88$), que consumen en abundancia granos de polen de Gramineae, *Ochroma* cf. *lagopus* (Bombacaceae), *Cecropia* (Cecropiaceae) y *Alchornea* (Euphorbiaceae). En el segundo grupo se ubican las especies generalistas, las cuales aunque utilizan varias fuentes de polen, lo hacen en cantidades reducidas ($Bi = 2.47-4.23$) (tabla 7).

Índice de Valor de Importancia de las Plantas (IVIP).-Según este índice, el polen de las especies de Gramineae constituyó el recurso más explotado por la comunidad de quirópteros (IVIP= 156.70) al ser portados por las ocho especies de murciélagos en algunos casos en cantidades apreciables (tabla 8). El polen de *O. cf. lagopus* (Bombacaceae) fue el segundo recurso más utilizado (IVIP= 93.18) y es consumido por *G. soricina*, *C. perspicillata* y *U. bilobatum*. El polen de *Alchornea* (Euphorbiaceae) (IVIP= 10.93) es también consumido por las ocho especies de murciélagos antófilos. Los granos de polen de Euphorbiaceae, *Cecropia* (Cecropiaceae), Myrtaceae, Caesalpinaceae y Compositae presentaron va-

Tabla 6. Valores de amplitud de nicho trófico de la comunidad de murciélagos consumidores de néctar-polen. Se consideran todos los recursos alimenticios (frutos, insectos, néctar-polen). Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992.

Especie	N	N	Frutos	Insectos	Néctar- Polen	Bi
N= 131	indi- viduos	recursos				
<i>G. soricina</i>	12	3	12	2	8	2.28
<i>A. jamaicensis</i>	11	3	11	2	6	2.24
<i>A. lituratus</i>	18	3	16	2	13	2.24
<i>U. magnirostrum</i>	9	3	8	1	6	2.23
<i>U. bilobatum</i>	25	3	25	3	16	2.17
<i>C. perspicillata</i>	44	3	41	6	19	2.09
<i>S. lilium</i>	5	2	5	0	3	1.88
<i>A. obscurus</i>	7	2	7	0	4	1.86

Bi: Índice de Levins

Tabla 7. Valores de amplitud de nicho trófico de la comunidad de murciélagos consumidores de néctar-polen.

Se considera únicamente el recurso alimenticio néctar-polen. Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992.

Especie N= 131	N individuos	N*	Bombacaceae= <i>O. cf. lagopus</i>	Caesalpinaceae	Compositae	Euphorbiaceae	Euphorbiaceae= <i>Alchornea</i>	Gramineae	Cecropiaceae= <i>Cecropia</i>	Myrtaceae	Bi
<i>A. jamaicensis</i>	11	6	0	0	8	6	5	10	1	1	4.23
<i>A. obscurus</i>	7	6	0	7	2	21	4	16	3	0	3.62
<i>S. lilium</i>	5	3	0	0	1	0	2	11	0	5	2.85
<i>A. lituratus</i>	18	6	0	14	4	5	16	75	10	0	2.47
<i>C. perspicillata</i>	44	7	<u>318</u>	0	2	2	22	<u>697</u>	9	2	<u>1.88</u>
<i>U. magnirostrum</i>	9	8	0	0	0	0	2	14	3	0	<u>1.73</u>
<i>G. soricina</i>	12	6	<u>285</u>	0	0	2	2	5	<u>96</u>	1	<u>1.69</u>
<i>U. bilobatum</i>	25	4	2	2	1	3	13	<u>135</u>	2	18	<u>1.65</u>

Bi: Índice de Levins

* Fuentes de polen

Tabla 8. Valores de Importancia de las Plantas (IVIP) consumidas por la comunidad de murciélagos consumidores de néctar-polen. Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992.

Especie	N*	Gramineae	Bombacaceae= <i>O. cf. lagopus</i>	Euphorbiaceae= <i>Alchornea</i>	Euphorbiaceae	Cecropiaceae= <i>Cecropia</i>	Myrtaceae	Caesalpinaceae	Compositae
<i>U. magnirostrum</i>	8	16.87	0.25	1.62	0.37	0.25	2.25	0.25	0.12
<i>C. perspicillata</i>	7	99.57	45.43	3.14	0.29	1.29	0.29	0	0.29
<i>A. jamaicensis</i>	6	1.67	0	0.83	1.00	0.17	0.17	0	1.33
<i>A. lituratus</i>	6	12.50	0	2.67	0.83	1.67	0	2.33	0.67
<i>A. obscurus</i>	6	2.67	0	0.67	3.50	0.50	0	1.17	0.33
<i>G. soricina</i>	6	16.00	47.50	0.83	0.33	0.17	0.33	0	0
<i>U. bilobatum</i>	4	2.75	0	0.50	0	0	1.25	0	0.25
<i>S. lilium</i>	3	4.67	0	0.67	0	1.00	0	0	0
IVIP		156.70	93.18	10.93	6.32	5.05	4.29	3.75	2.99

* Fuentes de polen

Tabla 9. Valores de sobreposición de nicho trófico de las especies de murciélagos consumidores de néctar-polen. Se considera los recursos alimenticios frutos, insectos y néctar-polen. Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992.

i > k	i > m	W
<i>A. jamaicensis/U. bilobatum</i>	<i>A. jamaicensis/A. obscurus</i>	4.81
<i>A. jamaicensis/A. lituratus</i>	<i>A. jamaicensis/S. lilium</i>	4.65
<i>G. soricina/U. bilobatum</i>	<i>G. soricina/A. obscurus</i>	4.13
<i>G. soricina/A. lituratus</i>	<i>G. soricina/S. lilium</i>	4.02
<i>C. perspicillata/U. bilobatum</i>	<i>C. perspicillata/A. obscurus</i>	4.10
<i>C. perspicillata/A. lituratus</i>	<i>C. perspicillata/S. lilium</i>	3.95
<i>U. magnirostrum/U. bilobatum</i>	<i>U. magnirostrum/A. obscurus</i>	2.95
<i>U. magnirostrum/A. lituratus</i>	<i>U. magnirostrum/S. lilium</i>	2.92
<i>U. bilobatum/A. lituratus</i>	<i>U. bilobatum/S. lilium</i>	2.96
<i>A. lituratus/U. bilobatum</i>	<i>A. lituratus/A. obscurus</i>	2.89
<i>A. lituratus/G. soricina</i>	<i>A. lituratus/S. lilium</i>	2.80

i > k= Relación de sobreposición de la especie i sobre la especie k

i > m= Relación de sobreposición de la especie i sobre la especie m

W= Relación de sobreposición entre pares de especies

Tabla 10. Valores de sobreposición de nicho trófico de las especies de murciélagos consumidores de néctar-polen. Se considera el recurso alimenticio néctar-polen. Serranía La Macarena, Colombia. 1991-1992.

i > k	i > m	W
<i>A. lituratus/U. bilobatum</i>	<i>A. lituratus/G. soricina</i>	30.51
<i>A. lituratus/A. obscurus</i>	<i>A. lituratus/U. magnirostrum</i>	14.98
<i>A. obscurus/U. bilobatum</i>	<i>A. obscurus/G. soricina</i>	28.57
<i>U. magnirostrum/U. bilobatum</i>	<i>U. magnirostrum/G. soricina</i>	22.57
<i>C. perspicillata/G. soricina</i>	<i>C. perspicillata/S. lilium</i>	22.02
<i>C. perspicillata/U. bilobatum</i>	<i>C. perspicillata/G. soricina</i>	10.67
<i>C. perspicillata/S. lilium</i>	<i>C. perspicillata/A. obscurus</i>	4.85
<i>C. perspicillata/U. magnirostrum</i>	<i>C. perspicillata/A. lituratus</i>	3.58
<i>S. lilium/U. bilobatum</i>	<i>S. lilium/G. soricina</i>	13.41
<i>S. lilium/C. perspicillata</i>	<i>S. lilium/A. obscurus</i>	11.20
<i>U. bilobatum/A. jamaicensis</i>	<i>U. bilobatum/G. soricina</i>	11.89
<i>U. bilobatum/C. perspicillata</i>	<i>U. bilobatum/U. magnirostrum</i>	7.08

i > k= Relación de sobreposición de la especie i sobre la especie k

i > m= Relación de sobreposición de la especie i sobre la especie m

W= Relación de sobreposición entre pares de especies

lores de importancia menores de siete y son consumidos por la mayoría de estas ocho especies. Es probable que estas plantas no sean un recurso indispensable en la dieta de las especies de murciélagos estudiadas.

Sobreposición de nicho.- Se estableció que en la comunidad de murciélagos antófilos, teniendo en cuenta los recursos frutos, insectos y néctar-polen, no se presenta competencia por el recurso alimenticio ($GO = 0.99$, $V = 5.43$, $df = 14$, $\alpha = 0.005$). Según la sobreposición específica (S_o) entre pares de especies, se estableció la siguiente relación: *A. jamaicensis* > *G. oricina* > *C. perspicillata* > *U. magnirostrum* > *A. lituratus* > *S. lilium* > *U. bilobatum* > *A. obscurus* (tabla 9).

Teniendo en cuenta el recurso alimenticio néctar-polen tampoco se presenta competencia por este recurso ($GO = 0.67$, $V = 1491.39$, $df = 49$, $\alpha = 0.005$). Según la sobreposición específica (S_o) entre pares de especies, se estableció la siguiente relación: *A. lituratus* > *A. obscurus* > *U. magnirostrum* > *U. bilobatum* > *A. jamaicensis* > *C. perspicillata* > *G. oricina* > *S. lilium* (tabla 10).

Discusión

Características del inventario.-La baja captura de murciélagos que se presentó en febrero (época seca) se debe probablemente a la sequía intensa y a la actividad de quemadas en las zonas boscosas y sabanas que pueden ocasionar la migración de los murciélagos a áreas menos intervenidas y por consiguiente disminuyen el número de individuos y de especies en la zona. El valor más alto de éxito de captura se presentó en julio y coincidió con el predominio de especies consumidoras de frutos como *A. lituratus*, *A. jamaicensis* y *A. obscurus*, con una estrategia de alimentación en grupo; debido a esto se capturó un mayor número de individuos si se compara con especies que se alimentan en forma solitaria (*G. soricina*, *S. lilium*).

Composición de la comunidad.-En las diferentes épocas climáticas, *C. perspicillata* presentó valores altos de abundancia relativa, en razón a que es una especie que se adapta con facilidad a alteraciones en el hábitat (Sazima, 1976; Ibáñez, 1981) y por consiguiente a cambios de los recursos ya sean alimenticios o de refugio. Por el contrario, la abundancia de *A. jamaicensis*, *A. lituratus*, *A. obscurus*, *G. soricina*, *S. lilium*, *U. bilobatum* y *U. magnirostrum* depende del alimento disponible.

En comparación con la lista de especies que consumen néctar-polen registrada por Rivas-Pava et al. (1996) se nota la ausencia de *Lionycteris spurrelli*, *Lonchophylla robusta* y *L. thomasi*. Probablemente estas especies

migraron a zonas con mejores ofertas de alimento y de refugio, como la parte baja del río Güejar y los parches de bosque de las «matas de monte» y «bosques de galería» de otros sectores de la Serranía La Macarena. Este comportamiento permite inferir que en la zona, las especies con una dieta especializada tienden a migrar a zonas menos intervenidas.

Estructura trófica.-Según **Rivas-Pava et al. (1996)**, la comunidad de murciélagos de la parte norte de la Serranía La Macarena se compone de 52% de especies frugívoras, 38% de insectívoras, 6% consumidoras de néctar-polen, 2% consumen vertebrados y 2% son hematófagos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las especies de murciélagos, que se registraron en este trabajo, no se alimentaron únicamente de néctar-polen sino que en su dieta otros recursos como los frutos son componentes principales. La estructura trófica de la comunidad permite establecer que el néctar-polen no es el principal requerimiento sino que es un alimento ocasional. **Koopman (1981)** y **Thomas et al. (1984)** anotaron que las especies de murciélagos nectarívoros-polinívoros facultativas complementaban la fuente protéica con el consumo de insectos que atrapaban al visitar las flores.

Según **Catling (manuscrito, 1975)** los polinizadores grandes como las especies de *Artibeus* necesitan más carbohidratos para mantener su metabolismo estable, por consiguiente no pueden vivir solamente del consumo del néctar y del polen y acuden a otras fuentes de alimento como insectos y frutos. La observación anterior concuerda con los resultados de este trabajo, ya que junto con el recurso néctar-polen también fueron consumidos frutos e insectos.

G. soricina utiliza en su dieta frutos, néctar-polen e insectos, resultados que coinciden con los registrados por **Alvarez & González (1970)**, **Heithaus et al. (1975)** y **Rivas-Pava et al. (1996)**, que calificaron como oportunistas a los Glossophaginae al encontrar en su contenido estomacal restos de frutos, néctar-polen e insectos.

C. perspicillata es facultativa («oportunista») y aprovecha todos los recursos, en especial los abundantes (frutos y néctar-polen) como igualmente fue registrado por **Heithaus et al. (1975)**. Para *S. liliium* los frutos y el néctar-polen son el principal alimento, resultado también señalado por **Heithaus et al. (1975)** y por **Rivas-Pava et al. (1996)** que la consideran un consumidor importante de frutos en la época húmeda y de néctar en la época seca.

U. bilobatum y *U. magirostrum* consumen frutos, insectos y néctar-polen, dieta similar a la mencionada

por **Eisenberg (1989)**, **Emmons & Feer (1990)** y por **Rivas-Pava et al. (1996)**

Debido a que la toma de muestras no se realizó durante un período de tiempo consecutivo, no se detectaron variaciones marcadas a lo largo del año en la dieta de los murciélagos. Sin embargo, *A. jamaicensis* y *C. perspicillata* tienden al consumo de frutos e insectos y *A. lituratus*, *U. bilobatum* y *U. magirostrum* al de néctar-polen durante la época de lluvias, este esbozo de patrón estacional detectado en el consumo de algunos recursos coincide con los registros de **Heithaus et al. (1975)**.

Hay que tener en cuenta que en el análisis del contenido estomacal es bastante improbable hallar néctar. **Catling (manuscrito, 1975)**, advirtió que en *C. perspicillata* y *G. soricina* era muy raro encontrar restos de insectos ya que sólo consumían la parte blanda y **Heithaus et al. (1975)** mencionan el paso rápido del polen por el aparato digestivo, sin embargo los resultados de nuestro estudio, muestran al polen y a los insectos como recursos utilizados por los murciélagos.

Aunque los valores de sobreposición de la comunidad (tablas 9, 10) no muestran competencia por los recursos, si se establecieron relaciones de competencia entre pares de especies. Es el caso de *A. lituratus* y *A. jamaicensis*, que sobreponen el nicho de las otras especies. La sobreposición de las especies del género *Artibeus* está determinada por el tamaño de sus individuos, por la estrategia de alimentación y por presentar una dieta poco especializada ya que consumen néctar-polen, frutos e insectos. Estas características les permiten adaptarse fácilmente a cambios en el ambiente, por consiguiente los individuos de este género son considerados dominantes (**Heithaus et al., 1975**). Nuestros resultados son preliminares por lo tanto para establecer competencia entre especies por el recurso alimenticio es necesario tener en cuenta aspectos como el estrato y la hora en que se efectúa.

Para clasificar a las especies como de comportamiento general («generalistas») o específico (especialistas) en cuanto a la alimentación, deben tener en cuenta factores como el número de individuos capturados por especie (depende de la estrategia de consumo), la disponibilidad del recurso alimenticio, la probabilidad de adhesión del polen al pelo del murciélago (depende del tipo de síndrome de polinización de la planta), el número de flores visitadas (depende de la estrategia de alimentación del murciélago y del síndrome de polinización de la planta), la hora de captura y la velocidad de digestión. Cada uno de estos factores ocasiona variaciones en la proporción de polen que se encuentra en cada especie como fue registrado

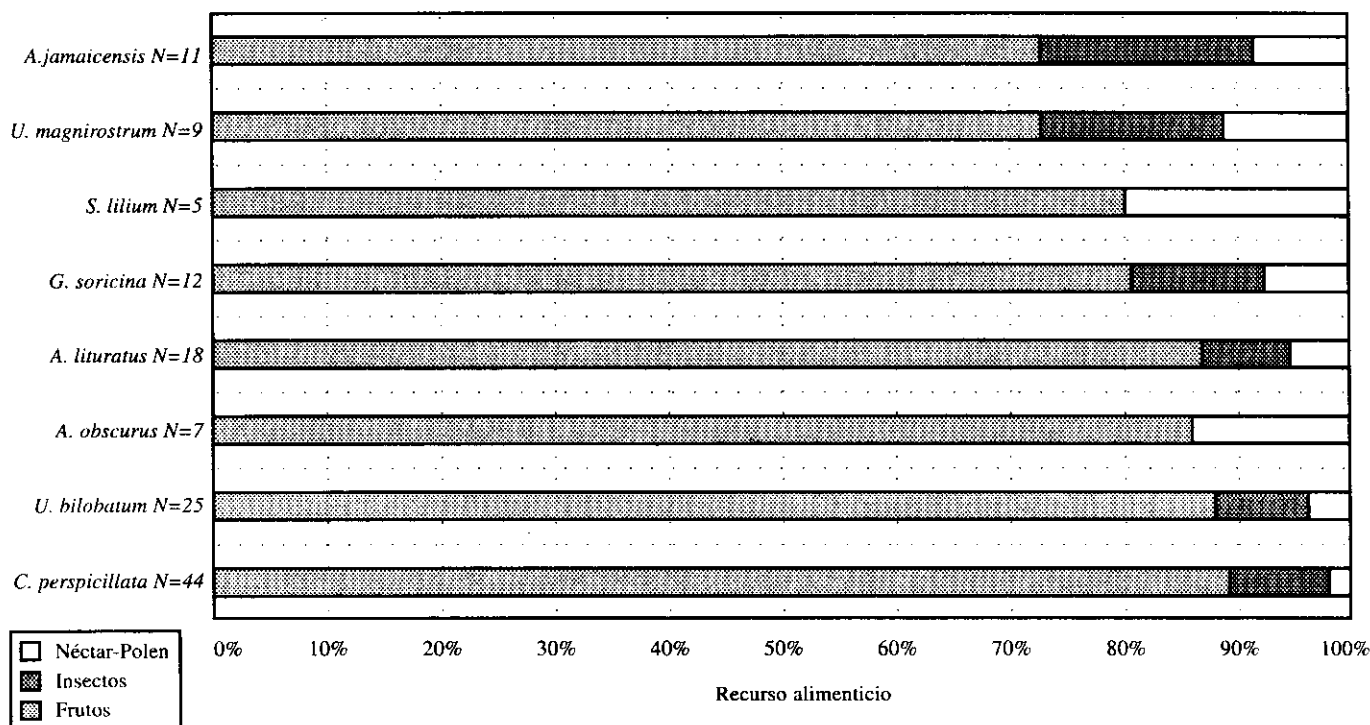


Figura 2. Composición de la dieta de las diferentes especies de murciélagos consumidores de néctar-polen. Serranía de la Macarena. Colombia 1991-1992.

igualmente por Heithaus et al. (1975) en *A. jamaicensis*, *A. lituratus*, *G. soricina*, *C. perspicillata* y *S. lilium*.

El polen de *Ochroma* cf. *lagopus* (Bombacaceae), especie polinizada por murciélagos (Heithaus et al., 1975), lo consumen *G. soricina*, *C. perspicillata* y *U. bilobatum* que son consideradas como sus polinizadores. La familia Leguminosae (en sentido amplio) presenta géneros con el síndrome de la quiropterofilia como *Bauhinia*, *Cassia* e *Inga* (Heithaus et al., 1975; Sazima & Sazima, 1977). Sin embargo, entre los palinómorfos identificados en el análisis no se encontró ninguno perteneciente a estos géneros.

El polen de Gramineae es transportado por el viento (síndrome de anemofilia). Sin embargo, sus granos son los más importantes para las ocho especies de murciélagos antófilos. Aunque en un comienzo, se asoció la presencia accidental de estos granos cuando los animales se alimentaban con recursos de otras especies vegetales de los estratos bajos y al consumo ocasional en el momento del acicalamiento, los hallazgos de granos de polen en el contenido estomacal y las observaciones en las sabanas del Parque Nacional Natural El Tuparro, Vichada, Colombia (Muñoz-Saba, en prep.) donde varias especies de murciélagos consumían polen de gramíneas, permiten concluir que estas plantas hacen parte de la dieta de los murciélagos. Aunque a primera vista re-

sulte muy particular este hallazgo, anteriormente Vogel (1958) había registrado en el pelo y en el contenido estomacal de los murciélagos granos de polen de plantas que no presentan las características propias del síndrome de la quiropterofilia como especies de Passifloraceae, Rutaceae, Guttiferae, Combretaceae y Sterculiaceae. Alfonso-B. & Cadena (1994) registraron polen de Gramineae y Passifloraceae en murciélagos del Parque Ucumarí, Colombia (2200-2450 m); Lemke (1984, 1985) observó a *G. soricina* consumiendo néctar y probablemente polen de la liana *Thunbergia grandiflora* (Acanthaceae) en un ambiente suburbano en los límites de la ciudad de Cartagena, Colombia (2 m); según el autor esta acción puede ser accidental en el momento de consumir los insectos que polinizan estas plantas, pero a la vez los murciélagos pueden polinizarla.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Ciencias Naturales (ICN) de la Universidad Nacional de Colombia por la colaboración durante el desarrollo de esta investigación al igual que al INDERENA. A Gary Stiles por su paciente y detallada revisión y sus comentarios que enriquecieron el manuscrito.

Bibliografía

- Alfonso-B., A. & A. Cadena.** 1994. Composición y estructura trófica de la comunidad de murciélagos del Parque Regional Natural Ucumari. Págs. 361-373 en: J.O. Rangel-Ch. (ed.). Ucumari: un caso típico de la diversidad biótica andina. CARDER-Universidad Nacional, Pereira.
- Alvarez, T. & L. González.** 1970. Análisis polínico del contenido gástrico de murciélagos Glossophaginae de México. Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas 18: 137-159.
- Amaya, M.** 1991. Análisis palinológico de la flora del Parque Nacional Natural Amacayacu (Amazonas) visitada por colibríes (Aves: Trochilidae). Trabajo de Grado, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 86 p.
- Eisenberg, J.F.** 1989. Mammals of the neotropics: the northern neotropics. The University of Chicago Press, Chicago. 449 p.
- Emmons, L.H. & F. Feer.** 1990. Neotropical rainforest mammals. The University of Chicago Press, Chicago. 281 p.
- Erdtman, G.** 1969. Handbook of palynology, morphology - taxonomy - ecology. An introduction to the study of pollen grains and spores. Hafner Publishing Company, New York. 486 p.
- Heithaus, E.R., T.H. Fleming & P.A. Opler.** 1975. Foraging patterns and resource utilization in seven species of bats in a seasonal tropical forest. Ecology 56 (4): 841-854.
- Ibáñez, C.** 1981. Biología y ecología de los murciélagos del Hato «El Frío». Doñana. Acta Vertebrata 8 (4): 1-271.
- Koopman, K.F.** 1981. The distributional patterns of New World nectar-feeding bats. Annals of the Missouri Botanical Garden 68 (2): 352-369.
- _____. 1982. Biogeography of the bats of South America. Págs. 273-302 in: M.A. Mares & H.H. Genoways (eds.). Mammalian biology South America. Spec. Publ. Se. Pymatuning Laboratory of Ecology, University of Pittsburg.
- Kuhry, P.** 1988. Paleobotanical-paleocological studies of tropical high Andean peatbog sections (Cordillera Oriental, Colombia). The Quaternary of Colombia, Amsterdam. 248 p.
- Lemke, T.O.** 1984. Foraging ecology of the long-nosed bat, *Glossophaga soricina*, with respect to resource availability. Ecology 65 (2): 538-548.
- _____. 1985. Pollen carrying by the nectar-feeding bat *Glossophaga soricina* in a suburban environment. Biotropica 17 (2): 107-111.
- Ludwig, J.A. & J.F. Reynolds.** 1988. Statistical ecology: a primer on methods and computing. John Wiley & Sons, New York. 337 p.
- Oppenheim, V.** 1941. Geología de la Cordillera Oriental entre los Llanos y el Magdalena. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales 4 (14): 175-181.
- Rangel-Ch., J.O., M. Aguilar-P. & P. Lowy-C.** 1995. Parque Nacional Natural Sierra La Macarena. Págs. 112-120 en: J.O. Rangel-Ch. (ed.). Colombia: diversidad biótica I. Instituto de Ciencias Naturales-Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá D.C.
- Rivas-Pava, P., P. Sánchez-Palomino & A. Cadena.** (En imprenta). Estructura trófica de la comunidad de quirópteros en bosques de galería en la Serranía de La Macarena (Meta-Colombia). in: H.H. Genoways & R. Baker (eds.). Essays in honor to K. Knox, Jr.
- Sánchez, H., J.I. Hernández, J.V. Rodríguez & C. Castaño.** 1990. Nuevos parques nacionales de Colombia. Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente-INDERENA. OP-Gráficas, Bogotá. 213 p.
- Sánchez-Palomino, P., P. Rivas-Pava & A. Cadena.** 1993. Composición, abundancia y riqueza de especies de la comunidad de murciélagos en bosques de galería en la Serranía de La Macarena (Meta-Colombia). Caldasia 17 (2): 301-313.
- Sazima, I.** 1976. Observations on the feeding habitats of phyllostomatid bats (*Carollia*, *Anoura*, and *Vampyrops*) in southeastern Brazil. Journal of Mammalogy 57 (2): 381-382.
- _____. & M. Sazima. 1977. Solitary and group foraging: two flower-visiting patterns of the lesser spear-nosed bat *Phyllostomus discolor*. Biotropica 9 (3): 213-215.
- Thomas, D.W., B. Crawford, S. Eastman, R. Gloscheskie & M. Heir.** 1984. A reappraisal of the feeding adaptations in the hairs of nectar feeding bats. Journal of Mammalogy 65 (3): 481-484.
- Thomas, D.W.** 1988. Analysis of diets of plant-visiting bats. Págs. 211-220 in: T.H. Kunz (ed.). Ecological and behavioral methods for the study of bats. Smithsonian Institution Press, Washington, D.C.
- Vogel, M.** 1958. Fledermausblume in Südamerika. Österreichischen Botanischen Zeitschrift 491-530.

ESTIMACION DEL FACTOR DE RETENCION DE LA RED BOLICHERA EMPLEADA EN PESQUERIA EN LA CIENAGA GRANDE DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO

por

Mario E. Rueda H.¹, José Ernesto Mancera¹ y Jaime Mendo²

Resumen

Rueda, M. E., J. E. Mancera & J. Mendo: Estimación del factor de retención de la red bolichera empleada en pesquería en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 21(81): 487-495, 1997. ISSN: 0370-3908.

Con el fin de estimar la capturabilidad del "boliche", uno de los seis métodos de pesca utilizados en la Ciénaga Grande de Santa Marta, se calculó el factor de retención en peso y número de este método. Un total de 70 lances de pesca fueron hechos en diferentes sitios del ecosistema, en cada uno de los cuales un boliche prototipo usado normalmente en las capturas comerciales fue encerrado por un boliche experimental cuya área interna fue cubierta por cinco lances con atarraya. Los resultados mostraron que la especie más vulnerable a la captura del boliche es el Macabí (*Elops saurus*), mientras que la Lisa (*Mugil incilis*) es la menos retenida. Se encontró también que la fracción de peces retenida por un boliche, no está asociada con la biomasa disponible que encierra el utensilio y más bien parece estar relacionada con factores como la efectividad en la maniobra de pesca y el comportamiento de los peces al encuentro con la red. Se recomienda aplicar un factor de retención de 0.47 y 0.24 en peso y número respectivamente, para estimar la capturabilidad del boliche.

Palabras claves: pesca artesanal, boliche, factor de retención, maniobrabilidad, lagunas costeras.

Abstract

In order to estimate the catchability of the "boliche", one of the six fishing methods existing in the Ciénaga Grande de Santa Marta, its retention factor, in terms of weight and number of individuals was calculated. A total of 70 hauls were made in different places of the ecosystem; in each haul a prototype boliche commonly employed commercially was surrounded by an experimental boliche and its encircled area covered by castnet hauls. Results indicated that the Macabí (*Elops saurus*), was the most retained species, while the Lisa (*Mugil incilis*) was the

¹ Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, INVEMAR, Apdo. 1016. Santa Marta, Colombia.

² Facultad de Pesquería, Universidad Nacional Agraria La Molina. Apdo. 456, Lima 100, Perú.

less retained. The catch of the boliche not depends on the available biomass enclosed by the net and rather it seems to be related with factors like the effectiveness in the maneuver of fishing and the behavior of the fishes at the encounter with the net. It is advisable to apply a retention factor of 0.47 and 0.24 on weight and number respectively, to estimate the boliche catchability.

Key words: artesanal fishery, encircling gillnets, retention factor, handling, coastal lagoon.

Introducción

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) es una laguna costera tropical con características estuarinas, ubicada en la Costa Caribe colombiana. Ha sido descrita en diversos trabajos como uno de los ecosistemas de este tipo más importantes de la cuenca caribeña (**Botero, 1988; Botero y Botero, 1989; Botero y Mancera, 1996**). Es un área de mucho interés socioeconómico, pues por décadas su población (20000 personas aproximadamente) ha dependido en forma directa de la pesca artesanal ejercida por 3215 pescadores mediante varios métodos entre los que sobresale por su eficiencia el bolicheo (**Mancera y Botero, 1993**).

El boliche fue introducido en la CGSM a inicios de la década de los años ochentas (**Gallo, 1988**), ocasionando que la pesquería en tal época alcanzara altos rendimientos pero cuya actividad incontrolada redundó varios años después en una disminución de las capturas (**Rueda, 1995**). Tal situación ha generado conflicto entre las diferentes comunidades de pescadores, aquellas que usan el boliche (pescadores con mayor respaldo económico, ubicados principalmente en la población de Tasajera) y las que no lo usan (pescadores con menor respaldo económico, ubicados en los pueblos palafíticos). Este boliche difiere de aquel utilizado en el mar, por cuanto no opera como una red de cerco con jareta; su diseño se basa en una red de enmalle y su tendido es en círculo lo cual permite cercar un área determinada (**Karlsen y Bjarnason, 1989**). Técnicamente el boliche de la CGSM es armado con nylon monofilamento uniendo hasta cuatro paños de red para finalmente llegar a medir 350 m de longitud por 3 m de altura; posee gran fuerza de flotación y se usa con uno o combinando varios tamaños de malla en rango de 5.08 cm a 8.89 cm. (**Rueda, 1995**).

Teniendo en cuenta el grado de incertidumbre sobre si produce o no daño el uso del boliche en la CGSM, han sido adelantadas varias investigaciones. En cuanto a alteraciones físicoquímicas de la columna de agua **Rueda y Mancera, (1995)**, encontraron que la maniobra de pesca del boliche genera algunos cambios momentáneos de poca repercusión en el ecosistema, representados en la resuspensión de partículas principalmente inorgánicas que

disminuyen la transparencia de la columna de agua. Así mismo **Rueda y Santos, (en prensa)** concluyen que la pesca con boliche está afectando negativamente algunas de las poblaciones ícticas, ya que están siendo capturados individuos por debajo de la talla media de madurez sexual, debido al uso en la pesquería de pequeños tamaños de malla. Por otra parte existen algunos trabajos sobre el uso del boliche en las pesquerías del Salvador, Cuba y Argentina (**Arias, 1988**) y en el Senegal (**Nédélec, 1982**), usados en aguas poco profundas y con cierta variedad en la maniobra de pesca.

El proyecto colombo alemán de cooperación técnica (PRO-CIENAGA), está diseñando un Plan de Manejo Ambiental, que incluye investigaciones pesqueras encaminadas a introducir con la adopción de medidas de ordenamiento para las pesquerías en la CGSM. En este contexto se realizaron prospecciones pesqueras con el propósito de estimar la biomasa íctica a fin de conocer el orden de magnitud de la población de peces existente. Con este estimado será posible determinar por medio de modelos de producción excedentaria el nivel óptimo de esfuerzo de pesca, es decir, el esfuerzo que produce el máximo rendimiento que puede ser sostenible sin afectar la productividad a largo plazo del "stock", denominado rendimiento máximo sostenible (RMS) (**Sparre y Venema, 1995**). La estimación de biomasa se hizo por el método de área barrida usado comúnmente en pesquerías demersales con red de arrastre; para la aplicación de este método se consideró el uso del "boliche", método muy usado en la Ciénaga, de alta eficiencia y fácil maniobrabilidad. La factibilidad del uso del boliche para la estimación de la biomasa, se basa en que esta red encierra un área determinada dependiendo de su longitud y en que su altura cubre toda la columna de agua gracias a la poca profundidad de la laguna. Sin embargo la aplicación del método de área barrida, en el caso del boliche, además de una estimación de la capturabilidad de la red, como en el caso de redes de arrastre que depende de la reacción de los peces al encuentro con la red, requiere de la estimación de: I) la fracción de peces que escapan por efecto de la selectividad de la red y II) la fracción de peces que no se dirigen hacia la red, haciendo nula su probabilidad de captura.

Es por ello que se planteó el presente trabajo con el objetivo de estimar la fracción de peces que no es retenida en la red por las causas mencionadas arriba y hacer posible el empleo del boliche para la estimación de la biomasa instantánea en la CGSM mediante el método de área barrida.

Materiales y métodos

La fracción de peces retenida por el boliche fue estimada a partir de la información obtenida en 12 faenas de pesca experimentales realizadas entre abril y julio de 1994, en las que se hicieron 70 lances en diferentes sitios de la CGSM ubicados con un geoposicionador por satélite y que correspondieron a los usualmente visitados por los pescadores (Fig. 1). Del total de lances efectuados (70) el 55 % correspondieron a áreas con fondos de cascajo (mezcla de limo y restos de conchas de caracol, almeja y otros bivalvos), el 23 % a fondos de ostión (bancos de ostra) y el 22 % a fondos blandos (limo-arcillosos).

En cada faena se emplearon tres artes de pesca: a) un boliche "prototipo" (de los utilizados por los pescadores) de nylon monofilamento, 5.08 cm de tamaño de malla

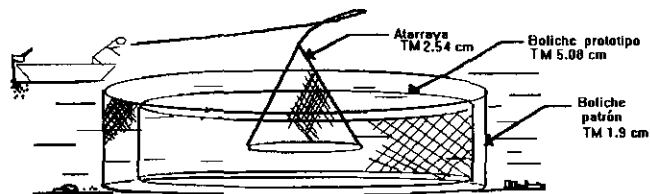


Figura 2. Esquema de un lance con los tres métodos usados en las faenas de pesca experimentales.

(TM), 90 m de longitud (L) y 1.5 m de altura (A); b) un boliche "patrón" de nylon multifilamento, 1.9 cm de TM, 100 m de L, 3 m de A, diseñado para bordear externamente al anterior y c) una atarraya de nylon multifilamento, con 2.54 cm de TM.

La maniobra de pesca durante la toma de las muestras (Fig. 2) fue realizada tendiendo las dos redes simultáneamente, de tal manera que el boliche prototipo quedase encerrado por el boliche patrón con una distancia aproximada de 0.5 m entre ellos. Luego de terminada la operación el boliche prototipo fue alzado y los peces desemmallados; enseguida el boliche patrón en el agua se recogió para encerrar a los peces en un área menor, después de lo cual se hicieron cinco lances con atarraya (en todas las faenas) para capturar todos los peces no retenidos por el boliche prototipo. La captura en cada lance fue introducida en bolsas plásticas y posteriormente en el laboratorio cada individuo fue identificado, medido (longitud total en centímetros) usando un ictiómetro y finalmente pesado (por grupo de especies) en gramos con una balanza de plato de 0.1 g de precisión.

El factor de retención en peso (R1) y número (R2) fue estimado para cada lance y por especies de importancia comercial usando la ecuación: $R = Ca / (Ca + Cb)$; donde Ca es la captura retenida por el boliche prototipo y Cb la captura obtenida con el boliche patrón y la atarraya (cantidad no retenida). Los datos obtenidos de cada lance se describieron a través de algunas medidas estadísticas de tendencia central y de dispersión; se determinó el ajuste a la distribución normal de los valores R1 y R2 por medio del Test de Kolmogorov-Smirnov empleando el programa Stat Graphics Plus (STSC, 1991) y se aplicaron análisis de regresión y correlación entre los datos de captura total y captura retenida. Así mismo se hicieron gráficos con las curvas de captura por tallas para las diferentes especies comerciales con el fin de comparar la captura retenida con la captura total.

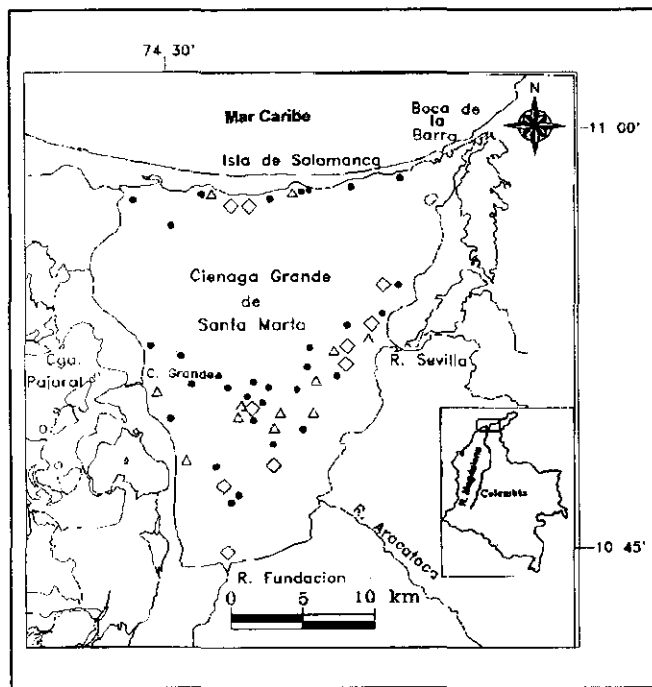


Figura 1. Área de estudio con la ubicación de los lugares donde se efectuaron los lances con boliche en las faenas de pesca experimental. Tipos de fondo: cascajo (*), blando (L) y ostión (Δ).

Resultados

La captura total estuvo constituida por 22 taxones con un peso de 130.4 kg representado en 4530 individuos (Tabla 1). Las especies más abundantes y de mayor biomasa pertenecieron a la familia Engraulidae (1758 individuos y 24.8 kg), de las cuales un 73% en peso hizo parte de la cantidad no retenida; éstas fueron seguidas por *Eugerres plumieri* con 492 individuos y 21,3 kg de los cuales el 44% en peso formó parte de la cantidad no retenida. La captura retenida estuvo constituida en un 89% en peso por las especies *E. plumieri*, *Micropogonias furnieri*, *Elops saurus*, *Diapterus rhombeus*, la familia Engraulidae, *Cathorops spixi* y *Bairdiella ronchus* en orden descendente. Todas menos los Engraulidos son de importancia comercial en el sistema. En tanto la cantidad no retenida se constituyó en un 85% por la familia Engraulidae, seguida por las especies *E. plumieri*, *C. spixi*, *Sphoeroides greeleyi*, *Ariopsis bonillai*, *M. furnieri* y *Mugil incilis*.

A partir de los datos de captura por especie discriminados por lances, se calcularon para siete especies de

importancia comercial los valores del R1 y R2 (Tabla 2). Se observa que los valores de R1 son ligeramente mayores a los valores de R2, que ambos poseen gran variabilidad y que los últimos son menos homogéneos que los primeros. También se muestra que la especie más retenida por el boliche prototipo es *E. saurus* (R1 = 0.87 y R2 = 0.83) y la menos retenida es *Mugil incilis* (R1 = 0.17 y R2 = 0.16).

En la Tabla 3 se presentan los valores de la captura en peso y número de individuos, así como los valores de R1 y R2 para cada uno de los 70 lances realizados en los tres tipos de fondo existentes. Se observó que el valor promedio de la captura en peso retenida es el 50% de la captura total, mientras que en número de individuos constituye el 23%; esto hace presumir que la cantidad no retenida corresponde en su mayoría a un número de individuos con menor peso y talla, lo cual está relacionado con la selectividad del método. Igualmente se aprecia la gran variación de las capturas tanto en peso como en número en torno al promedio. Los valores promedio de R1 y R2 fueron 0.47 y 0.24 respectivamente con intervalo de confianza al 95% de ± 0.04 en ambos casos.

Tabla 1. Composición de la captura en peso (kg) y número de individuos (N.) por especie obtenida en 70 lances de pesca experimental con boliche en la CGSM.

FAMILIA/ESPECIE	CAPTURA RETENIDA		CAPTURA ESCAPADA		CAPTURA TOTAL	
	Ni	Peso (kg)	Ni	Peso (kg)	Ni	Peso (kg)
Engraulidae*	180	6,695	1578	18,117	1758	24,812
<i>Eugerres plumieri</i>	197	12,039	295	9,323	492	21,322
<i>Micropogonias furnieri</i>	144	11,285	154	4,788	298	16,073
<i>Cathorops spixi</i>	92	5,853	35	8,472	127	14,325
<i>Elops saurus</i>	108	10,501	44	1,202	152	11,703
<i>Diapterus rhombeus</i>	213	7,396	161	2,087	374	9,483
<i>Ariopsis bonillai</i>	4	0,780	19	5,300	23	6,080
<i>Sphoeroides greeleyi</i>	-	-	520	6,037	520	6,072
<i>Bairdiella ronchus</i>	52	4,410	42	0,610	94	5,020
<i>Mugil incilis</i>	12	0,727	93	3,540	105	4,267
<i>Sphoeroides testudineus</i>	7	0,242	42	2,029	49	2,271
<i>Achirus lineatus</i>	4	0,110	140	1,701	144	1,811
<i>Caranx hippos</i>	23	1,235	0	0,0	23	1,240
<i>Strongylura marina</i>	1	0,275	4	0,940	5	1,215
<i>Oligoplites spp</i>	10	1,030	0	0,0	10	1,030
<i>Centropomus undecimalis</i>	1	0,910	0	0,0	1	0,910
<i>Gerres cinereus</i>	8	0,697	2	0,100	10	0,979
<i>Centropomus ensiferus</i>	3	0,640	1	0,150	4	0,790
<i>Chaetodipterus faber</i>	0	0,0	1	0,425	1	0,425
<i>Hyporhamphus roberti</i>	0	0,0	19	0,328	19	0,328
<i>Scomberomorus sp</i>	1	0,140	1	0,075	2	0,215
<i>Polydactylus virginicus</i>	2	0,075	2	0,130	4	0,205
TOTAL	1062	65,041	3468	65,354	4530	130,395

*Familia representada por las especies *Anchovia clupeioides*, *Cetengraulis edentulus* y *Anchoa trinitatis*.

Tabla 2. Estadística descriptiva del factor de retención (R1 en peso y R2 en número de individuos) para las principales especies comerciales de la CGSM. Promedio; SD = desviación estándar; I.C = intervalo de confianza al 95 %; C.V. = coeficiente de variación y n = número de observaciones.

ESPECIE	PROMEDIO		SD		I.C		C.V (%)		n
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2	
<i>E. plumieri</i>	0.59	0.58	0.30	0.30	±0.08	±0.08	51	51	53
<i>M. furnieri</i>	0.50	0.43	0.42	0.39	±0.12	±0.11	82	90	49
<i>D. rhombeus</i>	0.74	0.73	0.30	0.32	±0.09	±0.09	40	43	45
<i>C. spixi</i>	0.34	0.26	0.40	0.34	±0.13	±0.11	114	132	36
<i>E. saurus</i>	0.87	0.83	0.28	0.30	±0.10	±0.11	32	36	30
<i>B. ronchus</i>	0.81	0.76	0.24	0.29	±0.14	±0.17	29	38	11
<i>M. incilis</i>	0.17	0.16	0.33	0.31	±0.11	±0.10	190	195	36

La relación entre la captura total y la captura retenida en peso y número muestra en ambos casos una correlación significativa (Fig. 3a y 3b), sin embargo en el segundo caso el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.22$) es muy bajo, y por tanto el modelo no es acertado. Por otro lado la relación entre la captura total y el factor de retención en peso y número (Fig. 3c y 3d) muestra en ambos casos una correlación no significativa con bajos coeficientes de determinación ($R^2 = 0.06$ y $R^2 = 0.008$ respectivamente); lo anterior demuestra que la fracción de peces retenida por el boliche no está asociada con la biomasa disponible para capturar. Los valores de R1 presentaron un buen ajuste a la distribución normal (Test de Kolmogorov-Smirnov, $P = 0.934$) debido al efecto selectivo del tamaño de malla usado en la red sobre determinadas tallas de la población, en tanto que los valores de R2 tuvieron escaso ajuste ($P = 0.538$) presentando una distribución sesgada hacia el lado derecho propia de una función de densidad (Fig. 3e y 3f).

En la Fig. 4 se observa que las especies retenidas con tallas representativas de la población son *E. saurus*, *D. rhombeus* y *M. furnieri*; de allí que posean altos valores de factor de retención (Tabla 2). En tanto que especies como *M. incilis* y *C. spixi* presentaron un alto grado de escape, aún en tallas grandes, y en consecuencia obtuvieron bajos valores de factor de retención (Tabla 2).

Discusión

Los trabajos realizados para la estimación de biomasa por el método de área barrida con redes de arrastre, utilizan valores de la proporción de peces retenida por la red entre 0.5 y 1.0, lo que implica riesgos de sobre-estima-

ción de la biomasa. De allí que investigaciones de reconocimiento confieren dificultad a la estimación de dicha proporción, demostrando que depende de la reacción de las especies frente al método y de la normalización en la operación de pesca (Sparre y Venema, 1995). En relación con el presente estudio, como se mencionó anteriormente, la capturabilidad del boliche no solo se ve afectada por la reacción de los peces al momento de hacer el lance, sino también por el efecto selectivo de la red y el comportamiento de los peces una vez encerrados en ésta. No obstante, el boliche es el método más eficiente por encima de otros usados en el área, debido a las especificaciones técnicas de su diseño, la actividad de la maniobra de pesca y los amplios rangos de tallas de las curvas de selectividad calculadas para varias especies de la CGSM (Rueda, 1995).

La captura total (Tabla 1) puede ser asumida como una buena aproximación de las especies existentes en la población durante el período de estudio. Se capturaron un total de 20 individuos determinados hasta especie; adicionalmente individuos de dos géneros (*Oligoplites* y *Scomberomorus*) que no fue posible llevar hasta especie y tres especies *Anchovia clupeioides*, *Cetengraulis edentulus* y *Anchoa trinitatis*, pertenecientes a la familia Engraulidae, las cuales no fue posible contabilizar por separado. Los géneros *Oligoplites* y *Scomberomorus* y 12 especies (*E. plumieri*, *M. furnieri*, *C. spixi*, *E. saurus*, *D. rhombeus*, *A. bonillai*, *M. incilis*, *B. ronchus*, *Centropomus undecimalis*, *Centropomus ensiferus*, *Gerres cinereus* y *Chaetodipterus faber*) de las capturadas son explotados comercialmente. Si bien las tres principales especies de las capturas comerciales en el período comprendido entre noviembre de 1993 y octubre de 1994 fue-

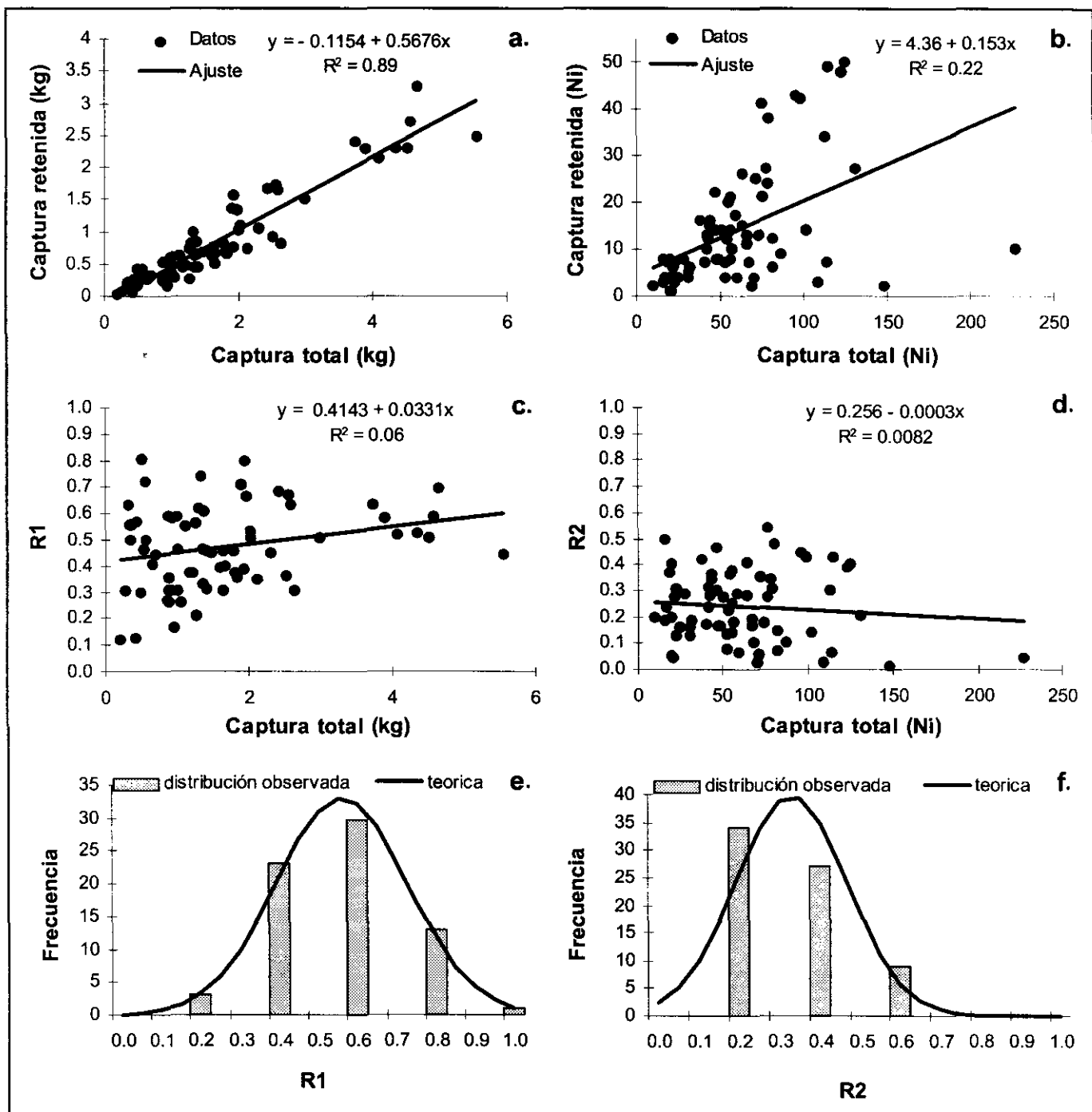


Figura 3. Relaciones entre capturas y factores de retención. a = captura total - captura retenida en peso, b = captura total - captura retenida en número, c = captura total - factor de retención en peso, d = captura total - factor de retención en número, e = distribución de frecuencias del factor de retención en peso y f = = distribución de frecuencias del factor de retención en número.

ron *E. plumieri*, *M. incilis* y *C. spixi* con un 80 % de la captura total (Sistema de Información Pesquera Invemar, SIPEIN-CGSM); estas mismas especies solo llegaron a

conformar el 31% de lo capturado en este estudio. Esto proporciona una idea de la magnitud de biomasa íctica existente en la CGSM y de lo extraído por la pesca.

Tabla 3. Peso (kg), número de individuos (N) y factor de retención (R1 en peso y R2 en número de individuos) por lance de pesca experimental con boliche en la CGSM durante los meses de abril y julio de 1994.

LANCE Y TIPO DE FONDO*	CAPTURA RETENIDA		CAPTURA TOTAL		R1	R2	LANCE Y TIPO DE FONDO*	CAPTURA RETENIDA		CAPTURA TOTAL		R1	R2
	Ni	Peso (kg)	Ni	Peso (kg)				Ni	Peso (kg)	Ni	Peso (kg)		
1-B	4	0,15	17	0,495	0,30	0,24	44-O	13	0,627	42	1,136	0,55	0,31
2-B	7	0,595	23	1,015	0,58	0,30	45-O	20	1,55	55	1,945	0,79	0,36
3-C	8	0,63	49	1,363	0,46	0,16	46-O	4	0,255	31	0,445	0,57	0,13
4-C	8	0,415	20	0,575	0,72	0,40	47-B	3	0,160	109	0,960	0,16	0,03
5-C	14	0,74	51	2,125	0,35	0,27	48-B	10	0,747	227	1,934	0,38	0,04
6-C	7	0,46	53	1,23	0,37	0,13	49-C	4	0,205	25	0,367	0,55	0,16
7-C	2	0,45	148	1,365	0,33	0,01	50-C	16	0,899	44	2,513	0,35	0,36
8-C	6	0,31	22	0,701	0,44	0,27	51-C	2	0,085	10	0,280	0,30	0,20
9-C	4	0,285	25	0,57	0,50	0,16	52-C	13	1,51	67	2,997	0,50	0,19
10-B	16	0,625	38	1,14	0,55	0,42	53-O	5	0,312	31	1,022	0,30	0,16
11-O	12	0,66	43	1,665	0,40	0,28	54-C	7	0,750	114	1,644	0,45	0,06
12-C	7	0,28	68	0,915	0,31	0,10	55-C	8	0,520	48	0,883	0,58	0,17
13-O	4	0,265	71	1,27	0,21	0,06	56-C	7	0,410	19	0,510	0,80	0,37
14-C	1	0,025	21	0,205	0,12	0,05	57-C	17	0,985	59	1,333	0,74	0,29
15-C	1	0,215	20	0,34	0,63	0,05	58-C	4	0,267	53	0,659	0,40	0,08
16-B	8	0,245	16	0,53	0,80	0,5	59-O	41	1,660	76	2,427	0,68	0,54
17-C	8	0,505	56	1,655	0,30	0,14	60-B	27	1,640	78	2,589	0,63	0,35
18-O	25	1,025	72	2,02	0,50	0,35	61-B	14	0,675	56	1,810	0,37	0,25
19-C	12	0,63	54	1,595	0,39	0,22	62-B	43	2,462	96	5,552	0,44	0,45
20-O	48	2,70	123	4,58	0,64	0,39	63-C	3	0,275	23	1,050	0,26	0,13
21-C	8	0,805	56	2,635	0,30	0,14	64-O	49	2,275	115	3,900	0,58	0,43
22-O	15	1,08	64	2,025	0,53	0,28	65-B	15	0,440	44	1,415	0,31	0,34
23-B	42	3,255	99	4,665	0,69	0,42	66-B	8	0,440	28	1,180	0,37	0,29
24-C	9	0,67	87	1,485	0,45	0,10	67-O	22	0,840	47	1,380	0,60	0,47
25-C	24	2,12	79	4,08	0,51	0,30	68-C	21	2,285	76	4,345	0,52	0,28
26-C	6	0,235	32	0,905	0,26	0,19	69-C	7	0,230	41	0,875	0,26	0,17
27-O	34	2,38	113	3,745	0,63	0,30	70-O	50	2,290	125	4,520	0,50	0,40
28-C	12	0,65	82	1,83	0,35	0,15							
29-C	10	0,475	57	1,023	0,46	0,18							
30-C	11	0,645	67	1,41	0,45	0,16	PROMEDIO						
31-O	26	1,359	64	1,909	0,71	0,41		14	0,82	61	1,65	0,47	0,24
32-C	13	0,316	74	0,886	0,35	0,18							
33-C	4	0,269	60	0,891	0,30	0,07	DESV. ESTANDAR						
34-C	27	1,724	131	2,559	0,67	0,21		12	0,72	38	1,20	0,16	0,13
35-O	14	0,722	102	1,276	0,56	0,14							
36-C	2	0,053	70	0,426	0,12	0,03	INT. DE CONFIANZA (95%)						
37-C	4	0,195	20	0,350	0,55	0,20		±2	±0,17	±8	±0,28	±0,04	±0,04
38-B	14	1,035	47	2,317	0,44	0,30	COEF. DE VARIACION						
39-B	6	0,552	82	0,951	0,58	0,07		89 %	88 %	61 %	73 %	33 %	56 %
40-B	21	0,810	56	1,309	0,61	0,38							
41-B	38	1,312	80	1,979	0,66	0,48							
42-C	3	0,175	16	0,352	0,49	0,19							
43-O	10	0,815	42	1,787	0,45	0,24							

*Tipos de fondo: B = blando; C = cascajo y O = ostión.

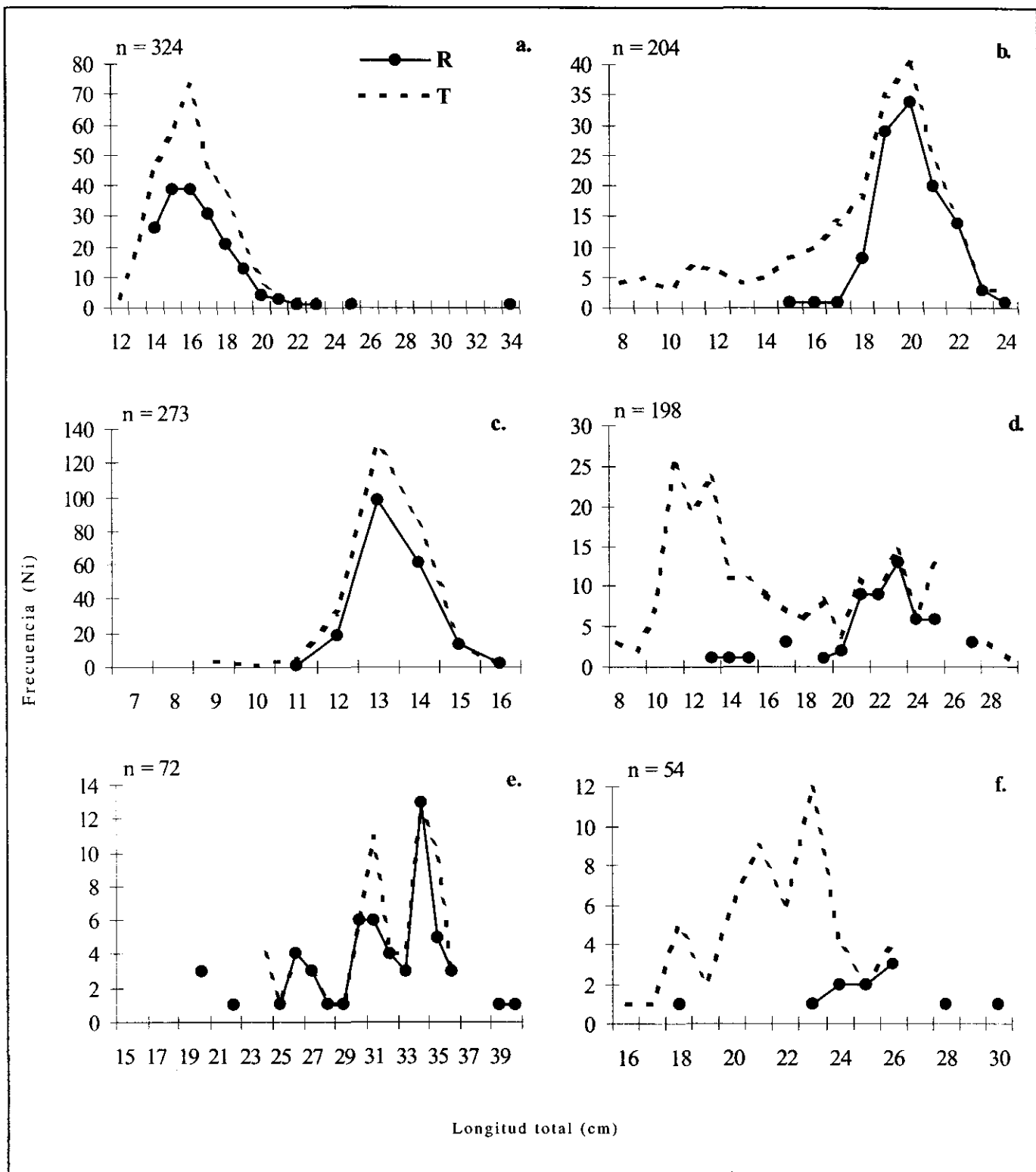


Figura 4. Curvas de captura retenida (R) y total (T), de las principales especies comerciales de la CGSM. a = *Eugerres plumieri*, b = *Micropogonias furnieri*, c = *Diapterus rhombeus*, d = *Cathorops spixi*, e = *Elops saurus* y f = *Mugil incilis*.

La correlación encontrada entre la captura total y la retenida en número (Fig. 3b), muestra como valores altos de captura total no están asociados necesariamente con los valores mayores de captura retenida, como sí ocurre en la misma relación en peso (Fig. 3a). La razón es que aquellos lances con abundancia mayor de 70 peces corresponden en su mayoría a Engraulidos, los cuales por su pequeño tamaño escapan entre las mallas del boliche prototipo.

El factor de retención estimado tanto en peso como en número está sesgado por que no incluye una gran parte de la captura de algunas especies tales como Engraulidos los cuales, aunque no son de importancia comercial, son importantes para la estimación de la biomasa total con el método de área barrida. Dado que no existe una correlación significativa entre la captura total y los factores de retención (Fig. 3c y 3d), es aceptable el uso del valor promedio obtenido en este trabajo $R1 = 0.47$ y $R2 = 0.24$, \pm un intervalo de confianza de 0.04. Esto con el fin de corregir los datos de captura por unidad de esfuerzo mediante el método de área barrida usando el boliche.

Los coeficientes de variación de $R1$ y $R2$ (33% y 56% respectivamente) son producto de factores tales como el tamaño, la forma y el comportamiento del pez al encuentro con la red. Es así que especies como *E. saurus* de cuerpo oblongo, redondeado, flácido y de gran talla (hasta 40 cm) se enredan fácilmente y por lo tanto muestran el mayor factor de retención (Tabla 2). Contrariamente ocurre con especies como *M. incilis* de cuerpo igualmente oblongo pero más rígido, de gran movilidad y menor talla (hasta 30 cm) que logran escapar en algunos casos entre las mallas, y en consecuencia aparecen como las de menor factor de retención. Caso similar se da con *C. spixi* y algunas veces con *E. plumieri* las cuales no fueron retenidas aún en tallas grandes (Fig. 4), debido a su tendencia a permanecer en el centro del área encerrada por la red.

Igualmente como se recomendó el empleo de $R1$ y $R2$ para la estimación de biomasa total, este estudio destaca el uso potencial de los datos de factor de retención para las especies comerciales, a la hora de estimar el tamaño del "stock" de un recurso íctico objeto de explotación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), el apoyo logístico; a COLCIENCIAS y al proyecto Colombo-Alemán de Re-

habilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta (**PRO-CIENAGA**) en la persona de su codirector en la fase I Dr. Horst Salzwedel, por el apoyo financiero suministrado para la realización del presente trabajo. También a la Dra. Leonor Botero, a la M.Sc. Adriana Santos-Martínez del INVEMAR y a la Dra. Claudia Wosnitza-Mendo, por la lectura crítica del artículo. Así mismo, a los señores Lorenzo Pérez, Francisco Castillo y Carlos Carbonó, pescadores artesanales de la CGSM, por su invaluable empeño en las actividades de campo.

Bibliografía

- Arias, P. 1988. Artes y métodos de pesca en aguas continentales de América Latina. COPECAL. Doc. Ocas., (4): 178p.
- Botero, L. 1988. Caracterización ecológica de la Ciénaga Grande de Santa Marta, una laguna costera tropical en la costa Caribe de Colombia: 1-47. En: L. Botero (Ed.). Estudio Ecológico de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Inf. final, Proy., COLCIENCIAS-INVEMAR. Santa Marta.
- Botero, J. E. y L. Botero. 1989. Problemática del Sistema Ciénaga Grande de Santa Marta, Delta Exterior del Río Magdalena. En: Colombia y el agua: tres aspectos. Bogotá. Fescol 5: 11-28.
- Botero, L. y J. E. Mancera. 1996. Síntesis de los cambios de origen antrópico ocurridos en los últimos 40 años en la Ciénaga Grande de Santa Marta (Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc.: Vol. XX, Número 78: 465-474.
- Gallo, J. 1988. Análisis preliminar de los artes y métodos de pesca en la Ciénaga Grande de Santa Marta, con énfasis en el método del bolicheo. TRIANA. 1: 229-242.
- Karlsen, L. y B. A. Bjarnason. 1989. La pesca artesanal con redes de enmalle de deriva. FAO Doc. Téc. pesca, Roma, 284: 1-60.
- Mancera, J. y L. Botero. 1993 (Eds). Estudio ecológico de la Ciénaga Grande de Santa Marta, delta exterior del Río Magdalena, 3ra. etapa. Informe de avance. Proy. COLCIENCIAS - INVEMAR. 128p.
- Nédélec, C. 1982. Definition and classification of fishing gear categories. FAO Fish. Tech. Pap. Roma, 222: 51p.
- Rueda, M. 1995. Evaluación de la eficiencia y selectividad de redes de enmalle en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. Tesis Ing. Pesquero, Facultad de Ingeniería. Universidad del Magdalena. Santa Marta. 107p.
- _____ y J. E. Mancera. 1995. Alteraciones físicoquímicas de la columna de agua, generadas por el uso del boliche (método de pesca artesanal) en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. An. Inst. Invest. Mar. Punta Betón. 23: 23-37.
- Sparre, P. y S. C. Venema. 1995. Introducción a la evaluación de recursos pesqueros tropicales. Parte 1. Manual. FAO Documento Técnico de Pesca. Valparaíso, Chile, No. 306 (1): 420pp.
- STSC Inc. 1991. Statistical graphics system. Reference Manual. Versión 5.2. Statistical Graphics Corporation, Rockville (MD). United States of America.

ENERGIA DEL ESTADO BASE DE ATOMOS DE LA SUCESION ISOELECTRONICA DEL ORTOHELIO

por

Hector Roger Maya[#], Diógenes Campos R.*

Resumen

Maya, H.R., & D. Campos: Energía del estado base de átomos de la sucesión isoelectrónica del ortohelio. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(81): 497-501, 1997. ISSN: 0370-3908.

Este artículo trata el problema de determinar la energía del estado base para átomos de la sucesión isoelectrónica del ortohelio ($2 \leq Z \leq 10$) mediante una combinación del modelo de Eckart y de la teoría de perturbaciones en la primera aproximación de Born.

Palabras claves: Helio, ortohelio, modelo de Eckart, teoría de perturbaciones.

Abstract

This paper address the problem of finding the quantum energy of the ground state of the orthohelium isoelectronic sequence ($2 \leq Z \leq 10$) by combining the Eckart model and the perturbation theory in the so-called First Born approximation.

Key words: Helium, orthohelium, Eckart's model, perturbation theory.

Campos 1995a; Eckart 1930; Froese Fischer 1977; Sanders y Scherr 1969; Tripathy y otros 1995).

1. Introducción

La determinación de la energía del estado base de átomos de dos electrones ha sido objeto de interés desde los trabajos pioneros de Hylleraas (Hylleraas 1929; Hylleraas 1930; Hylleraas 1964) hasta el presente (Arias de Saavedra y Buendía 1994; Brändas y Goscinski 1970; Callan 1973;

En virtud de las reglas de acoplamiento del momentum angular, el espín electrónico total de un átomo de helio toma el valor cero ($S = 0$, parahelio) o el valor uno ($S=1$, ortohelio). La configuración electrónica para el estado base del parahelio es $(1s)(1s)$ mientras que la del ortohelio es $(1s)(2s)$.

[#] Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. Trabajo Final en el programa de Especialización en Ciencias Físicas de la Universidad Nacional de Colombia.

* Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. E-mail: dcamposr@ciencias.ciencias.unal.edu.co

En un trabajo anterior uno de nosotros (Campos 1995a) utilizó el modelo de Eckart (Eckart 1930) para determinar la energía del estado base de los diez primeros átomos de la sucesión isoelectrónica del parahelio. En el presente trabajo consideramos los diez primeros átomos de la sucesión isoelectrónica del ortohelio y calculamos la energía del estado base.

Primero se hace uso del modelo de Eckart para determinar las cargas nucleares óptimas $Z_a e$ y $Z_b e$ que mejor describen el átomo de dos electrones en el sentido del método variacional. Después, se mantienen fijos los valores óptimos de $Z_a e$ y $Z_b e$, y se optimizan los resultados mediante aplicación de la teoría de perturbaciones en la primera aproximación de Born (Campos 1995b), considerando sólo correcciones debidas al segundo nivel de los átomos hidrogenoides de cargas nucleares $Z_a e$ y $Z_b e$. Finalmente, los resultados así obtenidos se comparan con los de otros autores (Sanders y Scherr 1969).

2. Modelo de Eckart

El hamiltoniano no relativista de un átomo de carga nuclear Ze y dos electrones (carga $-e$), se escribe en la forma

$$\mathcal{H}^{(0)} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_1^2 - \frac{Ze^2}{r_1} \right) + \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_2^2 - \frac{Ze^2}{r_2} \right) + \frac{e^2}{r_{12}}, \quad (1)$$

donde m es la masa reducida del electrón, y los subíndices 1 y 2 rotulan los electrones. Siguiendo a Eckart (Eckart 1930), escribimos

$$\mathcal{H}^{(0)} = \hat{H}^{(0)} + \hat{V}, \quad (2)$$

donde introdujimos los operadores

$$\hat{H}^{(0)} := \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_1^2 - \frac{Z_a e^2}{r_1} \right) + \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_2^2 - \frac{Z_b e^2}{r_2} \right), \quad (3)$$

$$\hat{V} := \frac{(Z_a - Z)e^2}{r_1} + \frac{(Z_b - Z)e^2}{r_2} + \frac{e^2}{r_{12}}. \quad (4)$$

El operador $\hat{H}^{(0)}$ se interpreta como un sistema no perturbado formado por dos átomos hidrogenoides no interactuantes, con carga nuclear $Z_a e$ y $Z_b e$, respectivamente, mientras que \hat{V} describe la perturbación que afecta a $\hat{H}^{(0)}$. La elección de los parámetros $Z_a e$ y $Z_b e$ se fija con base en el método variacional.

Para determinar el estado base del ortohelio tenemos en cuenta que la función de onda electrónica total se forma

como el producto de una parte espacial $\psi^-(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ por una función $Q_{SM}(\mu_1, \mu_2)$ que describe el estado de espín del electrón (Campos 1997). Como el estado base del ortohelio está asociado con la configuración $(1s)(2s)$ la parte espacial de la función de onda es antisimétrica con relación a la permutación de las coordenadas espaciales de los electrones, y se construye por medio de la relación

$$\psi^-(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \sqrt{\frac{1}{2}} N^- \left[\varphi_a(\vec{r}_1) \varphi_b(\vec{r}_2) - \varphi_b(\vec{r}_1) \varphi_a(\vec{r}_2) \right]. \quad (5)$$

N^- es una constante de normalización, y $\varphi_a(\vec{r})$ y $\varphi_b(\vec{r})$ son funciones que representan, de manera respectiva, el orbital $1s$ de un átomo hidrogenoide con carga nuclear $Z_a e$ y el orbital $2s$ de un átomo hidrogenoide de carga nuclear $Z_b e$:

$$\varphi_a(\vec{r} | Z_a) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z_a}{a_0} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{Z_a}{a_0} r\right), \quad (6)$$

$$\varphi_b(\vec{r} | Z_b) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z_b}{2a_0} \right)^{3/2} \left[1 - \frac{Z_b}{2a_0} r \right] \exp\left(-\frac{Z_b}{2a_0} r\right). \quad (7)$$

Los orbitales $\varphi_a(\vec{r})$ y $\varphi_b(\vec{r})$ están normalizados a uno pero no son ortogonales debido a que están asociados con cargas nucleares diferentes. Por lo tanto, la constante de normalización N^- se determina por la relación

$$N^- = \frac{1}{1 - |S^-|^2}, \quad (8)$$

donde S^- designa la integral de superposición entre los orbitales,

$$S^- = \int \varphi_a^*(\vec{r} | Z_a) \varphi_b(\vec{r} | Z_b) d^3\vec{r}. \quad (9)$$

Al seguir un procedimiento análogo al descrito para el caso del parahelio (Campos 1995a), se determina el valor esperado de la energía con relación a la función de onda espacial $\psi^-(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$. Este procedimiento da lugar a una expresión para la energía del estado base, $E(Z_a, Z_b)$, la cual depende de los parámetros Z_a y Z_b . Como estos parámetros son arbitrarios, la elección física de ellos se hace con base en el principio variacional (Campos 1997) exigiendo el cumplimiento de las relaciones

$$\frac{\partial}{\partial Z_a} E(Z_a, Z_b) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial Z_b} E(Z_a, Z_b) = 0. \quad (10)$$

La tabla-1 muestra los resultados de los parámetros variacionales y de la energía del estado base para los nueve primeros átomos de la sucesión isoelectrónica del ortohelio, los cuales se distinguen por el valor del número atómico Z .

Z	Z_a	Z_b	$E(Z_a, Z_b)$
2	1.993	1.551	-2.16663988
3	2.999	2.570	-5.10257824
4	4.002	3.577	-9.28915699
5	5.003	4.582	-14.7259511
6	6.004	5.584	-21.4128445
7	7.005	6.586	-29.3497917
8	8.006	7.589	-38.5367716
9	9.006	8.588	-48.9737727
10	10.006	9.589	-60.6607885

Tabla 1. Energía variacional para los nueve primeros átomos de la sucesión isoelectrónica del ortohelio en el modelo de Eckart. La energía se especifica en unidades atómicas. Para el caso de $Z = 2$, el valor experimental de la energía es de -2.17519 unidades atómicas (Grau 1988).

En todos los casos $Z_a > Z_b$, lo cual indica que el electrón en el orbital $1s$ apantalla la carga nuclear y por lo tanto el electrón $2s$ "ve" una carga nuclear menor. Este afirmación se base en el hecho de que la densidad radial asociada con el orbital $1s$,

$$F(n_a, r) := r^2 \left| \varphi_a(\bar{r} | Z_a) \right|^2, \quad (11)$$

está más cercana al núcleo atómico que la densidad radial asociada con el orbital $2s$,

$$F(n_b, r) := r^2 \left| \varphi_b(\bar{r} | Z_b) \right|^2, \quad (12)$$

lo cual se ilustra en la figura-1 para el caso de dos átomos diferentes ($Z = 2$ y $Z = 3$).

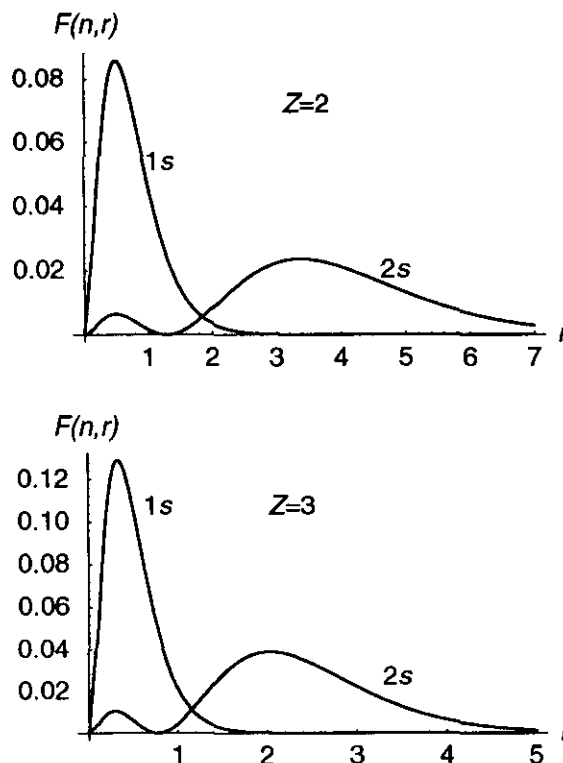


Figura 1. Comportamiento de las funciones $F(n_a, r)$ y $F(n_b, r)$ asociadas respectivamente con el átomo hidrogenoide ($Z_a e, -e$) en el orbital $1s$ y con el átomo hidrogenoide ($Z_b e, -e$) en el orbital $2s$, para dos átomos de la sucesión isoelectrónica del ortohelio ($Z = 2$ y $Z = 3$).

3. Optimización de la energía con el método de Born

Para cada átomo de la sucesión isoelectrónica del ortohelio suponemos, en lo que sigue, que los parámetros Z_a y Z_b tienen los valores numéricos especificados en la tabla-1.

Con el fin de optimizar los valores de energía que figuran en esa tabla aplicaremos la teoría de perturbaciones en la modalidad bautizada como primera aproximación de Born (Campos 1997, pg. 52).

Usamos la partición del hamiltoniano $\hat{\mathcal{H}}^{(0)}$ especificada por la ecuación (2). Los estados propio del hamiltoniano no perturbado $\hat{H}^{(0)}$ se construyen a partir de los orbitales hidrogenoides por medio de la generalización de la expresión (5), en la forma

$$\Psi_{\vec{k}}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \sqrt{\frac{1}{2} N_{\vec{k}}} \times$$

$$\left[\varphi_{a_k}(\vec{r}_1) \varphi_{b_k}(\vec{r}_2) - \varphi_{b_k}(\vec{r}_1) \varphi_{a_k}(\vec{r}_2) \right]. \quad (13)$$

El subíndice k es un entero que rotula los estados propios ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) del hamiltoniano $\hat{H}^{(0)}$, el cual representa un sistema formado por los átomos hidrogenoides ($Z_a e, -e$) y ($Z_b e, -e$). Tal como se muestra en la tabla-2, los números cuánticos que identifican los orbitales espaciales de los átomos ($Z_a e, -e$) y ($Z_b e, -e$) se designan como

$$a_k = (n_{a_k}, \ell_{a_k}, m_{a_k}), \quad b_k = (n_{b_k}, \ell_{b_k}, m_{b_k}). \quad (14)$$

Dentro de la primera aproximación de Born (Campos 1997, pg.52), al tener en cuenta la identidad $V_{k1} = V_{1k}$, se obtiene que el estado base del ortohelio está dado por la relación

$${}^1B E_1 = E_1^{(0)} + V_{11} + \sum_{k \neq 0, 1} \frac{|V_{1k}|^2}{E_1^{(0)} - E_k^{(0)}}, \quad (14)$$

k	Orbital átomo ($Z_a e, -e$)	Orbital átomo ($Z_b e, -e$)	Ecuación (13)
	$n_{a_k}, \ell_{a_k}, m_{a_k}$	$n_{b_k}, \ell_{b_k}, m_{b_k}$	
0	1 0 0	1 0 0	
1	1 0 0	2 0 0	
2	1 0 0	2 1 1	
3	1 0 0	2 1 0	
4	1 0 0	2 1 -1	
5	2 0 0	2 0 0	
6	2 0 0	2 1 1	
7	2 0 0	2 1 0	
8	2 0 0	2 1 -1	
9	2 1 1	2 1 1	
10	2 1 1	2 1 0	
11	2 1 1	2 1 -1	
12	2 1 0	2 1 0	
13	2 1 0	2 1 -1	
14	2 1 -1	2 1 -1	
...

Tabla 2. Las funciones propias del hamiltoniano no perturbado, $\hat{H}^{(0)}$, se construyen con ayuda de la ecuación (13) y se enumeran con el rótulo k .

en la cual el estado $k = 0$ de la tabla-2 no contribuye debido a que la configuración (1s)(2s) es la que determina el estado base del ortohelio. $E_1^{(0)} = E(Z_a, Z_b)$ y $E_k^{(0)}$ designan la energía del estado base y de los estados excitados del hamiltoniano $\hat{H}^{(0)}$, según la codificación de la tabla-2. En (14) intervienen los elementos matriciales de la perturbación \hat{V} , dada por la ecuación (4),

$$V_{1k} = \langle \psi_1 | \hat{V} | \psi_k \rangle. \quad (15)$$

La suma de la ecuación (14) corre sobre todos los estados del espectro discreto y del espectro continuo del hamiltoniano $\hat{H}^{(0)}$. Por razones prácticas aproximaremos los cálculos incluyendo sólo contribuciones debidas a los estados $k = 2, 3, \dots, 14$, los cuales están asociados con el estado base y con el primer nivel excitado de los átomos hidrogenoides. Por razones de simetría las únicas contribuciones diferentes de cero en (14) provienen de los estados $k = 5, 11$ y 12 , tal como se indica en la tabla-3 para el caso del átomo de ortohelio ($Z = 2$).

k	V_{1k}	$E_k^{(0)}$	$\frac{ V_{1k} ^2}{E_1^{(0)} - E_k^{(0)}}$
5	-0.0737081	-0.613664	-4.13464×10^{-3}
11	0.00471998	-0.772998	-1.92941×10^{-5}
12	-0.0171664	-0.473444	-2.02643×10^{-4}
Corrección total			-0.00435658

Tabla 3. Correcciones a la energía del modelo de Eckart para el átomo de ortohelio ($Z = 2$), calculadas con base en la primera aproximación de Born de la teoría de perturbaciones y considerando sólo los estados $k = 2, 3, \dots, 14$ enumerados en la tabla-2.

En la tabla-4 se muestran las correcciones ΔE_1 al modelo de Eckart (tabla-1) debidas a la teoría de perturbaciones, al igual que la energía total ${}^1B E_1$ calculada con base en la primera aproximación de Born. Para fines de comparación se incluyen también en la tabla-3 los valores E_{SC} obtenidos por Sanders y Scherr (Sanders y Scherr 1969) en cálculos de alta precisión con la teoría de perturbaciones, empleando correcciones hasta orden 17.

Z	$\frac{1B}{\Delta E_1}$	$\frac{1B}{E_1}$	E_{SC}
2	-0.00435655	-2.1710	-2.17522936
3	-0.00411178	-5.10669	-5.11072736
4	-0.00407248	-9.29323	-9.29716658
5	-0.00406564	-14.730	-14.7738973
6	-0.00406670	-21.4169	-21.4207558
7	-0.00406988	-29.3539	-29.3576817
8	-0.00407348	-38.5408	-38.5446473
9	-0.00407696	-48.9778	-48.9816383
10	-0.00408016	-60.664	-60.6686465

Tabla 4. Las columnas $\frac{1B}{\Delta E_1}$ y $\frac{1B}{E_1}$ designan la corrección al modelo de Eckart (tabla-1) debida a la teoría de perturbaciones y la energía total calculada en la primera aproximación de Born, respectivamente. La columna E_{SC} son datos teóricos de Sanders y Scherr (Sanders y Scherr 1969). Los valores están en unidades atómicas.

4. Conclusión

La concordancia de valores hasta la segunda cifra decimal, entre las dos últimas columnas de la tabla-4, indica que el modelo empleado en el presente trabajo conduce a muy buenos resultados. Tiene además la ventaja de ser conceptualmente sencillo y de requerir un esfuerzo numérico inferior al que requieren los cálculos de Sanders y Scherr (Sanders y Scherr 1969). El valor teórico obtenido concuerda también de manera razonable con el valor experimental, el cual para el caso de $Z = 2$, es de -2.17519 unidades atómicas (Grau 1988).

5. Bibliografía

Arias de Saavedra, F. & E. Buendía. 1994. Perturbative-variational approximation of the ground state of two-electron atoms. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **27**: 1277.

Brändas, E. & O. Goscinski. 1970. Variational-Perturbations and Padé Approximants to the Energy. *Phys. Rev. A* **1(3)**: 552-560.

Callan, E.J. 1973. On the Energies of Two-Electron Atoms and Ions. *Int. J. Q. Chem. Symp.* **7**: 111-115.

Campos, D. 1995a. Átomos de dos electrones en el estado base: Comparación de algunas predicciones teóricas. *Momento* **11**: 17-26.

Campos, D. 1995b. On the Time-Independent Perturbation Theory. *Z. Naturforschung* **50a(8)**: 727-736.

Campos, D. 1997. Fundamentos de física atómica y molecular. Bogotá: Editorial Universidad Nacional.

Eckart, C. 1930. The Theory and Calculation of Screening Constants. *Phys. Rev.* **36**: 878.

Froese Fischer, C. 1977. The Hartree-Fock Method for Atoms. New York: Wiley.

Grau, D. 1988. Übungsaufgaben zur Quantentheorie. München: Carl Hanser Verlag.

Hylleraas, E.A. 1929. Neue Berechnung der Energie des Heliums im Grundzustande, sowie des tiefsten Terms von Ortho-Helium. *Z. Phys.* **54**: 347.

Hylleraas, E.A. 1930. Ueber den Grundterm der Zweielektronenprobleme von H^- , He, Li^+ , Be^{++} , usw. *Z. Phys.* **65**: 209.

Hylleraas, E.A. 1964. The Schrödinger Two-Electron Atomic Problem en Löwdin P.-O. (ed.) *Advances in Quantum Chemistry*. **1**. Academic Press. New York. 1-33.

Sanders, F.C. & C.W. Scherr. 1969. Perturbation Study of some Excited States of Two-Electron Atoms. *Phys. Rev.* **181(1)**: 84-97.

Tripathy, D.N., B. Padhy, & D.K. Rai. 1995. Two-parameter wavefunction for the ground state of the helium isoelectronic sequence. *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **28**: L41-L46.

ENRIQUE HUBACH (1896-1968) Y LA GEOLOGIA COLOMBIANA

por

Ricardo de la Espriella y Armando Espinosa Baquero

Resumen

De la Espriella, R. & A. Espinosa: Enrique Hubach (1896-1968) y la geología colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21**(81): 503-519, 1997. ISSN: 0370-3908.

Se presenta una síntesis biográfica del notable geólogo chileno Enrique Hubach, destacando sus aportes al desarrollo de esta disciplina en Colombia, como integrante de la Comisión Científica Nacional y del Servicio Geológico Nacional. Se publica una detallada relación de sus publicaciones.

Palabras claves: Geología, Historia de la..., Colombia.

Abstract

A biographic synthesis is given of the noted Chilean geologist, Enrique Hubach, focused on his role in the development of the geology in Colombia, as a member of the National Scientific Commission and National Geological Service. This synthesis is related to his publications.

Key words: Geology, History of..., Colombia.

Varios artículos en el pasado han reseñado el protagonismo histórico de Enrique Hubach, entre los cuales los de **Ramírez** (1955), **Durán** (1973), **Botero** (1978) y **Espinosa** (1984) encuadran su papel dentro del desarrollo de las investigaciones geológicas en Colombia. Adicionalmente, **Del Llano** (1968) se refirió a su vida y su obra en la nota necrológica publicada en la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, entidad de la cual Hubach fue Miembro Correspondiente, y en 1985, dentro del marco de un proyecto interdisciplinario sobre la historia de la ciencia en Colombia, **Espinosa** (1988) adelantó una investigación específica sobre su obra geológica.

Con ocasión del centenario de su nacimiento, el VII Congreso Colombiano de Geología, reunido en Agosto de 1996 en Santa Fe de Bogotá, dedicó una sesión especial a destacar su papel en el desarrollo de la geología en Colombia, haciendo énfasis en tres aspectos fundamentales: su trayectoria profesional, su contribución institucional y su aporte a la docencia.

Trayectoria profesional

El conocimiento que hoy día predomina en el ambiente académico y científico sobre la obra geológica de Enrique Hubach es limitado. Nació el 25 de enero de 1896

en Osorno, provincia de Osorno, Chile, de padres alemanes emigrados en la segunda mitad del siglo XIX, e hizo sus estudios primarios en Osorno y los secundarios en el Liceo Kassel de Prusia. Ingresó luego a la Universidad de Berlín donde estudió geología.

En 1923 el Gobierno de Colombia solicitó a través de su embajada en Berlín dos geólogos para el Ministerio de Industrias. Fueron escogidos Ernest Scheibe y Enrique Hubach. Este último fue vinculado a la Sección Técnica del Ministerio y comisionado inmediatamente para efectuar exploraciones petroleras en Urabá y en el Catatumbo. Era la época crucial del comienzo de la industria petrolera en el país.

Cuando Hubach llegó a Colombia en 1924, la región de Urabá estaba prácticamente inexplorada tanto desde el punto de vista geográfico como geológico. Consciente de ese desconocimiento, la Comisión Científica Nacional había encargado de su estudio al Dr. Behr-Heider, quien en 1923 había iniciado sus investigaciones en el área de Dabeiba. Pero cuando apenas comenzaba desde allí a esclarecer las condiciones estratigráficas regionales, murió ahogado en el río Sucio al trasladarse a Pavaradoncito y la exploración se suspendió hasta finales del año siguiente, cuando Hubach asumió la jefatura del equipo de trabajo.

La logística de una exploración geológica en los años veintes en Colombia era considerablemente diferente de lo que es hoy día. No existían entonces vías de penetración casi de ninguna clase; y víveres, provisiones y alojamiento tenían que cargarse a las espaldas. Ni habían mapas topográficos creíbles, a escalas adecuadas, sobre los cuales consignar las anotaciones geológicas.

Sin embargo, Hubach comentaba optimista sobre Urabá en esa época:

"... por estar amurallado y distanciado del interior, se le considera un infierno, utopía vertida por inconscientes o malévolos, que el sentido patriótico debe refutar con toda serenidad y energía. Claro que no es una región saludable y que hay que soportar algunos inconvenientes, pero eso solo por falta de cultivo y civilización. (El departamento de) Bolívar, antes de la penetración agrícola, también lo era. Si no se consideran las cosas más allá de la impresión inmediata, no puede haber progreso. Hay que pesar las ventajas y desventajas para obtener del balance un criterio justo".

Pero más adelante informaba que...

"... La primera investigación ... no dio los resultados que se esperaba obtener, primeramente porque ella se inició en plena época de lluvias, la cual se prolongó hasta finales de Enero. Debido a que los estudios geológicos (en) la propia zona de exploración se reducen al reconocimiento de los ríos y quebradas, que únicamente revelan los afloramientos de las rocas, y como los caudales de éstos impedían el avance por los lechos, obligando a continuos cruces a nado o a vado y a desvíos dispendiosos por los filos para vencer las angosturas, los levantamientos continuos se hicieron imposibles y el estudio hubo que restringirlo a la definición de los rasgos generales...

Tampoco contribuyó al conocimiento detallado la crudeza con que se presentaron las enfermedades tropicales... El término de este viaje coincidió con el abandono obligatorio de los trabajos por razones de salud. Mientras el geólogo realizaba estas exploraciones, el topógrafo encargado de la habilitación de la Comisión, cuyo cuidado ocasionaba pérdidas considerables de tiempo, con los viajes a Medellín y a Cartagena, procedió al levantamiento taquimétrico del camino, fundamental para los trabajos de exploración. Esta labor se logró llevar a cabo, por entre los fangales y matorrales que caracterizaban el camino, hasta la quebrada del Muerto. Aquí se suspendieron los trabajos por enfermedad del topógrafo".

Y terminaba Hubach:

Los resultados de esta exploración, en que los miembros de la Comisión hubimos de pagar el noviciado en estudios de selvas tropicales, fueron un conocimiento general de las condiciones geográficas y geológicas de Urabá".

Ese conocimiento sí lo adquirieron Hubach y sus colaboradores, y sus resultados, junto con una serie de conceptos sobre sus perspectivas petrolíferas, fueron el objeto de una serie de informes. Pero si los resultados geográficos y geológicos obtenidos durante esos diez meses que duró la exploración fueron abundantes, mirado en retrospectiva lo más importante que se logró fue la concepción de Hubach de que ellos no eran suficientes si no se encuadraban dentro de una visión regional.

Ya en Urabá Hubach se dio cuenta que existía un cierto orden sistemático en la conformación geológica del país y que para poder determinarlo era necesario abarcar más

ampliamente el escenario regional y desprender los rasgos fundamentales, de los múltiples detalles que los enredan. A eso dedicó toda su vida profesional.

Su metodología partió de lo que Stille había llamado el Método de la Construcción Andina, que había reconocido en principio la construcción longitudinal de los Andes y había dado, en lo referente a la determinación de los rasgos longitudinales, los primeros pasos para la definición transversal.

Basado en esos principios, Hubach comenzó por hacer apreciaciones teóricas sobre las condiciones geológicas y petrolíferas de ciertas áreas, por ejemplo la Cordillera Oriental desde la Sabana de Bogotá hasta Norte de Santander, o la región del Valle-Cauca, y dedicó considerable tiempo a su estudio de terreno para confirmar esas evaluaciones. El desarrollo del pensamiento de Hubach en esa época sobre la geología de Colombia se consignaba paso a paso, no solo a través de los informes que hoy día de él conocemos, sino por medio de una serie de versiones de esos informes en que iba modificando parcialmente conceptos y resultados a medida que los iba trabajando.

Un ejemplo fascinante de ese tipo de concepción regional es la Geología de los Departamentos del Valle y del Cauca que escribió en 1934 con su docto colega Benjamín Alvarado Biester. En ese artículo describen con mucho detalle la litología, la tectónica y los recursos carboníferos del área. Pero tanto cuidado como le dedican sus autores a la investigación de cada uno de estos temas, casi que quedan opacados ante el magistral encuadramiento de su área de estudio dentro de la geología de Colombia, y el encuadramiento y comparación de la geología de Colombia con la geología de Norte y Sur América.

Si el artículo sobre la Geología del Valle y del Cauca es una obra maestra de la literatura geológica de la Cordillera de los Andes, no lo son menos los varios Informes Geológicos de Urabá entre 1925 y 1930 a que antes nos referíamos, o su Geología Petrolífera de Norte de Santander de 1931, o sus Estudios Geológicos en la Ruta Popayán-Bogotá, otra vez con Benjamín Alvarado, de 1932, o su Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y Alrededores, de 1951, o su Contribución a las Unidades Estratigráficas de Colombia, de 1957, para no citar sino algunas.

Entre 1931 y 1934, Hubach dirigió la Comisión Científica Nacional, antecesora del Servicio Geológico Nacional. Luego fue profesor de la Universidad Nacional. De 1938 a 1944 actuó como geólogo jefe de la Shell Oil

en Colombia, y a partir de 1945 se estableció en Popayán, hasta que en 1950 asumió la dirección del Servicio Geológico Nacional. Regresó a Popayán en 1959, y durante ese período colaboró esporádicamente con el Instituto de Fomento Industrial y fue profesor en la Universidad del Cauca. Murió el 23 de Septiembre de 1968, y está enterrado en su hacienda de Genagra, en las afueras de Popayán.

Pretender conceptuar en detalle sobre la obra geológica de Hubach es prematuro. La mayor parte de sus artículos todavía son apenas manuscritos inéditos, a pesar de que en los últimos años el Instituto Colombiano de Investigaciones Geológico-Mineras (INGEOMINAS) ha publicado algunas de sus obras más importantes.

Y aún compilar su bibliografía completa es todavía muy difícil, porque su producción para la Compañía de Petróleos Shell, por ejemplo, no está disponible. Existen además rumores de que en algunas bibliotecas se puede encontrar material adicional, tema que no se ha investigado rigurosamente.

Pero sí existen, en forma más o menos consultable, casi doscientos cincuenta de sus artículos científicos, en los que a través de una gran diversidad de disciplinas, Hubach estudió gran parte de la geología del territorio nacional, sobre todo de la región andina. La simple revisión de sus títulos es prueba que completar la publicación de su obra, como primer paso a la clasificación de la información allí contenida, es una labor que por muchas décadas ha sido postergada, y que debería ser un proyecto de primera prioridad. Es muy claro que el resultado de ese procesamiento sería una contribución valiosísima tanto para aquellos a los que repetidamente nos ha frustrado descubrir posteriormente que el resultado de nuestras investigaciones ya había sido descubierto y descrito por Hubach, como para los que todavía no han tenido la oportunidad de descubrirlo.

Contribución Institucional

En 1916 el Gobierno Nacional creó la Comisión Científica Nacional, entidad que, a pesar de su nombre, tenía fines exclusivamente geológicos. Sus objetivos principales eran elaborar el mapa geológico de Colombia y hacer el inventario y la exploración de recursos mineros. En ese momento Colombia no contaba con geólogos preparados para orientar la institución y cumplir sus objetivos y por lo tanto, para iniciar sus trabajos, contrató al geólogo alemán Robert Scheibe, quien estaba en Colombia al servicio de una empresa minera

dedicada a la explotación de esmeraldas. Sus primeros colaboradores colombianos fueron los geólogos Ricardo Lleras Codazzi y Jesús Jiménez, con algunos topógrafos. Scheibe murió en 1923 y para reemplazarlo se contrató a Otto Stutzer, quien desempeñó el cargo hasta 1926. Posteriormente, de 1928 a 1931, lo reemplazó el geólogo alemán Emil Grosse.

La Comisión adelantó los primeros trabajos sistemáticos sobre la geología del país aunque permanentemente se enfrentaba con el problema de insuficiencia de personal científico capacitado. En 1931 le correspondió a Enrique Hubach dirigirla y para ello solamente contaba con el ingeniero-topógrafo Benjamín Alvarado, quien afortunadamente ya entonces había adquirido suficientes conocimientos geológicos para convertirse en su mano derecha. No obstante esas limitaciones, la época de Hubach fue altamente productiva para la Comisión por dos razones:

- Prácticamente descargados de tareas administrativas, Hubach y Alvarado pudieron adelantar muchos trabajos, varios de los cuales están entre las grandes contribuciones al conocimiento geológico de Colombia.
- Con el apoyo del Ministro de Industrias, Francisco José Chau, y del Jefe de la Sección Técnica del Ministerio, Jorge A. Perry, la Comisión creó la primera publicación seriada sobre geología colombiana, la *Compilación de Estudios Geológicos Oficiales en Colombia*, CEGOC.

Al retirarse Hubach de la Comisión Científica Nacional en 1934 y ausentarse Alvarado del país en 1935 para adelantar estudios de doctorado en geología, la institución se paralizó hasta 1939, cuando se creó el Ministerio de Minas y Petróleos y, adscrito a éste, el Servicio Geológico Nacional.

Con el Servicio, que funcionó de 1939 a 1969 (entre 1953 y 1957 se denominó Instituto Geológico Nacional), el país contó con una institución que contribuyó decididamente a su desarrollo. En su comienzo, su personal fue mayormente compuesto por geólogos extranjeros (Víctor Openheim, José Royo y Gómez, Edouard Raymond, y otros) y paralelamente varios ingenieros civiles emprendieron estudios de especialización en geología en Estados Unidos y Europa.

El Servicio prosiguió el estudio sistemático del territorio nacional, al principio dándole énfasis a sus recur-

sos mineros, debido a que la Segunda Guerra Mundial había creado la necesidad de autoabastecimiento. En su primera época se distinguen claramente dos etapas, marcadas por la personalidad de sus directores:

- 1940-1950: Bajo la dirección de Benjamín Alvarado los esfuerzos se encaminan a la búsqueda de recursos mineros y a geología aplicada.
- 1950-1957: Bajo la dirección de Enrique Hubach se enfatizan los estudios básicos sistemáticos, sin olvidar la búsqueda de recursos.

Estas dos etapas han sido llamadas la Edad de Oro del Servicio Geológico Nacional. Hubach logró la vinculación al país de especialistas de gran valor, tales como Hans Bürgl, estratígrafo y paleontólogo, Wolfgang Nelson, petrógrafo, Thomas Van der Hammen, palinólogo, Henri Raasveldt, fotogeólogo, Roberto Wokittel, geólogo minero, y otros más.

Alvarado y Hubach lograron del Servicio Geológico, con estilos diferentes que se complementaban entre sí, una institución modelo desde el punto de vista de la alta calidad de sus resultados, no solamente a nivel nacional sino también internacional. Mencionar los logros del Servicio Geológico sería tema demasiado extenso, pues estos abarcan además de los estudios básicos, la participación en la industria petrolera, la exploración y hallazgo de nuevos recursos (hierro y calizas son los principales), los aportes en ingeniería geológica, y el inicio de estudios ambientales.

Sus publicaciones son prueba de los resultados: en 1940 se acometió la publicación, en la serie de CEGOC y en el Boletín de Minas y Petróleos, de la información producida en los últimos años de la Comisión Científica Nacional y se continuó con la que iba adelantando posteriormente el Servicio. En 1944 se publicó el Mapa Geológico del país. En 1953 Enrique Hubach, consciente de que la producción científica de la institución superaba la capacidad de la *Compilación*, inició una serie adicional, el Boletín Geológico, y en 1957, al retirarse Hubach, la planta de personal incluía quince geólogos, mientras la Comisión Científica Nacional nunca contó con más de cinco.

Hubach y la Docencia

Entre los numerosos geólogos extranjeros que trabajaron en Colombia desde el siglo XIX, Enrique Hubach fue el único que trató de hacer escuela. Los intercambios entre los científicos europeos y Colom-

bia fueron numerosos desde cuando en 1801 Alejandro Humboldt visitó a Colombia, para luego desde Europa promover buena parte de las expediciones científicas que casi hasta finales del siglo visitaron nuestro país: Boussingault, Karsten, Hettner, Reiss y Stubel, y otras. Siguiéron en este siglo, aunque ya no en forma de expedición, los viajes de numerosos científicos. El propósito era, sin embargo, siempre el mismo: tomar datos de regiones estudiadas, llevarlos a Europa, analizarlos y publicar los resultados allí. Eran estudios de europeos y para europeos, lo cual explica que buena parte de los trabajos científicos hechos sobre Colombia durante el siglo XIX se encuentren más fácilmente en Europa que en Colombia. Escapa a esa regla, en parte, el naturalista francés Jean Baptiste Boussingault quien de manera informal ayudó a naturalistas criollos como Don Joaquín Acosta.

La contribución de Hubach como maestro fue inicialmente analizada por Espinosa (1988). La docencia formal de Hubach, como la de otros geólogos de su época, fue esporádica y se desarrolló dentro de facultades de ingeniería, pues no había estudios geológicos establecidos en las ciudades donde vivió. Más importante que esa actividad institucional (cátedras de geología en la Universidad Nacional y en la Universidad del Cauca) fue la docencia informal, que proviene de la actitud generosa del científico hacia otros científicos en formación. En esta línea de comportamiento hay que inscribir el apoyo que dio a jóvenes geólogos como Benjamín Alvarado y otros, y la incorporación al Servicio Geológico de varios científicos europeos de alto valor, con la idea de formar grupos de investigación que dieran encuadramiento a la naciente geología colombiana.

Referencias

- Botero-Arango, G.** 1971. Apuntes para una Historia de las Investigaciones Geológicas en Colombia: en Chaparro, F. & R. Sagasti, F. 1978, Ciencia y Tecnología en Colombia, págs. 147-180: Instituto Colombiano de Cultura, Subdirección de Comunicaciones Culturales, División de Publicaciones, Biblioteca Básica Colombiana, Editorial Escala, Bogotá.
- Del Llano, M.** 1968. Enrique Hubach: Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Vol. XIII, No. 50, pág. 291, Bogotá.
- Durán, L. G.** 1973. Reseña Histórica de la Geología en Colombia: Academia Colombiana de Historia, Historia Extensa de Colombia, Vol. XXIV, págs. 287-309, Bogotá.
- Espinosa, A.** 1984. Historia de las Investigaciones Geológicas en Colombia. Notas a Partir de la Segunda Mitad del Siglo XIX: Revista Ciencia Tecnología y Desarrollo, Vol. 8, Nos. 1-4, págs. 211-249, Bogotá.

_____. 1988. José María Cabal, Alejandro Humboldt y Enrique Hubach. Su Obra Geológica y su Contribución al Desarrollo de Colombia. Rev. Ciencia Tecnología y Desarrollo, Vol. 12, Nos. 1-4, págs. 223-251, Bogotá.

Ramírez, J. E. 1955. Los Alemanes y las Ciencias Geológicas y Geográficas en Colombia: Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia, Vol. XIII, Nos. 47-48, págs. 213-218, Bogotá.

_____. 1957. Bibliografía de la Biblioteca del Instituto Geofísico de los Andes Colombianos sobre Geología y Geofísica de Colombia (Segunda Edición): Instituto Geofísico de los Andes Colombianos, Serie C - Geología, Boletín No. 6, 521 págs., Imprenta del Banco de la República, Bogotá.

_____. 1973. Primer Suplemento a la Bibliografía de la Biblioteca del Instituto Geofísico de los Andes Colombianos sobre Geología y Geofísica de Colombia (Segunda Edición): Instituto Geofísico de los Andes Colombianos, Geología, Publicación Especial. 436 págs., Talleres Editoriales de la Librería Stella, Bogotá.

Royo y Gómez, J. 1945. Bibliografía Geológica, Geográfica y Minera de Colombia: Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia, Tomo VI, Anexo II, 127 págs., Editorial Kelly, Bogotá.

Venegas-Leyva, A. 1960. Bibliografía de los Informes del Instituto Geológico Nacional: Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia, Tomo IX, 591 págs., Editorial Voluntad Ltda., Bogotá.

_____. 1965. Bibliografía de los Informes del Instituto Geológico Nacional, Suplemento No. 1: Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia, 93 págs., Imprenta Nacional, Bogotá.

ANEXO BIBLIOGRAFIA DE LA OBRA GEOLOGICA DE ENRIQUE HUBACH

Esta bibliografía no pretende ser completa. Con muy contadas excepciones, la obra de Hubach, diferente de lo que produjo para el Ministerio de Industrias y para el Ministerio de Minas y Petróleos, no está disponible actualmente. Pero es de suponer que con el tiempo se descubra material que escribió, por ejemplo, para la Shell, para el Instituto de Fomento Industrial, para la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá y otras obras en bibliotecas privadas, a las cuales no hubo acceso para esta compilación.

Buena parte de los artículos aquí citados se han clasificado como Informes de Ingeominas. Lo que hoy día se conoce como "Informes de Ingeominas" es la colección de los artículos sobre geología de Colombia que existía en la Biblioteca del Instituto Geológico Nacional en los años 50's y que Alicia Venegas Leiva (1960 y 1965) detalladamente ordenó y numeró, añadiéndole los nuevos informes que fueron produciéndose hasta 1964, cuando se abandonó la costumbre de numerarlos.

Venegas Leiva en su Bibliografía, con criterio práctico que se comparte en este listado, le añadió localizaciones geográficas (municipios y departamentos) a los títulos originales de los artículos. Si bien esta práctica no se ajusta a la rigurosidad con que en teoría debe tratarse una Bibliografía, sí facilita considerablemente su consulta.

ABREVIATURAS

Anal. Ing.	Anales de Ingeniería.
Bol. Min. Petr.	Boletín de Minas y Petróleos.
CEGOC	Compilación de Estudios Geológicos Oficiales en Colombia.
Bol. Geol.	Boletín Geológico.
La Rev. Pétrol.	La Revue Pétrolifère.
Mem. Minist. Cong.	Memoria del Ministro de Industrias al Congreso Nacional en sus Sesiones Ordinarias.
Publ. Geol. Esp.	Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas.
Rev. Org. Contr.	Revista Organo de la Contraloría General de la República.
(s.f.)	El manuscrito original no tiene fecha.

1925

(Con Eladio Gutiérrez) Apuntes sobre la Región de Urabá, Informe Geográfico-Geológico sobre Urabá Oriental, Departamento de Antioquia: Ingeominas, Inf. No. 145, 70 págs., 1 mapa, anexos; publicado en 1994 en CEGOC, Tomo XX, págs. 151-218, 2 croquis, Bogotá.

Informe sobre la Región Carbonífera de Zipacón en Relación con el Litigio del Ferrocarril Girardot-Leo Kopp: Ingeominas, Inf. No. 146, 11 págs.; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Reseña de la Región Platinífera de Colombia: Ingeominas, Inf. No. 147, 2 págs.

(s.f.) Informe de la Comisión Geológica de Urabá. Viaje Bogotá-Ibagué-Cali: Ingeominas, Inf. No. 148, 6 págs.

Reseña del Terreno Carbonífero del Departamento del Valle del Cauca en La Laguna, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 149, 5 págs.

(s.f.) Las Minas del Ferrocarril del Pacífico en Chipichape y Los Chorros, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 150, 10 págs.

Informe sobre las Investigaciones al NW y N de Buenaventura, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 152, 6 págs., 1 mapa.

Servicio Nacional de Geología de Petróleo: Ingeominas, Inf. No. 237, 7 págs.

1926

Informe sobre el Trayecto de Cali a Buenaventura, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 151, 5 págs.

(s.f.) Geología del Puerto de Buenaventura, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 153, 4 págs.

(s.f.) Apreciación Teórica de la Hoya del Cauca entre Popayán y la Región de Fredonia, Departamentos de Cauca y Antioquia: Ingeominas, Inf. No. 154, 7 págs.

(s.f.) Reconocimiento del Alto Magdalena entre Girardot y el Río Saldaña, Departamentos de Cundinamarca y Tolima: Ingeominas, Inf. No. 155, 9 págs.

1927

Estudio Verificado durante la Semana Santa de 1927 sobre la Ruta Bogotá-Girardot-Pandi, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 156, 22 págs.

Reconocimiento Geológico de la Carretera de Cambao, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 157, 5 págs., 1 croquis.

Reconocimiento del Area La Calera-Sopó-Guatavita-Guasca, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 158, 18 págs.; publicado en 1950, CEGOC, Tomo VIII, págs. 85-97, láms. IX-XI, Bogotá.

Indicaciones Geológicas para la Construcción del Ferrocarril de Bogotá al Bajo Magdalena: Ingeominas, Inf. No. 159, 4 págs., 1 croquis.

La Laguna de Tota, Departamento de Boyacá: Ingeominas, Inf. No. 160, 6 págs., 2 mapas.

El Area Petrolífera Cretácea de la Cordillera Oriental, en especial de Cundinamarca y Boyacá: Ingeominas, Inf. No. 161, 23 págs.; publicado en 1950, CEGOC, Tomo VIII, págs. 99-118, Bogotá.

Carretera al Mar y su Puerto. Apreciación del Trayecto entre Dabeiba y el Golfo de Urabá, Departamento de Antioquia: Ingeominas, Inf. No. 163, 27 págs.; publicado en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 167-195, Bogotá.

Provisión de Agua de Bogotá mediante un Socavón en el Barrio de Belén, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 170, 3 págs.

(s.f.) Apreciación Geológica en la Región de Guaduas, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 172, 13 págs.

Anotaciones sobre el Proyecto Canal Interoceánico en Napipí, Departamento del Chocó: Ingeominas, Inf. No. 227, 4 págs.; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Información Preliminar sobre el Yacimiento de Hierro de Guatavita, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 440, 3 págs., 1 plano.

Informe Geológico de Urabá: Anal. Ing., Vol. 35, No. 416, págs. 676-686, Bogotá.

1928

Importancia del Levantamiento Topográfico Aéreo para la Formación de la Carta Geológica de Colombia: Ingeominas, Inf. No. 165, 5 págs.

Advertencias sobre el Valor Petrolífero del Páramo de las "Ovejas", Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 166, 4 págs.

Anotaciones Relativas a Regiones sobre el Río Magdalena que constituyan Expectativas Petrolíferas y sean Aptas para la Colonización: Ingeominas, Inf. No. 167, 3 págs.

Influencias de la Estructura sobre la Magnitud y Consistencia de los Mantos de Carbón. Apreciación General y Derivaciones de las Carboneras del Carmen-Diamante al ENE de Guachetá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 168, 8 págs.

Determinación y Apreciación General de las Areas Petrolíferas de Colombia: Ingeominas, Inf. No. 171, 6 págs.; publicado en 1928, Bol. Min. Petr., Tomo I, No. 1 (Ene.), págs. 52-62, 1 mapa, Bogotá; reimpresso en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 245-257, Bogotá.

Comisión Geológica de Urabá. Informe Condensado sobre las Expectativas Petrolíferas en Urabá y en especial en la Serranía de Abibe, Departamentos de Antioquia y Chocó: Ingeominas, Inf. No. 228, 8 págs.; publicado en 1928, Oficina Nacional de Minas, Casa Editorial "Santa Fé", 17 págs., 1 mapa, Bogotá; actualmente en proceso de reimpresión en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Revisión de las Bases Técnicas relativas a las Propiedades sobre Explotación de Hidrocarburos: Ingeominas, Inf. No. 229, 26 págs.; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Anotaciones sobre los Trabajos en la Concesión de la Tropical Oil Company en Barrancabermeja, Departamento de Santander: Ingeominas, Inf. No. 230, 5 págs.

Informe de la Visita a las Refinerías del País: Ingeominas, Inf. No. 240, 16 págs.

1929

El Carbón y el Hierro de la Hacienda "El Carrizal", Municipio de Zipaquirá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 173, 9 págs.

Aspectos que ofrece el Problema de la Legislación Minera en Colombia: Bol. Min. Petr., Tomo II, No. 7 (Jul.), págs. 41-52, Bogotá.

Provisión de Agua para la Región de Cúcuta, Departamento de Norte de Santander: Ingeominas, Inf. No. 174, 19 págs.; publicado en 1929, Bol. Min. Petr., Tomo II, Nos. 11-12 (Nov.-Dic.), págs. 384-406, 1 lám., Bogotá; actualmente en proceso de reimpresión en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Informe relativo a la Cubicación del Banco de Cal de La Siberia, perteneciente a la Compañía de Cemento Samper, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 175, 7 págs.

Las Manifestaciones de Petróleo en la Región de Guachetá y su Influencia sobre las Posibilidades Petrolíferas en la Sabana, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 177, 30 págs.; publicado en 1946, CEGOC, Tomo VII, págs. 15-32, lám. IV, Bogotá.

Apreciación de los Llanos del Tolima y de sus Tierras Agrícolas según Puntos de Vista Geológicos, Departamento del Tolima: Ingeominas, Inf. No. 178, 51 págs.; publicado en 1930, Bol. Min. Petr., Tomo III, No. 15 (Mar.), págs. 209-234, 2 planos, Bogotá; reimpresso en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 197-225, 2 croquis, Bogotá.

Informe Geológico de Urabá: Ingeominas, Inf. No. 179, 66 págs., 2 mapas; publicado en una versión sustancialmente diferente del informe original, en 1930, Bol. Min. Petr., Tomo IV, Nos. 19-20 (Jul.-Ago.), págs. 26-136, 10 figs., Bogotá; ambas versiones fueron publicadas en 1994, CEGOC, Tomo XX, págs. 219-407, Bogotá.

Geología de la Hoya del Salto de Tequendama, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 180, 4 págs.

Abasto de Agua para la Hacienda de La Picota, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 181, 18 págs.; publicado en 1946, CEGOC, Tomo VII, págs. 1-13, láms. I-III, Bogotá.

La Penetración del Catatumbo, Departamento de Norte de Santander: Ingeominas, Inf. No. 183, 6 págs.

Apreciación de los Proyectos de Canal Interoceánico por el Napipí y por el Truandó, según Puntos de Vista Geológicos, Departamento del Chocó: Ingeominas, Inf. No. 184, 17 págs., 5 croquis; publicado en 1930, Bol. Min. Petr., Tomo III, No. 13, págs. 15-34, 2 croquis, Bogotá; actualmente en proceso de reimpresión en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Concepto acerca de la Influencia de la Extracción de Agua Subterránea sobre la Estabilidad de un Edificio, Bogotá: Ingeominas, Inf. No. 185, 1 pág..

Exploración Geológica del Terreno situado Abajo de la Confluencia de los Riachuelos Tunjuelo y Chisacá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 217, 5 págs.; publicado en 1929, Editorial Cromos, Bogotá; reimpreso en 1946, CEGOC, Tomo VII, págs. 33-38, láms. V-VI, Bogotá.

Probables Caracteres Geológicos de la Zona Petrolífera del Norte de Santander: Ingeominas, Inf. No. 275; publicado en 1929, Bol. Min. Petr., Tomo I, No. 2 (Feb.), págs. 144-152, 1 croquis, Bogotá; reimpreso en francés en La Rev. Pétrol., No. 385 (Ago.), pág. 1140-1143, fotos, cortes, Paris; reimpreso en 1994, CEGOC, Tomo XI, págs. 197-205, 1 croquis, Bogotá.

Geologie Pétrolifere de la Colombie: La Rev. Pétrol., No. 385 (Ago.), pág. 1129-1132, fotos, Paris

Exploración del Cerro de Petrólea, Departamento de Norte de Santander: Ingeominas, Inf. No. 365, 11 págs.

Gironschichten im Westen konglomeratisch im Osten sandig. Vermergelung der Kalkfazies der Villeta-Schichten von O. nach W.¹

1930

Apreciaciones sobre la Estructura Petrolífera de la Hacienda "La Arabia"•, Municipio de Zipacón (Anticlinal de Ciro) extraídas del Informe General sobre "Las Expectativas Petrolíferas de la Sabana de Bogotá", Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 186, 9 págs.

(Con Luis Vargas Vásquez) Informe sobre la visita a la "Scadta": Ingeominas, Inf. No.187, 12 págs.

(Con Luis Vargas Vásquez, Gabriel Cuervo Aráoz, y Benjamín Alvarado) Exploración para Petróleo en Tibaná (Boyacá), Pacho, Rionegro (Cundinamarca), Bogotá y Cambao: Ingeominas, Inf. No. 188, 10 págs., 16 fotos.

(Con Luis Vargas Vásquez) El Yacimiento de Carbón de "Doche" al SW de Alpujarra, Departamento del Huila²: Ingeominas, Inf. No. 190, 6 págs., 10 fotos; publicado en 1945, CEGOC, Tomo VI, págs. 5-10, láms. II-IV, Bogotá.

Manifestaciones Petrolíferas en el Chocó: Ingeominas, Inf. No. 281; publicado en 1930, Bol. Min. Petr. Tomo IV, Nos. 21-22 (Sep.-Oct.), págs. 336-337, Bogotá.

Anotaciones sobre la Estructura de la Cordillera Occidental y sobre el Estudio del Platino: Ingeominas, Inf. No. 826, 15 págs.; publicado en 1930, Bol. Min. Petr., Tomo IV, Nos. 21-22 (Sep.-Oct.), págs. 328-335, Bogotá; actualmente en proceso de reimpresión en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

1931

Geología Petrolífera del Departamento de Norte de Santander: Ingeominas, Inf. No. 176, 461 págs., mapas, croquis; publicado en 1993, CEGOC, Tomo XII, págs. 1-377, 26 planchas, Bogotá.

(Con Luis Vargas Vásquez). Estudio de la Región de Sáname, cercana al Municipio de Quetame, para determinar la Existencia de Potasa, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 189, 3 págs.; publicado en 1931, Bol. Min. Petr., Tomo IV, Nos. 25-27 (Ene.-Mar.), págs. 38-40, Bogotá; reimpreso en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 241-244, Bogotá.

¹ Citado sin más detalles en Royo y Gómez (1945), pág. 56.

² El artículo originalmente se titulaba: Información Complementaria sobre las Formaciones Carboníferas de "Doche" al SW de Alpujarra, Departamento del Huila.

Informe Geológico sobre la Región del Playón, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 191, 4 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Informe sobre los Resultados de la Exploración de Carbón en la Hoya del Cauca, referente a la Zona Quilichao-Caldono-Morales-El Playón-Suárez-Buenos Aires-Timba-Las Cañas-Jamundí, Departamentos de Cauca y Valle: Ingeominas, Inf. No. 192, 11 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Los Yacimientos Carboníferos del Departamento del Valle (Informe Parcial Condensado): Ingeominas, Inf. No. 193, 10 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Informe sobre las Minas de Carbón de Los Chorros de Propiedad del Ferrocarril del Pacífico, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 194, 5 págs.

Informe sobre las Aguas de la Quebrada Cabrera en el Terreno de El Retiro en la Parte Septentrional de Chapinero, Bogotá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 195, 3 págs.

Provisión de Aguas para la Población de Suba, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 196, 3 págs., 1 croquis.

Las Vertientes en las Cascadas del Río Bogotá, abajo del Salto del Tequendama, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 197, 8 págs., 1 perfil.

Exploración en la Región de Apulo-San Antonio-Viotá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 198, 14 págs., 1 mapa; publicado en 1931, Bol. Min. Petr., Tomo IV, Nos. 25-27 (Ene.-Mar.), págs. 41-59, 1 lám., Bogotá.

Indicación para Abonar las Tierras de la Sabana, basada en el Estudio de los Suelos Agrícolas de la Región de Apulo-Viotá: Bol. Min. Petr., Tomo IV, Nos. 25-27 (Ene.-Mar.), págs. 59-60, 1 plancha, Bogotá; actualmente en proceso de reimpresión en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

La Formación "Cáqueza", Región de Cáqueza, Oriente de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 199, 2 págs., 1 croquis; publicado en 1945, CEGOC, Tomo VI, págs. 23-26, lám. VI, Bogotá.

Indicaciones para facilitar la Exploración de Yacimientos de Carbón y de Cinabrio en el Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 200, 5 págs.

Observaciones en Relación con una Presa en Alicachín (Región del Charquito), Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 202, 4 págs.

Descripción del Viaje Chicoral-Roncesvalles-Tibí-Barragán-Sevilla, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 203, 6 págs.

(s.f.) Instalación de una Estación de Petróleo en Buenaventura, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 232, 2 págs.

(s.f.) Aluviones de Cucuana, El Valle, Departamento del Tolima: Ingeominas, Inf. No. 233, 5 págs.

(s.f.) Memoria sobre un Nuevo Método para Ensayar y Extraer el Oro de la Pirita Aurífera: Ingeominas, Inf. No. 234, 7 págs.

Descripción de los Terrenos Carboníferos situados entre Sevilla y Tulúa, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 239, 11 págs.

(s.f.) (Con Benjamín Alvarado) Estudios practicados en los Municipios de Rovira y El Valle, Departamento del Tolima: Ingeominas, Inf. No. 241, 8 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Tercer informe sobre el Valle, presentado por los Dres. Enrique Hubach y Benjamín Alvarado: Ingeominas, Inf. No. 242, 7 págs.

Apreciación de la Calidad de las Tierras Agrícolas: Boletín de Agricultura, Año 4, Nos. 5-6 (May.-Jun.), págs. 231-235, Bogotá.

1932

(Con Benjamín Alvarado) Informe sobre una Exploración en la Cordillera Occidental. Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 3, 5 págs.

Analogía de la Repartición de las Areas Petrolíferas en los Mesoidos (Ensayo): Ingeominas, Inf. No. 201, 8 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Informe sobre una Exploración Rápida de Cali a Yumbo, Vijes, Yotoco, Bolívar, Toro, Anserma Nuevo, Cartago, La Vieja, Tebaida, Zarzal, Sevilla, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 204, 5 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Estudios Geológicos alrededor de Popayán, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 205, 9 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Exploración de la Región del Río Cauca, comprendida entre Dinde y El Playón, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 206, 9 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Informe sobre la Hacienda "Chiliglo" en el Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 207, 17 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Exploración de la Región de Puracé, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 208, 18 págs.; publicado en 1935, Revista Pan, No. 2, págs. 56-62, 1 fig.; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Estudio Haciendas "Calaguala" y "Paletará" al Oeste-Suroeste del Volcán de Puracé, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 209, 46 págs.; publicado en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 259-306, Bogotá.

La Labor Geológica de don Tulio Ospina en el Occidente de Colombia (Apreciación basada en la Obra: Reseña sobre la Geología de Colombia especialmente del Antiguo Departamento de Antioquia): Ingeominas, Inf. No. 210, 23 págs.; publicado en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 227-239, Bogotá.

Apreciación Geológica de la Acequia Río Blanco de Gutiérrez, Bogotá, destinada al Abastecimiento de Agua para Bogotá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 211, 30 págs.; publicado en 1946, CEGOC, Tomo VII, págs. 39-61, láms. VII-XI, 2 figs., Bogotá.

(Con Benjamín Alvarado) Estudios Geológicos en la Ruta Popayán-Bogotá: Ingeominas, Inf. No. 213, 132 págs., croquis, 1 mapa.

Informe sobre los Alrededores del Puracé, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 225, 8 págs.

Catálogo y Clasificación de Rocas colectadas por Behr-Heider y por el Geólogo Enrique Hubach en Diferentes Regiones de Colombia: Ingeominas, Inf. No. 231, 126 págs.; publicado en 1994, CEGOC, Tomo XX, págs. 1-150, Bogotá.

(Con Jesús Jiménez Jaramillo) Yacimientos de Petróleo en el Caquetá y Putumayo: Ingeominas, Inf. No. 236, 8 págs.

Exploración del Trayecto Buga-Santander de Quilichao, Departamentos del Valle y Cauca: Ingeominas, Inf. No. 238, 9 págs., 1 croquis.

(Con Benjamín Alvarado) Exploración de la Región de Puracé, Departamento del Cauca. El Afloramiento de

Pizarras en el Ramal de Coconucos y sus Fósiles (Lado Occidental de la Cordillera Central en la Región del Volcán de Puracé): Ingeominas, Inf. No. 243, 44 págs.; publicado en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 307-325, Bogotá.

(Con Benjamín Alvarado) La Altiplanicie de Paletará, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 516, 36 págs., 1 mapa; publicado en 1945, CEGOC, Tomo VI, págs. 39-59, 1 cuadro, lám. X, Bogotá.

1933

Proyecto del Río Teusacá destinado al Abastecimiento de Agua para Bogotá³: Ingeominas, Inf. No. 214, 17 págs.; publicado en 1946, CEGOC, Tomo VII, págs. 63-75, láms. XII-XXI, Bogotá.

Fuentes Termales en el Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 215, 3 págs.

Anotaciones a las Deducciones Geológicas obtenidas por los Geólogos Hoeck y Stone con Respecto al Embalse de "La Regadera" (Proyecto de Tunjuelo), Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 216, 7 págs.

Los Deslizamientos de Nocaima y Datos Geológicos de la Región, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 218, 12 págs., 5 planos; publicado en 1945, CEGOC, Tomo VI, págs. 11-22, lám. V, 7 figs., Bogotá.

La Región de Panga Panga, al Noreste de Choachí, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 219, 14 págs., 3 croquis, 2 perfiles; publicado en 1945, CEGOC, Tomo VI, págs. 27-37, láms. VII-IX, 1 fig., Bogotá.

Las Condiciones Geológicas en el Faldeo situado entre Las Cruces y San Cristóbal, Bogotá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 220, 4 págs.

(Con Benjamín Alvarado) La Destrucción de la Población de Sativanorte, Departamento de Boyacá y el Sitio para su Reconstrucción: Ingeominas, Inf. No. 221, 10 págs., 10 fotos; publicado en 1934, Bol. Min. Petr., Tomo XI, Nos 61-62 (Ene.-Feb.), págs. 45-52, 1 croquis, Bo-

³ El informe inicialmente se llamaba "Apreciación Geológica del Proyecto Teusacá, presupuestado para el Abasto con Agua de Bogotá, Departamento de Cundinamarca".

gotá; actualmente en proceso de reimpresión en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

(Con Benjamín Alvarado) La Destrucción de la Población de La Paz, Departamento de Boyacá y su Futuro Emplazamiento: Ingeominas, Inf. No. 222, 14 págs., 1 croquis; publicado en 1945, CEGOC, Tomo VI, págs. 61-69, lám. XI, Bogotá.

(Con Benjamín Alvarado) Los Agrietamientos en Cáqueza, Departamento de Cundinamarca y el Peligro que ellos ofrecen para la Población: Ingeominas, Inf. No. 226, 13 págs.; publicado en 1934, Bol. Min. Petr., Nos. 61-62 (Ene.-Feb.), págs. 53-60, Bogotá; actualmente en proceso de reimpresión en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Columna Estratigráfica en la Cordillera Oriental: en Kehrler, Wilhelm, 1933, El Carboniano del Borde Llanero de la Cordillera Oriental, Bol. Min. Petr., Nos. 49-54 (Ene.-Jun.), págs. 105-121, Bogotá.

(Con Benjamín Alvarado) Trabajos efectuados por el Geólogo y el Ingeniero Geólogo del Departamento de Minas y Petróleos durante el Año Fiscal de 1931-1932 (Carbón del Valle y el Cauca): Memoria del Ministro de Industrias al Congreso Nacional en sus Sesiones Ordinarias, Imprenta Nacional, Tomo 1, págs. 146-156, Bogotá.

1934

(Con Hernando Lleras Franco) Informe sobre el Derumbe y los Deslizamientos de Tierra en el Municipio de San Antonio de Tena, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 223, 11 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Geología de los Departamentos del Valle y Cauca en Especial del Carbón: Ingeominas, Inf. No. 224, 467 págs. (en dos tomos), 87 gráficos; publicado en 1994, CEGOC, Tomo XVIII, págs. 1-320, 59 figs., Bogotá.

Informe sobre las Condiciones Mineras y Agrícolas de la Región de la Cordillera Occidental comprendidas entre las Cabeceras de los Ríos Atrato y San Juan, Departamento del Chocó: Ingeominas, Inf. No. 235, 5 págs.

Colombia, Tierra Firme de la Geología: 31 págs., 4 figs., Popayán.

1935

La Sierra Nevada de los Taironas: Revista Pan, No. 3 (Oct.), págs. 1-15, 14 fotos, 2 mapas, Bogotá.

1937

Deslizamientos en Terreno en la Región de "El Salto de Tequendama" y Medidas de Precaución, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 162, 5 págs.

(Con Vicente Suárez Hoyos) Provisión de Agua para la Capital (Bogotá), Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 164, 24 págs.; publicado en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 327-352, 2 perfiles, Bogotá.

1938

Apuntes sobre la Existencia de Carbón Explotable y sobre la Fuente Termal en la Punta Sureste del Cerro de Suba, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 169, 7 págs.

Uebersicht der Geologie von Kolumbien: Geologie & Mijnbouw, Jahrg. 17, No. 5 (Ago.), 40 págs., Den Haag.

1940

(Con José Royo y Gómez) El Abastecimiento de Agua de Cáqueza, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 339, 12 págs.

(Con José Royo y Gómez) Estudio para la Nueva Represa de Chisacá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 340, 3 págs.

(Con Lidio Zanella) Exploración Geológica del Yacimiento de Hierro de El Codito, Hacienda de "La Pradera", Municipio de Subachoque, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 439, 18 págs., 1 mapa, 1 croquis, 1 perfil.

1944

(Con Pablo Schaufelberger) Geología Agrícola del Valle del Cauca⁴: Colombia, Rev. Org. Contr., Año I (Oct.), págs. 33-42, Bogotá.

1946

Informe Geológico sobre Proyectos Hidroeléctricos en la Hoya del Río Bogotá, en la Región de San Antonio de Tena: Empresas Unidas de Energía Eléctrica de Bogotá, 36 págs., 14 figs.

⁴ Existe una publicación de este artículo, sin fecha, hecha en la Imprenta Departamental de Cali (17 págs.), muy posiblemente anterior a la aquí citada.

1947

(Con Roberto Sarmiento Soto) El Yacimiento de Hierro del Río Luisa, Departamento del Tolima: Ingeominas, Inf. No. 537, 14 págs.

(Con Benjamín Alvarado) Aspecto Geológico y Económico del Yacimiento de Carbón del Cerrejón, Departamento del Magdalena: Instituto de Fomento Industrial, 50 págs.

1949

(Con Luis J. Zorrilla) Carta Geográfica del Departamento del Tolima, elaborada Geológicamente para los Fines del Informe sobre los Llanos del Tolima, Escala 1:500.000.

1951

Deslizamientos en el Ferrocarril de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 723, 6 págs.

Deslizamientos y Derrumbes en el Ferrocarril de Cundinamarca entre Utica y Puerto Salgar, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 724, 8 págs.; actualmente en proceso de publicación en GEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

(Con José Sandoval) El Deslizamiento de Monserrate, Bogotá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 726, 3 págs.

El Mármol de la Hacienda "La Esmeralda", Municipio de Payandé, Departamento del Tolima: Ingeominas, Inf. No. 727, 7 págs.

Advertencias sobre la Conservación de la Fertilidad del Suelo en los Llanos del Tolima: Ingeominas, Inf. No. 729, 4 págs.

Extracto del Informe sobre las Explotaciones de Yeso en el Cerro de La Chapa, Municipio de Rovira, Departamento del Tolima: Ingeominas, Inf. No. 731, 7 págs.

(Con José Sandoval) Capacidad de Producción de las Minas de Yeso del Cerro "La Chapa", Municipio de Rovira, Departamento del Tolima: Ingeominas, Inf. No. 733, 6 págs.

Manifestaciones de Petróleo en La Chapa (Municipio de Rovira) y Quebrada Oscura (Municipio de Venadillo), Departamento del Tolima: Ingeominas, Inf. No. 734, 6 págs.

Inspección del Yacimiento de Carbón en El Cerrejón, Intendencia de la Guajira: Ingeominas, Inf. No. 743, 6 págs.

El Yacimiento de Cinabrio de "La Esperanza", Municipio de Salamina, Departamento de Caldas: Ingeominas, Inf. No. 747, 13 págs., 1 croquis.; publicado en 1953, Bol. Geol., Año I, No. 5 (May.), págs. 26-37, Bogotá.

Los Deslizamientos de Manizales en Marzo 25 de 1951, Departamento de Caldas: Ingeominas, Inf. No. 748, 7 págs.

Resumen sobre los Depósitos de Gases Naturales en Colombia: Ingeominas, Inf. No. 750, 4 págs., 1 mapa.

(Con José Sandoval) Informe sobre la Empresa "Siderúrgica Corradine" y sobre el Yacimiento de Hierro de Guayoque, Pacho, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 751, 14 págs.

Apreciación Geológica de las Variantes de la Carretera de Popayán a Pasto, Departamentos de Nariño y Cauca: Ingeominas, Inf. No. 752, 16 págs.

Informe sobre Deslizamientos en la Zona de Volcanes, Municipio de Cogua, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 753, 3 págs.

(Con Alberto Sarmiento Alarcón) Interpretación Geológica de las Variantes de Albán y del Nermal en la Carretera de Bogotá a Honda, Departamentos de Tolima y Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 755, 11 págs., 1 croquis.

Carbones del Bajo Cauca: Ingeominas, Inf. No. 767, 4 págs.

Yacimientos Importantes de Caliza para Cal Agrícola en Colombia: Ingeominas, Inf. No. 769, 23 págs., 2 mapas.; publicado en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 381-400, Bogotá.

Problemas del Abasto de Agua de Palmira, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 774, 5 págs., 1 croquis.

Anotaciones Geológicas sobre el Carbón de los Departamentos del Valle y Cauca: Ingeominas, Inf. No. 775, 13 págs., 8 croquis.

Aspectos Geológicos Petrolíferos de Colombia en 1951: Ingeominas, Inf. No. 777, 22 págs.; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y Alrededores: Ingeominas, Inf. No. 785, 31 págs., 1 mapa; publicado en 1957, Bol. Geol., Vol. V, No. 2, págs. 93-112, Bogotá.

Inspección a las Carboneras Calvo de la Cuenca del Tequendama, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 794, 6 págs.

Geología de las Variantes de Socorro y de Pajajoy, Municipio de Buesaco, Departamento de Nariño: Ingeominas, Inf. No. 797, 7 págs.

(Con Marino Arce Herrera) Variante de Carretera en el Sector "El Diamante-Chinácota-La Donjuana" entre Cúcuta y Pamplona, Departamento de Norte de Santander: Ingeominas, Inf. No. 801, 11 págs., 1 croquis.

(Con Vicente Suárez Hoyos) Informe de las Labores realizadas por el Servicio Geológico Nacional durante el Presente Año de 1951: Ingeominas, Inf. No. 807, 12 págs.

Anotaciones sobre los Deslizamientos entre Güepsa y el Puente sobre el Río Suárez, Departamento de Santander: Ingeominas, Inf. No. 808, 2 págs.

Mina de Carbón de "Chía", en el Páramo de Almorzadero, Departamento de Santander: Ingeominas, Inf. No. 809, 2 págs., 2 hojas (análisis).

1952

El Paso de la Carretera de Bogotá a Honda por la Quebrada del "Nemal", Departamentos de Tolima y Cundinamarca (Complemento al Informe No. 755): Ingeominas, Inf. No. 755A, 5 págs.

Condiciones Geológicas de las Canteras de Balasto entre Popayán y Santander de Quilichao, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 812, 8 págs.; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Informe sobre el Abasto de Mercaderes con Agua Potable, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 813, 4 págs.

Yacimiento de Carbón de Sachamate, Municipios de Mercaderes y San Joaquín, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 814, 5 págs.

Condiciones Geológicas de la Estación de "Pantanillo" del Oleoducto Salgar-Bogotá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 815, 4 págs.

Abasto con Agua del Colegio "Olaya" de Guateque, Departamento de Boyacá: Ingeominas, Inf. No. 819, 8 págs.

El Subsuelo Geológico del Hospital Militar de Bogotá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 820, 6 págs.

Programa de Colaboración del Servicio Geológico Nacional al Estudio de los Suelos de Colombia: Ingeominas, Inf. No. 825, 8 págs.

Proyecto de Organización de Labores y de Personal de la Planta Metalúrgica de Medellín, de los Laboratorios Nacionales de Fomento Minero de Pasto e Ibagué y del Laboratorio Nacional de Fundición y Ensayes de Quibdó: Ingeominas, Inf. No. 828, 16 págs.

Informe Preliminar sobre el Abasto con Agua de la Población de Suba, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 829, 5 págs.

Estudio Geológico del Proyecto de Fuerza Eléctrica y Regadío en Puerto Salgar-Colorados, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 830, 11 págs., 1 lámina; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Informe Geológico Preliminar sobre los Proyectos de Túneles de Felidia y Mares, F. C. Cali-Buenaventura, Departamento del Valle: Ingeominas, Inf. No. 842, 20 págs., 2 hojas (análisis), 1 gráfico, 1 anexo (Informe Petrográfico en Conexión con los Proyectos de Túnel al W de Cali, por Wolfgang Nelson); actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

(Con Jesús A. Bueno) Informe sobre las Minas de Vilachí y La Vetica, Santander de Quilichao, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 848, 8 págs., 6 hojas (análisis).

Adaptación de Métodos Oficiales al Progreso de Colombia. El Caso de la Geología Aérea. Fotogeología: Ingeominas, Inf. No. 851, 8 págs., 1 mapa.

El Plesiosaurio de Leiva, Departamento de Boyacá: Ingeominas, Inf. No. 852, 4 págs., 4 fotos.

Resumen de Labores del Servicio Geológico Nacional, Noviembre de 1951 a Junio de 1952: Ingeominas, Inf. No. 853, 12 págs.

Concepto sobre el Informe "Irrigación Ponedera-Candelaria" por Olarte, Ospina, Arias y Payán (OLAP), Departamento del Atlántico: Ingeominas, Inf. No. 857, 4 págs., 1 mapa.

Estado Actual de la Exploración de Fosfatos en Colombia: Ingeominas, Inf. No. 860, 5 págs., 1 mapa; pu-

blicado en 1953, Bol. Geol., Año I, No. 3 (Mar.), págs. 1-6, análisis, 1 mapa, Bogotá.

Condición Geológica de Resistencia del Edificio del Hospital de Anolaima, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 866, 6 págs.

Interpretación Geológica de la Erosión y de los Deslizamientos en Bucaramanga y Medidas de Defensa, Departamento de Santander: Ingeominas, Inf. No. 867, 7 págs., 3 croquis.

Yacimientos de Mineral de Hierro, Carbón y de Caliza en Colombia como Base de la Industria Siderúrgica: Ingeominas, Inf. No. 874, 21 págs., 9 hojas (análisis de laboratorio), 5 láminas; publicado en 1953, Bol. Geol., Año I, No. 1 (Ene.), págs. 1-30, 3 tablas, 5 figs., análisis, Bogotá.

1953

Labores del Servicio Geológico Nacional en Febrero de 1953: Ingeominas, Inf. No. 300, publicado en 1953, Bol. Geol., Año I, No. 3, págs. 67-76, Bogotá.

Labores del Servicio Geológico Nacional en Marzo de 1953: Ingeominas, Inf. No. 299; publicado en 1953, Bol. Geol. Año I, No. 4 (Abr.), págs. 66-74, Bogotá.

Anotaciones sobre Recursos y Vías para el Desarrollo del Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 699, 10 págs.

Labores realizadas por el Servicio Geológico Nacional del 30 de Junio de 1951 al 10 de Julio de 1952: Ingeominas, Inf. No. 858, 16 págs.

Condiciones Geológicas de Permeabilidad en la Presa de Río Bobo, Pasto, Departamento de Nariño y Aspectos Hidroeléctricos entre Pasto, Túquerres e Ipiales: Ingeominas, Inf. No. 897, 10 págs., 1 croquis.

Abasto con Agua de las Poblaciones de Piedra Sentada, El Bordo y Patía, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 898, 6 págs., 1 croquis.

Abasto con Agua Potable de Cajibío, Morales y Puerto Tejada, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 899, 5 págs., 1 croquis.

Hidrogeología del Hospital San Carlos, Sur de Bogotá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 900, 5 págs., 2 croquis.

Geología de la Isla del "Santuario", Laguna de Fúquene, Departamentos de Cundinamarca y Boyacá: Ingeominas, Inf. No. 901, 6 págs., 1 croquis.

El Yacimiento de Limonita de "Cueva de Chulos", Municipio de Guatavita, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 909, 5 págs., 1 croquis.

Materiales Útiles en la Finca de "Mariel o Punta de Suba" (Cerro de Suba, Sabana de Bogotá), Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 910, 7 págs., 1 croquis.

Carbón del Páramo del Almorzadero y Carbón y Fuentes de Aguasal de Molagavita en el Departamento de Santander: Ingeominas, Inf. No. 926, 11 págs., 1 croquis; publicado en 1953, Bol. Geol., Año I, No. 5 (May.), págs. 1-12, 4 figs., análisis, Bogotá.

(Con Comisión Atómica de Estados Unidos) Primera Etapa de la Investigación de Minerales Radioactivos prohijada por la Comisión Atómica de Estados Unidos en Combinación con el Instituto Geológico Nacional: Ingeominas, Inf. No. 931, 10 páginas.

Condiciones Geológicas de las Variantes de Carretera en la Región de Arcabuco-Barbosa-Oiba, Departamentos de Santander y Boyacá: Ingeominas, Inf. No. 952, 9 págs., 2 croquis; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Condiciones de los Deslizamientos en Jericó, Departamento de Antioquia y de las Obras de Defensa en Septiembre de 1953: Ingeominas, Inf. No. 955, 19 págs., 1 croquis; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Concepto Geológico sobre los Deslizamientos y Erosión Iniciales en Yarumal, Departamento de Antioquia: Ingeominas, Inf. No. 960, 8 págs., 1 croquis.

Agua Subterránea en La Ladera, Popayán, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 963, 5 págs., 1 lámina.

1954

Los Desmoronamientos en el Borde del Hospital de Girardot, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 990, 5 págs., 1 lámina.

Condiciones de Aumento de Agua Potable en Agua de Dios, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 991, 9 págs., 1 mapa, 1 plano, 2 croquis; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Significado Geológico de la Llanura Oriental de Colombia: Ingeominas, Inf. No. 1004, 19 págs., 2 mapas;

actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Los Yacimientos de Azufre de las Solfataras del Volcán de Cumbal, Departamento de Nariño: Ingeominas, Inf. No. 1008, 8 págs.

Anotaciones a la Geología entre Pasto y Ancuyá, Departamento de Nariño: Ingeominas, Inf. No. 1010, 5 págs.

Geología de los Suelos de Une, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 1012, 11 págs., 3 croquis; actualmente en proceso de publicación en CEGOC, Tomo XXIII, Bogotá.

Concepto sobre el Informe: Estudios hechos para investigar la Posibilidad de Desarrollar Agua Subterránea en la Alta Guajira, Región de la Península de la Guajira de Colombia por A. H. Bruhn Winston Incorporated: Ingeominas, Inf. No. 1013, 7 págs.

Informe Preliminar sobre Recursos del Páramo al Este de Bogotá, en especial Carbón de La Bolsa, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 1023, 14 págs.

Recursos del Subsuelo y Suelos del Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 1028, 16 págs.

Informe Geológico Preliminar sobre el Proyecto Embalse del Río "Luisa" entre Cerro Gordo y La Colorada, Departamento del Tolima: Ingeominas, Inf. No. 1033, 12 págs., 1 mapa.

Vías de Penetración y Zona de Colonización en el Departamento del Chocó: Ingeominas, Inf. No. 1057, 4 págs.

El Suelo y la Roca en Colombia: Ingeominas, Inf. No. 1070, 25 págs., 2 láms; publicado en 1982, Publ. Geol. Esp. No.3, págs. 5-22, 2 figs., Bogotá; reimpresso en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 353-380, Bogotá.

Influjo del Ambiente en Don Francisco José de Caldas y su Trascendencia (Homenaje a la Universidad del Cauca en Popayán): Boletín de Historia y Antigüedades, Academia Colombiana de Historia, Vol. XLI, Nos. 479-480 (Sep.-Oct.), págs. 530-547, mapas, Bogotá; reimpresso en Publ. Geol. Esp., No. 9, págs. 39-51, Bogotá.

Proyecto de Decreto sobre Declaración de Soberanía de Colombia en los Territorios y Aguas Submarinas en la Cuenca del Chocó (Océano Pacífico) y en la Cuenca de Colombia (Mar Caribe) y Explicación: Ingeominas, Inf. No. 1131, 5 págs., 2 mapas.

1955

Objetivos, Organización y Producción del Instituto Geológico Nacional: 1955, Revista del Petróleo No. 52, págs. 18-19, Bogotá.

El Deslizamiento en la Hoya del Río Seco, Corregimiento de Reventones, Municipio de Anolaima, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 1073, 9 págs., 1 croquis.

Prospecto del Area de San Juan de Arama, Intendencia del Meta: Ingeominas, Inf. No. 1076, 21 págs., 3 mapas.

Concepto sobre el Yacimiento de Carbón del Páramo de La Bolsa al Este de Bogotá, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 1078, 7 págs., 1 mapa.

Defensa de San Antonio de Aguilera, Departamento de Cundinamarca, contra Deslizamientos: Ingeominas, Inf. No. 1081, 11 págs., 1 lámina.

Los Deslizamientos en Quipile (Cundinamarca Occidental): Ingeominas, Inf. No. 1089, 8 págs., 1 croquis.

El Deslizamiento de Guayabal de Síquima (Cundinamarca Occidental): Ingeominas, Inf. No. 1090, 7 págs., 1 lámina.

Los Daños por Deslizamiento en el Estribo Izquierdo del Puente Viejo de San Gil, Departamento de Santander: Ingeominas, Inf. No. 1097, 5 págs., 1 plancha.

Geología de la Hacienda de Patasía al Norte de Pacho, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 1101, 8 págs.

El Deslizamiento de Los Alpes del Ferrocarril Central de Cundinamarca, al Sur de Albán: Ingeominas, Inf. No. 1102, 8 págs., 1 lámina.

Medidas de Contención en el Deslizamiento de Los Alpes (Complemento al Informe No. 1102): Ingeominas, Inf. No. 1102A, 4 págs.

Las Manifestaciones de Petróleo en el Domo de Oiba, Departamento de Santander: Ingeominas, Inf. No. 1103, 4 págs., 1 croquis.

Efectos de Deslizamientos en Socorro, Departamento de Santander: Ingeominas, Inf. No. 1104, 4 págs., 1 lámina.

Interpretación Geológica de los Suelos de la Región de Chingaza-Farallones-Medina, Departamento de

Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 1105, 9 págs., 2 mapas; publicado en 1956, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Suelos Ecuatoriales, Vol. I, No. 1, págs. 31-38, 1 mapa, Medellín.

Las Unidades Geográficas y Geológicas del Departamento del Cauca y los Recursos del Suelo y del Subsuelo: Ingeominas, Inf. No. 1107, 19 págs., 1 mapa; publicado en 1982, Publ. Geol. Esp., No. 9, págs. 23-37, 1 mapa, Bogotá.

Variantes en la Carretera Bogotá-Villavicencio, entre Chipaque y la Confluencia de los Ríos Negro y Cáqueza: Ingeominas, Inf. No. 1113, 5 págs.

Aspectos Geográficos y Geológicos y Recursos de las Islas de San Andrés y Providencia, Intendencia de San Andrés y Providencia: Ingeominas, Inf. No. 1121, 31 págs., 1 mapa; publicado en 1956, Cuadernos de Geografía de Colombia (Suplemento del Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia), No. 12, págs. 1-29, mapas, Bogotá; resumen en 1959, Second Caribbean Geological Conference, págs. 44-45, Mayagüez, Puerto Rico.

Resumen de la Geología de la Hoya del Alto Cauca, Departamentos del Cauca, Caldas y Valle: Ingeominas, Inf. No. 1122, 10 págs.

1956

(Con Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos) Geología de las Exploraciones Uraníferas en Colombia, en Combinación con la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos (Diciembre 1955-Enero de 1956): Ingeominas, Inf. No. 1147, 13 págs.

Rutas de Carreteras entre Popayán y la Planicie Costera del Pacífico, Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 1156, 6 págs., 1 croquis.

El Camino Viejo de Micay, Departamento del Cauca, su Rehabilitación, Geografía, Geología y Economía: Ingeominas, Inf. No. 1164, 49 págs., 2 mapas.

Condiciones Geológicas del Proyecto Hidroeléctrico de "La Cabrera" (al Este de Popayán), Departamento del Cauca: Ingeominas, Inf. No. 1168, 13 págs., 1 plano.

Estudio de los Cateos de Rocas y Sedimentos en el Proyecto Hidroeléctrico de La Cabrera (Popayán), Departamento del Cauca (Complemento al Informe No. 1168): Ingeominas, Inf. No. 1173, 7 págs.

La Zona Carbonífera de El Bosque, Municipio de Pacho, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 1175, 10 págs., 1 croquis.

Exploración de Nuevos Yacimientos Esmeraldíferos en Muzo, Departamento de Boyacá: Ingeominas, Inf. No. 1188, 4 págs., 1 croquis.

Materias Primas Básicas de Industria en Colombia: Ingeominas, Inf. No. 1202, 8 págs.

(Con Roberto Wokittel) La Situación de Algunos Minerales Industriales en Colombia: Ingeominas, Inf. No. 1206, 18 págs.; publicado en 1956, Boletín de Minas, Año III, No. 33, págs. 26-36, Bogotá.

1957

Contribución a las Unidades Estratigráficas de Colombia (Enumeración Regional, de más Reciente a más Antiguo): Ingeominas, Inf. No. 1212, 166 págs.; publicado en 1994, CEGOC, Tomo XVII, págs. 1-166, Bogotá

Recursos de la Hacienda de Andorra, Municipio de Jerusalén, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 1213, 9 págs.

Estratigrafía de la Cuenca de Fusagasugá entre Aguadita, Fusagasugá y Tibacuy, Departamento de Cundinamarca: Ingeominas, Inf. No. 1214, 9 págs., 2 hojas (columna estratigráfica).

La Propiedad Carbonífera de Aguas Blancas abajo de Landázuri, Departamento de Santander: Ingeominas, Inf. No. 1228, 6 págs.

Apuntes sobre la Geología de la Provincia de García Rovira, Departamento de Santander: Ingeominas, Inf. No. 1229, 17 págs., 1 hoja (columna estratigráfica).

La Obra Geológica de Don Tulio Ospina: Ingeominas, Inf. No. 1230, 7 págs.; publicado en 1957, Academia Colombiana de Historia, Boletín de Historia y Antigüedades, Vol. XLIV, Nos. 507-509 (Ene.-Mar.), págs. 101-106, Bogotá.

Un Deslizamiento en la Urbanización Cataluña (Bogotá), Departamento de Cundinamarca: Serv. Geol. Nal., Inf. No. 1232, 3 págs.

Actividades del Instituto Geológico Nacional desde el 13 de Junio de 1953 hasta Abril de 1957: Ingeominas, 7 hojas.

TRADUCCIONES⁵

Acerca de Algunos Rastros de Glaciación Diluvial en la Cordillera Próxima a Bogotá, por Otto Stutzer, Agosto 20 de 1925: traducción publicada en 1934, CEGOC, Tomo II, págs. 7-15, figs. 1-5, Bogotá.

Observaciones Geológicas durante una Doble Travesía por la Cordillera Central de Colombia, por Otto Stutzer, Enero de 1926: Ingeominas, Inf. No. 388, 19 págs.; traducción publicada en 1934, CEGOC, Tomo II, págs. 17-38, figs. 6-11, Bogotá.

Acerca de la Geología de la Cordillera Occidental entre Cali y Buenaventura, por Otto Stutzer: Ingeominas, Inf. No. 389; traducción publicada en 1934, CEGOC, Tomo II, págs. 39-52, figs. 12-20, Bogotá.

Anotaciones sobre la Geología, el Petróleo y el Agua en el Departamento del Atlántico, en Colombia, por Otto Stutzer, Octubre de 1926: traducción publicada en 1934, CEGOC, Tomo II, págs. 53-67, figs. 21-22, Bogotá.

Contribución a la Geología del Foso del Cauca-Patía, por Otto Stutzer, Febrero de 1926: traducción publicada en 1932, Bol. Min. Petr., Tomo VII, Nos. 37-42, págs. 244-289, Bogotá; reimpresso en 1934, CEGOC, Tomo II, págs. 69-140, figs. 23-37, Bogotá.

Contribución a la Geología de la Cordillera Oriental. Regiones cerca a Bogotá, por Otto Stutzer, Junio de 1926: traducción publicada en 1934, CEGOC, Tomo II, págs. 141-182, figs. 38-44, Bogotá.

Sobre la Geología de la Parte Media del Valle del Magdalena, por Otto Stutzer: traducción publicada en 1932, Bol. Min. Petr., Tomo VII, Nos. 37-42, págs. 217-236; reimpresa en 1934, CEGOC, Tomo II, págs. 183-209, fig. 45, 1 cuadro, Bogotá.

Contribución a la Geología de la Península de la Goajira, por Otto Stutzer, Julio de 1927: traducción publicada en 1934, CEGOC, Tomo II, págs. 211-243, figs. 46-58, Bogotá.

Meteoritas Vidriosas de Colombia (Tectitas), por Otto Stutzer, Diciembre de 1925⁶: traducción publicada en 1934, CEGOC, Tomo II, págs. 245-255, figs. 59-60, Bogotá.

Catálogo del Museo Petrográfico del Ministerio de Industrias, por las Comisiones Científica Nacional y Geológica General: traducción publicada en 1935, CEGOC, Tomo III, págs. 268-448, tabs, Bogotá.

Fuentes de Fertilizantes Minerales en Colombia, por Joseph Harrington: Ingeominas, Inf. No. 977, 10 págs.

Estratigrafía de la Formación de Girón en Santander y Boyacá, Informe preliminar, por R. L. Langenheim Jr.: Ingeominas, Inf. No. 1011, 26 págs., 4 croquis.

Gerth, Heinrich, 1955, La Constitución Geológica de los Andes Suramericanos: traducción inédita, 455 págs., 6 tablas, 20 diagrs., 62 figs.

⁵ El Ingeniero Jorge A. Perry en su Introducción al Tomo II de la Compilación de Estudios Geológicos Oficiales en Colombia indica a Enrique Hubach como traductor de los artículos de Otto Stutzer allí incluidos. Sin embargo, no precisa quién tradujo los artículos de R. Schreiter, E. A. Scheibe y R. Reichenbach, también publicados en ese Tomo. Royo y Gómez (1945) atribuye la traducción del artículo de Reichenbach a Hubach, pero no indica quién tradujo los de Schreiter y Scheibe.

⁶ Este artículo no debe confundirse con un segundo artículo sobre el mismo tema que Stutzer escribió con Th. Doring ("Kolumbianische Glasmeteorite") y publicó en Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Abt. A, No. 1, págs. 35-41, 1928. Una traducción (por Gilberto Botero) de este segundo artículo, con el título "Tectitas de Colombia. Segundo Informe", se publicó en 1950 en la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Vol. VII, No. 28, págs. 511-514, Bogotá.

CONECTIVOS INTUICIONISTAS SOBRE ESPACIOS TOPOLOGICOS*

por

Xavier Caicedo**

Resumen

Caicedo, X.: Conectivos intuicionistas sobre espacios topológicos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 21(81): 521-534, 1997. ISSN: 0370-3908.

El clasificador de subobjetos de un topos constituye su "objeto de valores de verdad" y sus morfismos determinan los conectivos proposicionales de su lógica interna. Continuando trabajo anterior para modelos de Kripke, estudiamos dichos conectivos para la lógica de los haces sobre espacios topológicos, caso en el cual están totalmente determinados por ciertas operaciones en conjuntos abiertos. Los conectivos monádicos junto con los de Heyting forman una familia "funcionalmente" completa en cualquier topos espacial; en particular, un solo conectivo adicional genera los implícitos en la lógica trivalente de Heyting. Damos una axiomatización completa para la lógica intermedia modal que resulta en este último caso. Analizamos también los conectivos invariantes bajo homeomorfismos locales, y la escogencia global y uniforme de conectivos en distintos espacios. Los resultados principales se pueden generalizar inmediatamente a los topos de haces sobre álgebras de Heyting completas.

Palabras clave: Conectivo proposicional, espacio topológico, haz, topos, lógica intuicionista

Abstract

The subobject classifier of a topos is its "object of truth values" and its morphisms yield the propositional connectives of its inner logic. Continuing previous work for Kripke models, we study connectives on sheaves over topological spaces. These are determined by certain operations in open sets. Monadic and Heyting connectives form a functionally complete basis in any espacial topos. In particular, a single new connective generates all connectives implicit in Heyting's intuitionistic trivalent logic. We provide a complete axiomatization for the corresponding intermediate modal logic. We consider also connectives invariant under local homeomorphisms, and the global uniform choosings of connectives on distinct topological spaces. The main results generalize readily to sheaves over complete Heyting algebras.

Key words: Propositional connective, sheaf, topological space, topos, intuitionistic logic.

** Dept. de Matemáticas y Estadística, Universidad Nacional de Colombia
Dept. de Matemáticas, Universidad de los Andes, Bogotá

* Con el apoyo de COLCIENCIAS, programa Estímulos a Investigadores.

Introducción

Inspirados en las ideas of Lawvere and Tierney sobre la lógica interna de las categorías, Freyd (1972) y Reyes (1974) mostraron cómo definir en cualquier topos \mathbb{T} análogos de los conectivos proposicionales y los cuantificadores, e interpretar los lenguajes lógicos de primer orden, de manera que a cada fórmula $\varphi(\mathbf{x})$ y "estructura" \mathfrak{A} en \mathbb{T} con universo $A \in \text{Obj}(\mathbb{T})$ corresponde un subobjeto de "verdad o "extensión":

$$\varphi(\mathbf{x})^{\mathfrak{A}} \rightarrow A^n;$$

extensiones sobre las cuales actúan naturalmente los conectivos y cuantificadores. Dependiendo del topos, la lógica resultante es intermedia entre la intuicionista y la clásica. En los topos de Grothendieck esta puede expresarse en términos de la llamada *semántica de Kripke-Joyal*, una noción de *forzamiento* en haces de estructuras que generaliza el forzamiento intuicionista en modelos de Kripke. Esta lógica categórica ha sido estudiada intensamente, véase Maklai-Reyes (1977), Goldblatt (1984), MacLane-Moerdijk (1992), Caicedo (1995a). Menos estudiado ha sido el hecho de que la lógica de un topos, a diferencia de la lógica clásica, puede admitir conectivos proposicionales (es decir, morfismos del clasificador de subobjetos) no reducibles a combinaciones de los de Heyting: \neg , \wedge , \vee , \rightarrow . Aparte de algunas observaciones sobre las leyes generales de los *conectivos geométricos* de Lawvere asociados a topologías de Grothendieck (por ejemplo, Goldblatt 1987), los cuales no agotan todas las posibilidades, está por hacerse el estudio general de los conectivos de un topos y las correspondientes extensiones modales de las lógicas intuicionistas intermedias.

En Sette-Caicedo (1993) nos adentramos en dicho estudio y observamos que las propiedades expresables en la lógica de primer orden del topos $\text{Sh}(X)$ de haces sobre un espacio topológico X , enriquecida con todos los conectivos del topos, son exactamente las preservadas por sistemas de homeomorfismos parciales entre haces de estructuras, generalizando así el teorema de Fraïssé (1954) para lógica clásica. Además mostramos que en estos topos los conectivos monádicos, junto con \wedge, \vee e \rightarrow (\vee posiblemente infinitario), forman un conjunto "funcionalmente completo". En Caicedo (1995b) introducimos una noción natural de conectivo intuicionista en modelos de Kripke que resulta ser, cuando se consideran estos últimos como haces, la escogencia uniforme de un conectivo en cada topos de haces sobre un orden parcial.

En estas notas continuamos el estudio de los conectivos intuicionistas en los topos espaciales. Los resultados principales se generalizan inmediatamente a topos sobre álgebras de Heyting completas (*locales en Johnstone* 1982). No sabemos si se generalizan a los topos de Grothendieck y, menos aún, a los topos elementales.

Los conectivos de $\text{Sh}(X)$ están determinados por las operaciones en abiertos de X que satisfacen cierta sencilla ecuación funcional, lo que permite interpretar la lógica interna del topos enriquecida con los nuevos conectivos como una genuina lógica multivaluada. Damos una nueva demostración de la mencionada completitud funcional en $\text{Sh}(X)$ de los conectivos monádicos junto con los de Heyting, y examinamos en detalle los conectivos de los espacios lineales. En particular, los conectivos del topos de haces sobre el espacio de Sierpinski, es decir, los implícitos en la lógica intuicionista trivalente de Heyting (1930), se generan añadiendo un solo conectivo monádico. Presentamos una axiomatización completa de la lógica modal intuicionista trivalente que resulta. Examinamos, finalmente, los conectivos preservados por homeomorfismos locales y la escogencia uniforme de conectivos en cada espacio de una categoría dada de espacios topológicos (conectivos globales). Los conectivos en modelos de Kripke son, por ejemplo, los globales de la categoría de órdenes parciales, *qua* espacios topológicos, con inclusiones continuas abiertas.

1. Conectivos clásicos y conectivos en topos

Los conectivos proposicionales (n -arios) de la lógica clásica suelen identificarse con las funciones de $\{0,1\}^n$ en $\{0,1\}$, llamadas corrientemente *tablas de verdad*, donde se identifica a 1 con el valor "verdadero" y a 0 con "falso". Es bien sabido que todos los conectivos pueden obtenerse por combinación de \neg y cualquiera de los conectivos binarios $\wedge, \vee, \rightarrow$:

x	$\neg x$	x	y	$x \wedge y$	$x \vee y$	$x \rightarrow y$
0	1	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	1	1
		1	0	0	1	0
		1	1	1	1	1

Podríamos llamar a ésta la concepción Fregeana o "funcional" de conectivo. Por otra parte, las tablas de verdad inducen las llamadas *operaciones booleanas* entre subconjuntos de un conjunto, las cuales permiten

interpretar los conectivos como transformaciones de propiedades en propiedades, tomadas extensionalmente, concepción explícita en los lógicos ingleses del siglo pasado (De Morgan, Venn, Boole). Así, la tabla $c: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}$ induce la familia de operaciones

$$\{c^A: P(A)^n \rightarrow P(A)\}_{A \in \text{Conj}}$$

$$c^A(S_1, \dots, S_n) = \{a \in A : c(\chi_{S_1}(a), \dots, \chi_{S_n}(a)) = 1\},$$

donde χ_S denota la función característica de S en A . En particular, \neg , \wedge y \vee inducen el *complemento*, la *intersección* y la *unión*, respectivamente:

$$\neg_A(S) = A - S, \quad \wedge_A(S, T) = S \cap T, \quad \vee_A(S, T) = S \cup T,$$

operaciones que hacen de $P(A)$ una álgebra booleana.

Para toda función $f: A \rightarrow B$, la función *imagen recíproca* $f^1: P(B) \rightarrow P(A)$, donde $f^1(S) = \{x \in A : f(x) \in S\}$, preserva complementos e intersecciones y por tanto toda operación booleana $\{c^A\}_{A \in \text{Conj}}$. Es decir, el diagrama:

$$\begin{array}{ccccc} A & P(A) \times \dots \times P(A) & \xrightarrow{c^A} & P(A) & \\ f \downarrow & \uparrow f^1 \times \dots \times f^1 & & \uparrow f^1 & \\ B & P(B) \times \dots \times P(B) & \xrightarrow{c^A} & P(B) & \end{array}$$

siempre conmuta. En el lenguaje de las categorías esto significa que las operaciones booleanas son *transformaciones naturales* de P^n en P , donde $P: \text{Conj} \rightarrow \text{Conj}$ es el funtor contravariante *Partes*, y $P^n = P \times \dots \times P$. De hecho, esta propiedad distingue a las operaciones booleanas. Es decir, las tablas de verdad clasifican exactamente las operaciones naturales entre subconjuntos. Esta dualidad entre tablas de verdad y transformaciones naturales de subobjetos es un fenómeno válido en todos los topos.

Para cualquier topos (bien potenciado) \mathbb{T} hay un funtor contravariante $\text{Sub}: \mathbb{T} \rightarrow \text{Conj}$, análogo a P , que asigna a cada objeto A de \mathbb{T} su conjunto $\text{Sub}(A)$ de *subobjetos* (clases de equivalencia de monomorfismos que llegan a A), y a cada morfismo $f: A \rightarrow B$ una función "imagen recíproca" $f^1: \text{Sub}(B) \rightarrow \text{Sub}(A)$ obtenida por "pullback" a lo largo de f .

$$\begin{array}{ccc} A & & \text{Sub}(A) \\ f \downarrow & \mapsto & f^1 \uparrow \\ B & & \text{Sub}(B). \end{array}$$

Existe además un objeto *clasificador de subobjetos* Ω , con un "elemento" t , que juega en \mathbb{T} el mismo papel que $\{0,1\}$ y 1 juegan en Conj ; es decir, para cada objeto A hay una biyección, natural en A ,

$$\chi^A: \text{Sub}(A) \approx \text{Morf}(A, \Omega)$$

tal que $\chi^A(s): A \rightarrow \Omega$ es el único morfismo $f: A \rightarrow \Omega$ para el cual $f^1(t) = s$. En Conj , χ^A envía $S \subseteq A$ a su *función característica* $\chi_S: A \rightarrow \{0, 1\}$ (cf. **Johnstone** 1977). La anterior biyección induce inmediatamente

$$\text{Sub}^n(A) = [\text{Sub}(A)]^n \approx \text{Morf}(A, \Omega^n),$$

y por el *Lema de Yoneda* (**MacLane** 1971, III, 2) permite calcular las transformaciones naturales de Sub :

$$\begin{aligned} \text{Nat}(\text{Sub}^n, \text{Sub}) &\approx \text{Nat}(\text{Morf}(-, \Omega^n), \text{Morf}(-, \Omega^n)) \\ &\approx \text{Morf}(\Omega^n, \Omega). \end{aligned}$$

Es decir los morfismos de Ω clasifican las transformaciones naturales del funtor Sub . En el caso de la categoría de conjuntos esto nos da:

$$\text{Nat}(P^n, P) \approx \{0, 1\}^{\{0,1\}^n},$$

y por tanto la mencionada identidad: *operaciones booleanas n-arias en subconjuntos* = $\text{Nat}(P^n, P)$.

Resulta de la anterior discusión que en un topos arbitrario \mathbb{T} , el clasificador Ω puede verse como el objeto de "valores de verdad" de \mathbb{T} , y los morfismos $c: \Omega^n \rightarrow \Omega$ como (las tablas de) los *conectivos n-arios* de \mathbb{T} , que clasifican las operaciones naturales entre subobjetos. En particular, los conectivos de **Freyd** (1972),

$$\neg: \Omega \rightarrow \Omega \quad \text{y} \quad \wedge, \vee, \rightarrow: \Omega^2 \rightarrow \Omega$$

inducen las operaciones $\neg_A, \wedge_A, \vee_A, \rightarrow_A$, que hacen de $\text{Sub}(A)$ una *álgebra de Heyting* para cada objeto A de \mathbb{T} (cf. **Goldblatt** 1984). En general, si c induce las operaciones c^A en $\text{Sub}(A)$, entonces la extensión de cualquier fórmula del lenguaje lógico enriquecido con un símbolo C para denotar el conectivo puede interpretarse en cada estructura \mathfrak{A} del topos con dominio A por la regla inductiva:

$$[C(\varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x))]^{\mathfrak{A}} = c^A(\varphi_1(x)^{\mathfrak{A}}, \dots, \varphi_n(x)^{\mathfrak{A}}),$$

interpretación que extiende la de Freyd para los conectivos de Heyting. En el caso de topos de haces, la semántica puede expresarse también como una extensión de la de Kripke-Joyal (ver Sección 4).

2. Conectivos sobre espacios topológicos

Dado un espacio topológico X , $\Omega(X)$ denotará su familia de abiertos; S, U, V, W denotarán elementos de $\Omega(X)$ y \mathbf{S} negrita denotará n -uplas (S_1, \dots, S_n) de abiertos. En este contexto, $(S_1 \cap V, \dots, S_n \cap V)$ se escribirá $\mathbf{S} \cap V$.

Es bien sabido que la categoría $\mathbf{Sh}(X)$ de *haces sobre un espacio X* , es decir, los funtores contravariantes de $(\Omega(X), \subseteq)$ en \mathbf{Conj} que satisfacen la condición de coherencia de Grothendieck (cf. **Tennison 1975, Sette-Caicedo 1993**) con las transformaciones naturales por morfismos, constituye un topos. Su clasificador de subobjetos es el haz

$$\begin{aligned} \Omega(U) &= \{S \subseteq U : S \text{ abierto en } X\} \\ \Omega_{UV}: \Omega(U) &\rightarrow \Omega(V) \text{ la restricción:} \\ \Omega_{UV}(S) &= S \cap V, \text{ para } U \supseteq V, \end{aligned}$$

y por lo tanto sus conectivos, que llamaremos en adelante *conectivos sobre X* , son las transformaciones naturales de Ω^n en Ω ; es decir, las familias de funciones $c_U: \Omega(U)^n \rightarrow \Omega(U)$, $U \in \Omega(X)$, para las cuales el diagrama

$$\begin{array}{ccc} \Omega(U)^n & \xrightarrow{c_U} & \Omega(U) \\ \downarrow (\cdot) \cap V & & \downarrow (\cdot) \cap V \\ \Omega(V)^n & \xrightarrow{c_V} & \Omega(V) \end{array} \quad (1)$$

conmuta para todo U y $V \subseteq U$.

Un tal conectivo $(c_U)_U$ está totalmente determinado por su acción en secciones globales, es decir, por la función $c_X: \Omega(X)^n \rightarrow \Omega(X)$.

LEMA 1. *Los conectivos n -arios de $\mathbf{Sh}(X)$ están en correspondencia biunívoca con las funciones $c: \Omega(X)^n \rightarrow \Omega(X)$ que satisfacen para todo $V \in \Omega(X)$ y $\mathbf{S} \in \Omega(X)^n$:*

$$c(\mathbf{S} \cap V) \cap V = c(\mathbf{S}) \cap V. \quad (2)$$

Al conectivo $(c_U)_U$ corresponde la función $c = c_X$, y recíprocamente a c que satisface (2) corresponde el conectivo $(c_U)_U$ donde $c_U(\mathbf{S}) = c(\mathbf{S}) \cap U$.

Demostración. Si $c = c_X$ entonces debe cumplirse para todo $\mathbf{S} \in \Omega(U)^n$ y $V \subseteq U$, por (1) aplicado consecutivamente a las inclusiones $V \subseteq X$, $V \subseteq U$ y $U \subseteq X$:

$$\begin{aligned} c(\mathbf{S} \cap V) \cap V &= c_V(\mathbf{S} \cap V) = c_U(\mathbf{S}) \cap V = \\ &= c(\mathbf{S}) \cap V \cap U = c(\mathbf{S}) \cap V. \end{aligned}$$

Recíprocamente, si c satisface (2) y definimos $c_U(\mathbf{S}) = c(\mathbf{S}) \cap U$, se tiene $c_V(\mathbf{S} \cap V) = c(\mathbf{S} \cap V) \cap V = c(\mathbf{S}) \cap V \cap V = c(\mathbf{S}) \cap U \cap V = c_U(\mathbf{S}) \cap V$, cuando $V \subseteq U$ y $\mathbf{S} \in \Omega(U)^n$. Es decir, $(c_U)_U$ es un conectivo con $c_X = c$. \square

En adelante identificaremos los conectivos de $\mathbf{Sh}(X)$ con las operaciones en $\Omega(X)$ que satisfacen (2). Obsérvese que esta correspondencia preserva composición.

EJEMPLO 1. Conectivos heyтинianos. $\Omega(X)$ es una álgebra de Heyting con las operaciones:

$$\begin{aligned} S \wedge T &= S \cap T \\ S \vee T &= S \cup T \\ S \rightarrow T &= \text{Int}[(X - S) \cup T] \\ -S &= S \rightarrow \emptyset = \text{Int}(X - S), \end{aligned}$$

las cuales se verifica fácilmente que satisfacen (2). Las llamaremos *conectivos de Heyting*, y llamaremos *heyтинianos* a sus combinaciones por composición, con la ayuda de las proyecciones $\pi^1: \Omega(X)^n \rightarrow \Omega(X)$, $\pi^1(S_1, \dots, S_n) = S_1$, que también son conectivos.

EJEMPLO 2. Conectivos booleanos. Si $\Omega(X) = \{X, \emptyset\}$, por ejemplo cuando $X = \{1\}$, cualquier función $f: \{X, \emptyset\}^n \rightarrow \{X, \emptyset\}$ cumple (2) y por lo tanto los conectivos de X coinciden con los clásicos. Evidentemente son todos heyтинianos.

EJEMPLO 3. Conectivos no heyтинianos. Si $\Omega(X) \neq \{X, \emptyset\}$ necesariamente existen conectivos no heyтинianos sobre X . Para cada $W \in \Omega(X)$, la función constante $\square^W: \Omega(X) \rightarrow \Omega(X)$ de valor W determina un conectivo sobre X , pues la condición (2) vale trivialmente. Podemos asociar también a cada $W \in \Omega(X)$ el conectivo monádico no constante d^W definido por

$$d^W(S) = (S \leftrightarrow W).$$

Si $W \neq \emptyset, X$, los conectivos \square^W y d^W no son heyтинianos, pues un conectivo heyтинiano debe enviar $\{\emptyset, X\}$ a $\{\emptyset, X\}$, mientras que $\square^W(X) = d^W(X) = W$.

3. Conectivos como propiedades locales de abiertos

Por la propiedad característica del clasificador Ω , en cualquier topos los conectivos $c: \Omega^n \rightarrow \Omega$ están en correspondencia biyectiva con los subobjetos de Ω^n :

$$\text{Mor}_T(\Omega^n, \Omega) \approx \text{Sub}(\Omega^n).$$

En el caso topológico esto significa que los conectivos n-arios sobre X están en correspondencia biunívoca con los subhaces de Ω , o sea con las familias $\mathcal{C} = \{\mathcal{C}(U)\}_{U \in \Omega(X)}$ que cumplen:

- i. $\mathcal{C}(U) \subseteq \Omega(U)^n$.
- ii. Si $S \in \mathcal{C}(U)^n$ y $V \subseteq U$ entonces $S \cap V \in \mathcal{C}(V)$.
- iii. Si $U = \cup_i V_i$, y $S \cap V_i \in \mathcal{C}(V_i)$ para todo i, entonces $S \cap U \in \mathcal{C}(U)$.

Así, al conectivo $c: \Omega^n(X) \rightarrow \Omega(X)$ corresponde el subhaz

$$\begin{aligned} \mathcal{C}(U) &= \{S \in \Omega(U)^n: c_U(S) = U\} \\ &= \{S \in \Omega(U)^n: c(S) \supseteq U\}, \end{aligned}$$

Recíprocamente, un subobjeto $\mathcal{C} = (\mathcal{C}(U))_{U \in \Omega(X)}$ induce el conectivo

$$c(S) = \bigcup \{V \in \Omega(X): (S \cap V) \in \mathcal{C}(V)\},$$

y las dos asignaciones son mutuamente inversas.

Los $\mathcal{C}(U)$ son propiedades o relaciones *locales* de abiertos que se pueden verificar en cualquier recubrimiento abierto, digamos en una base. Por ejemplo, la propiedad local $\mathcal{C}(U) = \{S \in \Omega(U): S \text{ denso en } U\}$ corresponde al conectivo heytingiano de la *doble negación*: $\neg\neg S = \text{Int}(\text{cl}(S))$. En muchos casos resulta lo más natural definir un conectivo en esta forma.

EJEMPLO 4. Los subobjetos asociados a los conectivos de Heyting son:

$$\begin{aligned} \mathcal{C}^{\neg}(U) &= \{\emptyset\} = \{S \subseteq U: \text{Int}(U - S) = U\}. \\ \mathcal{C}^{\wedge}(U) &= \{(U, U)\} = \{(S, T) \in \Omega(U)^2: S \cap T = U\} \\ \mathcal{C}^{\vee}(U) &= \{(S, T) \in \Omega(U)^2: S \cup T = U\} \\ \mathcal{C}^{\rightarrow}(U) &= \{(S, T) \in \Omega(U)^2: S \subseteq T\} \\ &= \{(S, T) \in \Omega(U)^2: \text{Int}((U - S) \cup T) = U\}, \end{aligned}$$

y los subobjetos asociados a los conectivos \square^W y d^W del Ejemplo 3 son, respectivamente:

$$\begin{aligned} \mathcal{C}^W(U) &= \begin{cases} \emptyset & \text{si } W \text{ no contiene a } U, \\ \Omega(U) & \text{si } W \supseteq U \end{cases} \\ \mathcal{D}^W(U) &= \{W \cap U\}. \end{aligned}$$

EJEMPLO 5. El lector puede verificar que las siguientes propiedades locales $\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2, \mathcal{C}_3$ definen conectivos,

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_1(U) &= \{S \in \Omega(U): S \text{ es localmente conexo}\} \\ \mathcal{C}_2(U) &= \{S \in \Omega(U): S \text{ es localmente} \\ &\quad \text{homeomorfo a } \mathbb{R}^n\} \\ \mathcal{C}_3(U) &= \{S \in \Omega(U): \mu(S) = \mu(U)\}, \text{ donde } \mu \text{ es una} \\ &\quad \text{medida en abiertos de } X \text{ y el espacio } X \\ &\quad \text{tiene base enumerable.} \end{aligned}$$

Obsérvese que aunque la acción de un conectivo $(c_U)_{U \in \Omega(X)}: \Omega^n \rightarrow \Omega$ en $\Omega(X)^n$ lo determina completamente, su valor global $\mathcal{C}(X) \subseteq \Omega(X)^n$ como subobjeto no necesariamente lo determina. Por ejemplo, $\mathcal{C}(X)$ puede ser \emptyset , independientemente de los valores $\mathcal{C}(U)$ para $U \neq X$. Tal es el caso de los conectivos constantes \square^W del Ejemplo 3 cuando $W \neq X$.

4. Haces, semántica extendida de Kripke-Joyal

Dado un tipo de similitud o vocabulario de primer orden τ (ver van Dalen 1983), sea Estr_τ la categoría de homomorfismos entre estructuras de tipo τ .

Un haz de estructura de tipo τ sobre X es un funtor $\mathfrak{A}: (\Omega(X), \subseteq) \rightarrow \text{Estr}_\tau$ tal que tanto el funtor universo

$$|\mathfrak{A}|: (\Omega(X), \subseteq) \rightarrow \text{Conj}, \quad |\mathfrak{A}|(U) = \text{Universo de } \mathfrak{A}(U),$$

como los funtores de relación

$$R^{\mathfrak{A}}: (\Omega(X), \subseteq) \rightarrow \text{Conj}, \quad R^{\mathfrak{A}}(U) = R^{\mathfrak{A}(U)}, \quad R \in \tau,$$

son haces sobre X. Se sigue de la funtorialidad de \mathfrak{A} que las inclusiones $R^{\mathfrak{A}}(U) \supseteq |\mathfrak{A}|^n(U)$ y las funciones

$$f_U = f^{\mathfrak{A}(U)}: |\mathfrak{A}|^{\tau(f)}(U) \rightarrow |\mathfrak{A}|(U)$$

son transformaciones naturales para todo símbolo $R, f \in \tau$. Un haz de estructuras sobre X puede describirse también como un espacio fibrado de estructuras, o como cierto tipo de diagrama en la categoría $\text{Sh}(X)$.

Dado un haz de estructuras \mathfrak{A} de tipo τ , la *semántica de Kripke-Joyal* permite interpretar en \mathfrak{A} el lenguaje de primer orden de tipo τ , de forma natural y directa y sin recurrir a construcciones categóricas, cf. MacLane-Moerdijk (1992), Caicedo (1995a). Solamente recordamos algunos puntos relevantes. Se puede introducir una noción de *forzamiento* por \mathfrak{A} de una sentencia de primer orden φ en cada abierto U de X:

$$\mathfrak{A} \Vdash_U \varphi \quad (\mathfrak{A} \text{ fuerza } \varphi \text{ en } U)$$

de manera que se cumple:

- i. Para fórmulas atómicas: $\mathfrak{A} \Vdash_U \varphi \Leftrightarrow \mathfrak{A}(U) \models \varphi$
- ii. Si $U \supseteq V$ y $\mathfrak{A} \Vdash_U \varphi$ entonces $\mathfrak{A} \Vdash_V \varphi$
- iii. Si $U = \cup_i V_i$ y $\mathfrak{A} \Vdash_{V_i} \varphi$ para todo i entonces $\mathfrak{A} \Vdash_U \varphi$.

Podemos también definir un *forzamiento puntual* por la regla:

$$\mathfrak{A} \Vdash_x \varphi \text{ si y solamente si existe una vecindad abierta } U \text{ de } x \text{ tal que } \mathfrak{A} \Vdash_U \varphi.$$

Entonces el conjunto

$$[\varphi]_{\mathfrak{A}}^U = \{ x \in U : \mathfrak{A} \Vdash_x \varphi \}$$

resulta abierto, y por (ii) y (iii) se puede recuperar el forzamiento en abiertos:

$$\mathfrak{A} \Vdash_U \varphi \text{ si y solamente si } \mathfrak{A} \Vdash_x \varphi \text{ para toda } x \in U.$$

El forzamiento en haces no satisface las leyes de la lógica clásica. Satisface, sin embargo, las de la lógica intuicionista como se expresan, por ejemplo, en el Cálculo de Heyting (van Dalen 1983).

EJEMPLO 6. El funtor $\mathfrak{A}: \Omega(X) \rightarrow$ Anillos, con valores

$$\begin{aligned} \mathfrak{A}(U) &= (\mathcal{C}(U, \mathbb{R}), +, \cdot, 0, 1) \\ \mathfrak{A}(h) &= h|_V, \text{ para } h \in \mathcal{C}(U, \mathbb{R}) \text{ y } V \subseteq U, \end{aligned}$$

es un haz de anillos. Si X es conexo, $f(x) = 0$ para toda $x \in \mathbb{R}$ y g es continua con $g^{-1}(0)$ y $g^{-1}(1)$ de interior no vacío, entonces $[f=g]_X$ y $[\neg(f=g)]_X$ son abiertos no vacíos disyuntos. Por conexidad de X , existe $x \notin [f=g]_X \cup [\neg(f=g)]_X$ y por tanto

$$\mathfrak{A} \not\Vdash_x (f=g \vee \neg f=g);$$

es decir, la ley del tercio excluido no se satisface en ningún abierto que contenga a x .

La semántica de Kripke-Joyal puede extenderse al los lenguajes con los nuevos conectivos. Dado un espacio X , para cada conectivo n -ario $c: \Omega(X)^n \rightarrow \Omega(X)$ podemos añadir un nuevo símbolo C a la sintaxis de primer orden y la regla que permite formar nuevas fórmulas $C(\varphi_1, \dots, \varphi_n)$. Ello nos da un lenguaje extendido $L(\mathbf{con})$ para el cual se tiene la nueva regla inductiva de forzamiento en abiertos de X :

DEFINICIÓN. Dado un haz \mathfrak{A} de estructuras sobre X y sentencias $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ de $L(\mathbf{con})$,

$$\mathfrak{A} \Vdash_U C(\varphi_1, \dots, \varphi_n) \Leftrightarrow c([\varphi_1]_{\mathfrak{A}}^U, \dots, [\varphi_n]_{\mathfrak{A}}^U) \supseteq U.$$

En términos de lógica multivaluada:

$$[C(\varphi_1, \dots, \varphi_n)]_{\mathfrak{A}}^U = c([\varphi_1]_{\mathfrak{A}}^U, \dots, [\varphi_n]_{\mathfrak{A}}^U) \cap U.$$

Equivalentemente, si \mathcal{C} es el subobjeto o propiedad local de abiertos clasificada por c podemos definir:

$$\mathfrak{A} \Vdash_U C(\varphi_1, \dots, \varphi_n) \Leftrightarrow ([\varphi_1]_{\mathfrak{A}}^U, \dots, [\varphi_n]_{\mathfrak{A}}^U) \in \mathcal{C}(U).$$

EJEMPLO 7. Para los conectivos del ejemplo 3 tenemos

$$\begin{aligned} \mathfrak{A} \Vdash_U \Box^W \varphi &\Leftrightarrow W \supseteq U. \\ \mathfrak{A} \Vdash_U \text{d}^W \varphi &\Leftrightarrow [\varphi]_{\mathfrak{A}}^U = W \cap U, \end{aligned}$$

y para los del Ejemplo 5,

$$\begin{aligned} \mathfrak{A} \Vdash_U C_1 \varphi &\Leftrightarrow [\varphi]_{\mathfrak{A}}^U \text{ es localmente conexo} \\ \mathfrak{A} \Vdash_U C_2 \varphi &\Leftrightarrow [\varphi]_{\mathfrak{A}}^U \text{ es localmente euclidiano.} \\ \mathfrak{A} \Vdash_U C_3 \varphi &\Leftrightarrow \mu([\varphi]_{\mathfrak{A}}^U) = \mu(U) \Leftrightarrow \mu(\varphi|_U) = 1. \end{aligned}$$

EJEMPLO 8. Conectivos en modelos de Kripke. Un conjunto parcialmente ordenado (Σ, \leq) posee una topología natural Σ^+ , generada por abiertos básicos de la forma $[p] = \{ q \in \Sigma : q \geq p \}$, y todo modelo de Kripke \mathbf{K} de tipo τ sobre (Σ, \leq) puede verse como un haz de estructuras \mathbf{K}^* sobre (Σ, Σ^+) , donde $\mathbf{K}^*([p]) = \mathbf{K}_p$. El valor de \mathbf{K}^* en un abierto cualquiera U se deduce de la propiedad de haz:

$$\mathbf{K}^*(U) = \lim_{p \in U} \mathbf{K}^*([p]).$$

Un conectivo n -ario en modelos de Kripke en el sentido de Caicedo (1995b) determina una familia $\mathcal{C}_p \subseteq ([p]^+)^n$, $p \in \Sigma$, que se extiende automáticamente a un conectivo $(\mathcal{C}(U))_{U \in \Sigma^+}$ del topos $\text{Sh}(\Sigma, \Sigma^+)$, por la definición:

$$\mathcal{C}(U) = \{ S \in \Omega(U)^n : S \cap [p] \in \mathcal{C}_p \text{ para toda } p \in U \}.$$

Puede demostrarse fácilmente que el forzamiento en \mathbf{K} , à la Kripke, de cualquier fórmula con conectivos intuicionistas coincide con el forzamiento de la misma fórmula en el haz \mathbf{K}^* para la semántica de Kripke-Joyal. Véase la Sec. 9.

EJEMPLO 9. "Conexidad local" no es heyтинiana.
 Considere de nuevo el conectivo

$$\mathfrak{A} \Vdash_U C\varphi \Leftrightarrow [\varphi]_U \text{ es localmente conexo,}$$

y sea X el coproducto (unión disyunta) de un espacio U que no sea localmente conexo y todos los espacios inducidos por órdenes parciales finitos. Entonces la fórmula $C(\varphi \rightarrow \varphi)$ es forzada en los abiertos de X inducidos por órdenes parciales, pues estos son siempre localmente conexos, pero no es forzada en U . Ahora bien, si una fórmula proposicional $\theta \in L(\neg, \wedge, \vee, \rightarrow)$ es forzada en todos los abiertos de X correspondientes a órdenes finitos, entonces es forzada en todos los modelos de Kripke, debido a la propiedad de modelos finitos del intuicionismo proposicional, y por lo tanto es deducible en el Cálculo de Heyting, gracias al teorema de completitud de Kripke (1965). Esto último implica que θ es forzada en todo haz y en particular en el abierto U . Podemos concluir entonces que $C(\varphi \rightarrow \varphi)$ no es equivalente a θ en el topos $\text{Sh}(X)$, y por tanto C no es heyтинiano sobre el espacio X .

5. Completitud funcional de los conectivos monádicos

Damos una demostración más directa y sencilla que la de Sette-Caicedo (1993) de que cualquier espacio topológico X los conectivos monádicos, en combinación con \wedge y \vee^∞ (disyunción posiblemente infinitaria), generan todos los conectivos sobre X . En lo que sigue teorema \square^W y d^W son los conectivos introducidos en el Ejemplo 3.

TEOREMA 1. Si $c: \Omega^{\mathbb{N}}(X) \rightarrow \Omega(X)$ determina un conectivo sobre X entonces $C(\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ es equivalente en todos los haces sobre X a la fórmula:

$$\bigvee_{(S_1, \dots, S_n) \in \Omega(X)^{\mathbb{N}}} \square^{c(S_1, \dots, S_n)} \varphi_1 \wedge \left[\bigwedge_{i=1}^n d^{S_i} \varphi_i \right]; \quad (3)$$

y si \mathcal{C} es la propiedad local asociada a c , a la fórmula:

$$\bigvee_{W \in \Omega(X)} \square^W \varphi_1 \wedge \left[\bigvee_{(S_1, \dots, S_n) \in \mathcal{C}(W)} \bigwedge_{i=1}^n d^{S_i}(\varphi_i) \right].$$

Demostración. Sea $T = ([\varphi_1]_U, \dots, [\varphi_n]_U)$. Si $\mathfrak{A} \Vdash_U C(\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ entonces

$$\mathfrak{A} \Vdash_U \square^{c(T)} \varphi_1 \wedge \left[\bigwedge_{i=1}^n d^{T_i} \varphi_i \right],$$

pues $c(T) \supseteq U$ y $[\varphi_i]_U = T_i \cap U$. Como U recubre a U (tome el recubrimiento $\bigvee_U = U$, $\bigvee_W = \emptyset$ para $W \neq U$)

resulta (3). Recíprocamente, si vale (3) entonces existe un recubrimiento $\{V_S: S \in \Omega(X)\}$ de U tal que

$$\mathfrak{A} \Vdash_{V_S} \square^{c(S)} \varphi_1 \wedge \left[\bigwedge_{i=1}^n d^{S_i} \varphi_i \right].$$

Por tanto, $c(S) \supseteq V_S$ y $T_i \cap V_S = [\varphi_i]_{V_S} = S_i \cap V_S$ para cada $S \in \Omega(X)$. Entonces $c(T) \cap V_S = c(T \cap V_S) \cap V_S = c(S) \cap V_S = V_S$, y así $c(T) \cap U = \bigcup_{S \in \Omega(X)} c(T) \cap V_S = U$, o sea $\mathfrak{A} \Vdash_U C(\varphi_1, \dots, \varphi_n)$. Para obtener la segunda fórmula substituya en (3) la equivalencia trivial $\square^{c(S)} \varphi_1 \equiv \bigvee_{W \subseteq c(S)} \square^W \varphi_1$, e intercambie disyunciones, lo que da:

$$\bigvee_{W \in \Omega(X)} \bigvee_{S: c(S) \supseteq W} \square^W \varphi_1 \wedge \left[\bigwedge_{i=1}^n d^{S_i}(\varphi_i) \right],$$

fórmula a su vez equivalente a

$$\bigvee_{W \in \Omega(X)} \square^W \varphi_1 \wedge \left[\bigvee_{S \in \mathcal{C}(W)} \bigwedge_{i=1}^n d^{S_i}(\varphi_i) \right]. \quad \blacksquare$$

COROLARIO 1. Las siguientes familias son funcionalmente completas para los conectivos de $\text{Sh}(X)$.

$$\{\wedge, \vee^\infty, \square^W, d^W \ (W \in \Omega(X))\}$$

$$\{\wedge, \rightarrow, \neg, \vee^\infty, \square^W \ (W \neq X, \emptyset)\}$$

$$\{\wedge, \rightarrow, \neg, \vee^\infty, d^W \ (W \neq X, \emptyset)\}.$$

Demostración. d^W y \square^W son interdefinibles con la ayuda de \rightarrow , \wedge , pues $\square^W \varphi \equiv d^W(\varphi \rightarrow \varphi)$ y $d^W \varphi \equiv (\varphi \rightarrow \square^W \varphi) \wedge (\square^W \varphi \rightarrow \varphi)$. Además, son heyтинianos para $W = X, \emptyset$, pues $d^X(\varphi) \equiv \varphi$ y $d^\emptyset \varphi \equiv \neg \varphi$. \blacksquare

6. Conectivos sobre espacios lineales

Para un espacio topológico proveniente de un orden lineal podemos caracterizar convenientemente las funciones en abiertos que determinan conectivos, y describir conjuntos muy sencillos de generadores monádicos.

TEOREMA 2. Sea (Σ, \leq) un conjunto linealmente ordenado, entonces $f = f_{\Sigma}: \Omega(\Sigma)^{\mathbb{N}} \rightarrow \Omega(\Sigma)$ determina un conectivo n -ario sobre (Σ, \leq) si y solamente si existe $S \in \Omega(\Sigma)$ tal que para todo $X_1, \dots, X_n \in \Omega(\Sigma)$ se tiene, en el orden de inclusión:

- i) $f(X_1, \dots, X_n) = S$, si $\min(X_1, \dots, X_n) > S$.
- ii) $f(X_1, \dots, X_n) \geq \min(X_1, \dots, X_n)$, de lo contrario.
- iii) (si $n \geq 2$) Para cada $i = 1, \dots, n$ y $A \in \Sigma$ fijas, la función $f_{i,A}(X_1, \dots, X_n) := f(X_1, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n)$ es un conectivo.

Demostración. La condición (iii) es necesaria pues las constantes son conectivos y éstos son cerrados bajo composición. Veamos que (i) y (ii) son también necesarias. Sean $M = \min(X_1, \dots, X_n)$ y $S = f(\Sigma, \dots, \Sigma)$. Si f determina un conectivo, se tiene por el Lema 1:

$$\begin{aligned} f(X_1, \dots, X_n) \cap M &= f(X_1 \cap M, \dots, X_n \cap M) \cap M \\ &= f(M, \dots, M) \cap M \\ &= f(\Sigma \cap M, \dots, \Sigma \cap M) \cap M \\ &= f(\Sigma, \dots, \Sigma) \cap M = S \cap M. \end{aligned}$$

Por tanto, $M > S$ implica $f(X_1, \dots, X_n) \cap M = S$ y por ser lineal el orden, $f(X_1, \dots, X_n) = S$, es decir se satisface (i). Si $M \leq S$ entonces $f(X_1, \dots, X_n) \cap M = M$, o sea que se satisface (ii). Recíprocamente, suponga que (i) y (ii) se cumplen para algún S , debemos demostrar que f cumple la ecuación (2) para tal S . Sean $M = \min(X_1, \dots, X_n)$ y $M' = \min(X_1 \cap X, \dots, X_n \cap X) = M \cap X$.

Caso 1. $M > S$, entonces $f(X_1, \dots, X_n) = S$ por (i).
Subcaso 1.1. $X > S$, entonces $M' = M \cap X > S$ por ser lineal el orden; y por (i) se tiene $f(X_1 \cap X, \dots, X_n \cap X) = S = f(X_1, \dots, X_n)$, luego (3) vale trivialmente.
Subcaso 1.2. $X \leq S$, entonces $M > X$ y por tanto $M' = M \cap X = X \leq S$. Por (ii), $f(X_1 \cap X, \dots, X_n \cap X) \geq M \geq M \cap X = X$, luego $f(X_1 \cap X, \dots, X_n \cap X) \cap X = X = S \cap X = f(X_1, \dots, X_n) \cap X$.

Caso 2. $M \leq S$, entonces $M' \leq S$ y por (ii):
 $f(X_1, \dots, X_n) \geq M$ y $f(X_1 \cap X, \dots, X_n \cap X) \geq M \cap X$.
Subcaso 2.1. $X \leq M$, entonces
 $f(X_1 \cap X, \dots, X_n \cap X) \cap X = X = f(X_1, \dots, X_n) \cap X$.
Subcaso 2.2. $X > M$. Sea $M = X_i$, entonces $X_i \cap X = X_i = M$. Como $f_{i,M}$ es un conectivo por (iii), entonces $f(X_1 \cap X, \dots, X_n \cap X) \cap X = f_{i,M}(X_1 \cap X, \dots, X_n \cap X) \cap X = f_{i,M}(X_1, \dots, X_n) \cap X = f(X_1, \dots, X_n) \cap X$. ■

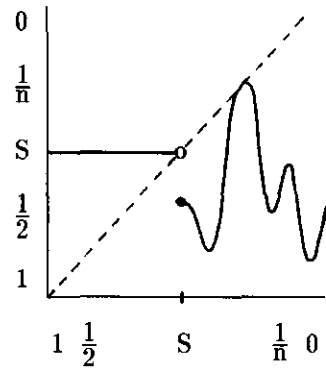
COROLARIO 2. Si $f(X_1, \dots, X_n) \geq \max(X_1, \dots, X_n)$ para todos los argumentos entonces f es un conectivo.

Demostración. La propiedad $f(X_1, \dots, X_n) \geq \max(X_1, \dots, X_n)$ se hereda al fijar uno o varios de los argumentos y además implica trivialmente (i) y (ii) del Teorema 2, haciendo $S = 1$. Podemos entonces probar por inducción en $k \geq 1$ que todas las funciones resultantes de fijar $n-k$ argumentos en f determinan conectivos. ■

Para el caso monádico tenemos:

COROLARIO 3. $f: \Omega(\Sigma) \rightarrow \Omega(\Sigma)$ determina un conectivo monádico sobre (Σ, \leq) si y solamente si existe $S \in \Omega(\Sigma)$ tal que:
 $f(X) = S$ para $X > S$
 $f(X) \geq X$ para $X \leq S$.

Gráficamente,



f debe ser constante hasta la diagonal (exclusive) y de ahí en adelante arbitraria, pero permaneciendo en la diagonal o debajo de ella.

EJEMPLO 10. Conectivos de un orden lineal finito. Sea $\Sigma_n = \{1, 2, \dots, n\}$ con el orden corriente, entonces la topología asociada $\Omega(\Sigma_n, \leq)$ está formada por el conjunto vacío y los conjuntos $[j] = \{x \in \Sigma_n : x \geq j\}$, $1 \leq j \leq n$, los cuales forman una álgebra de Heyting lineal de $n+1$ valores:

$$[1] \supseteq [2] \supseteq \dots \supseteq [n] \supseteq \emptyset,$$

que podemos identificar con la sucesión descendente:

$$1 > \frac{1}{2} > \frac{1}{3} > \dots > \frac{1}{n} > 0.$$

El Corolario 3 nos permite contar el número de conectivos monádicos, que es en este caso:

$$\sum_{k=0}^n (n+1)!/k!.$$

PROPOSICION 1. Los conectivos sobre (Σ_n, \leq) son generados por $\neg, \vee, \wedge, \rightarrow$, junto con los conectivos N^j , $j = 1, \dots, n-1$, definidos por

$$\mathfrak{A} \Vdash_k N^j \varphi \Leftrightarrow \|\llbracket \varphi \rrbracket_{[k]}\| \leq j.$$

Demostración. Por el Corolario 1, pues los conectivos $\square^{[j]}$, $j = 2, \dots, n$, son definibles de los N^j :

$$\begin{aligned} \mathfrak{A} \Vdash_k \square^{[j]} \varphi &\Leftrightarrow [k] \subseteq [j] \\ &\Leftrightarrow |[k]| \leq |[j]| = n-(j-1) \\ &\Leftrightarrow \mathfrak{A} \Vdash_k N^{n-j+1}(\varphi \rightarrow \varphi). \end{aligned}$$

EJEMPLO 11. Conectivos de (ω, \leq) . $\Omega(\omega, \leq)$ es isomorfo a la sucesión descendente de racionales:

$$1 > \frac{1}{2} > \dots > \frac{1}{n} > \dots > 0$$

ya la caracterización del Corolario 3 nos muestra que hay 2^ω conectivos monádicos sobre (ω, \leq) . Por lo tanto, no podrá haber un conjunto funcionalmente completo enumerable, a no ser que se permitan disyunciones infinitas. En tal caso, por el Corolario 1, es suficiente añadir los conectivos monádicos $d^j = d^{[j]}$, $j \geq 2$, que sobre (ω, \leq) pueden expresarse por

$$\mathfrak{A} \Vdash_j d^j \varphi \Leftrightarrow |[i] - [\varphi]_{[i]}| = j \dot{-} i \text{ (resta truncada).}$$

7. Los conectivos de la lógica intuicionista trivalente

Consideremos el topos de haces sobre el espacio de Sierpinski $X = (\{1,2\}, \{\{1,2\}, \{2\}, \emptyset\})$. Como $X = (\Sigma_2, \Sigma_2^+)$, donde $\Sigma_2 = (\{1,2\}, \leq)$, se trata de los marcos de Kripke sobre el orden lineal de dos elementos. Sus conectivos están caracterizados por ciertas funciones en $\Omega(X) = \{\{1\}, \{2\}, \emptyset\} = \{1, \frac{1}{2}, 3\}$.

Con respecto a los conectivos corrientes la lógica de este topos no es más que la *lógica intuicionista trivalente* de Heyting (1930), que toma valores de verdad en el álgebra $T = (\{1, \frac{1}{2}, 3\}, \wedge, \vee, \rightarrow, \neg)$, donde:

\wedge	1	$\frac{1}{2}$	0	\vee	1	$\frac{1}{2}$	0	\rightarrow	1	$\frac{1}{2}$	0	x	$\neg x$
1	1	$\frac{1}{2}$	0	1	1	1	1	1	1	$\frac{1}{2}$	0	1	0
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	0	$\frac{1}{2}$	0
0	0	0	0	0	1	$\frac{1}{2}$	0	0	1	1	1	0	1

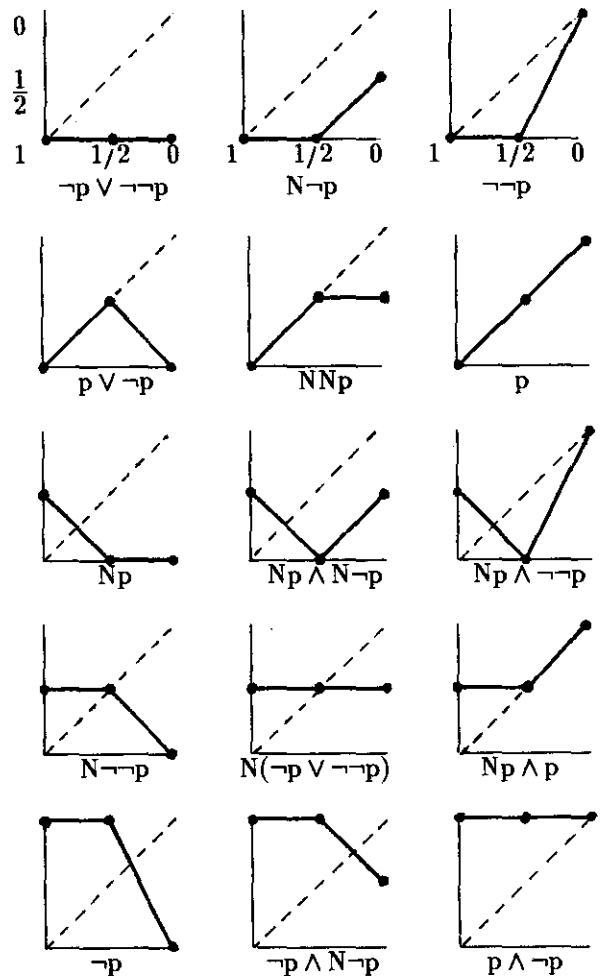
Según la última proposición, un conjunto completo de conectivos para la lógica de este topos es $\{N, \neg, \vee, \wedge, \rightarrow\}$ donde N está definido por la condición

$$\mathfrak{A} \Vdash_i N\varphi \text{ sí y solamente si } |[\varphi]_{[i]}| \leq 1.$$

Como función en abiertos, $N(x) = \cup \{z \subseteq \Omega(\{1,2\}) : |z \cap x| \leq 1\}$, lo que da $N(\{1,2\}) = \{2\}$, $N(\{2\}) = \{1,2\}$ y $N(\emptyset) = \{1,2\}$, es decir,

x	Nx
1	1/2
1/2	1
0	1

Las siguientes son las funciones de $\Omega(X)$ que determinan conectivos monádicos según el Teorema 2:



Si $f(0) = 1/2$ o $f(1) = 1/2$, el conectivo f no puede ser heytingiano, puesto que en el álgebra de Heyting T la subálgebra $\{1, 0\}$ no es cerrada bajo f . Esto nos deja con 6 conectivos monádicos heytingianos, los cuales corresponden al álgebra de Heyting trivalente libre en un generador, los otros 9 son nuevos.

Obsérvese que la implicación trivalente de Lukaciewicz (1930), cf. Cignoli, D'Ottaviano & Mundici (1995):

\rightarrow_L	1	$\frac{1}{2}$	0
1	1	$\frac{1}{2}$	0
$\frac{1}{2}$	1	1	$\frac{1}{2}$
0	1	1	1

no es un conectivo intuicionista; si lo fuera, la función $f(x) = (x \rightarrow_L 0)$ también lo sería, pero esta función no aparece en la tabla anterior. No satisface el Corolario 3 ya que el valor $f(1) = 0$ no se repite en $f(1/2)$.

Demostremos ahora que el siguiente es un sistema deductivo completo para las sentencias válidas de la lógica proposicional trivalente enriquecida con N :

Axiomas del Cálculo de Heyting

$$A_1 ((\varphi \rightarrow \theta) \rightarrow \psi) \rightarrow (((\psi \rightarrow \varphi) \rightarrow \psi) \rightarrow \psi)$$

$$A_2 (\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow (N\psi \rightarrow N\varphi)$$

$$A_3 N\varphi \rightarrow [(\varphi \rightarrow \psi) \vee (\varphi \rightarrow \neg\psi)]$$

$$A_4 \varphi \vee N\varphi$$

$$A_5 \neg\neg N\psi$$

Reglas: *Modus Ponens*.

(4)

A_1 es el axioma dado para la lógica intuicionista trivalente en Monteiro (1964). A_3 y A_4 coinciden con los dados en Caicedo (1995b) para el mismo conectivo en modelos de Kripke arbitrarios (llamado allí C^1). A_4 y A_5 son característicos de N en lógica trivalente. Para demostrar la completitud del sistema utilizaremos métodos algebraicos.

DEFINICIÓN. Una N -álgebra (de Heyting) es una par (H, N) , donde H es una álgebra de Heyting trivalente, es decir, satisface la ecuación

$$((\varphi \rightarrow \theta) \rightarrow \psi) \rightarrow (((\psi \rightarrow \varphi) \rightarrow \psi) \rightarrow \psi) = 1,$$

y N es una operación en H que satisface las ecuaciones

$$(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow (N\psi \rightarrow N\varphi) = 1$$

$$N\varphi \rightarrow [(\varphi \rightarrow \psi) \vee (\varphi \rightarrow \neg\psi)] = 1$$

$$\varphi \vee N\varphi = 1$$

$$\neg\neg N\psi = 1.$$

El álgebra de Heyting $T = (\{0, \frac{1}{2}, 1\}, \wedge, \vee, \rightarrow, \neg)$ con las operación N arriba indicada es una N -álgebra. Igualmente, $B = \{0, 1\}$, o cualquier álgebra booleana, con la operación constante $Nx = 1$ es una N -álgebra. Es claro además que (B, N) es imagen homomorfa de (T, N) por la identificación de 1 y $\frac{1}{2}$.

LEMA 2. Las álgebras de Heyting T y B tienen expansiones únicas (T, N) y (B, N) a N -álgebras.

Demostración. Por A_4 , se tiene en cualquier N -álgebra, $N0 = 0 \vee N0 = 1$, y por A_5 se tiene que $Nx \neq 0$ para toda x (si $Nx = 0$ entonces $\neg\neg Nx = 0$). Además en (T, N) , $\frac{1}{2} \vee N\frac{1}{2} = 1$, lo que implica $N\frac{1}{2} \neq 0, \frac{1}{2}$, es de-

cir $N\frac{1}{2} = 1$. Hemos visto que $N1 \neq 0$. Si $N1 = 1$ en (T, N) , entonces $\psi \vee \neg\psi = 1 \rightarrow ((1 \rightarrow \psi) \vee (1 \rightarrow \neg\psi)) = 1$ por A_3 , lo cual implicaría que T es booleana, una contradicción. Consecuentemente, $N1 = \frac{1}{2}$. Esto muestra la unicidad de N en T . Por otra parte, en una N -álgebra (B, N) , $Nx = 1$ para toda x , pues hemos visto que $Nx \neq 0$. \square

Se puede demostrar que en toda álgebra booleana la única operación posible de N -álgebra es la constante 1. Recíprocamente, que ésta sea una operación de N -álgebra implica que el álgebra es booleana. Por otra parte, no toda álgebra de Heyting trivalente puede expandirse a una N -álgebra, como es el caso del álgebra trivalente libre en un generador.

LEMA 3. Un homomorfismo sobreectivo de una álgebra de Heyting H en una álgebra de Heyting H' transforma toda operación de N -álgebra en H en una operación de N -álgebra en H' .

Demostración. Resulta inmediatamente de A_2 que $(x \leftrightarrow y) \leq Nx \leftrightarrow Ny$ en cualquier N -álgebra. Luego, para cualquier homomorfismo de álgebras de Heyting, $f(x) = f(y)$ implica $f(Nx \leftrightarrow Ny) \geq f(x \leftrightarrow y) = 1$, y así $f(Nx) = f(Ny)$, puede definirse entonces en H' : $Nf(x) = f(Nx)$. \square

TEOREMA 3. Las siguientes afirmaciones son equivalentes para una fórmula φ del lenguaje proposicional $L(\rightarrow, \vee, \wedge, \neg, N)$.

a) φ es formalmente deducible en el sistema (4).

b) $K \Vdash \varphi$ para todo haz K sobre el espacio de Sierpinski (equivalentemente, para todo modelo de Kripke sobre $1 \rightarrow 2$).

c) $v(\varphi) = 1$ para toda valuación v de L en $\{0, \frac{1}{2}, 1\}$ que satisfaga las tablas trivalentes de (T, N) .

Demostración. (a) \Rightarrow (b). A_1 vale en todas las álgebras trivalentes, es decir $v(A_1) = 1$ para toda valuación en T que satisfaga las tablas arriba indicadas. Como todo modelo de Kripke K sobre $1 \rightarrow 2$ da lugar a una valuación v_K que valida las mismas formulas que K fuerza, tenemos que K fuerza A_1 . En Caicedo (1995b) se demuestra que A_2 y A_3 son válidos en todos los modelos de Kripke. Finalmente, observe que para cualquier modelo de Kripke K sobre $1 \rightarrow 2$ se tiene $K \Vdash_2 N\varphi$ para cualquier φ , pues $[\varphi]_2 \subseteq \{2\}$, y así $K \Vdash_2 \varphi \vee N\varphi$. Si $K \Vdash_{-1} \varphi$ entonces $[\varphi]_1 \subseteq \{2\}$ y así $K \Vdash_{-1} N\varphi$, es decir, $K \Vdash_{-1} \varphi \vee N\varphi$. Esto demuestra la validez de A_4 . La validez de A_5 es igualmente sencilla, pues $N\psi$ se fuerza siempre en el nodo 2.

(b) \Rightarrow (c). A toda valuación v de las letras proposicionales con valores en T corresponde un modelo proposicional de Kripke K_v sobre $1 \rightarrow 2$ tal que $\llbracket p \rrbracket = \emptyset$ si $v(p) = 0$, $\llbracket p \rrbracket = \{2\}$ si $v(p) = \frac{1}{2}$, y $\llbracket p \rrbracket = \{1,2\}$ si $v(p) = 1$. Por la construcción de las tablas es evidente que $K_v \Vdash_{\{1,2\}} \varphi$ si y solamente si $v(\varphi) = 1$.

(c) \Rightarrow (a). Dada una N -álgebra (H, N^*) de 2 o más elementos, el álgebra de Heyting H es un producto subdirecto de copias de T y de B . Por el Lema 3, la imagen de N^* en cada factor subdirecto es una operación de N -álgebra y por el Lema 2 debe coincidir con las operaciones N de T y B , respectivamente. Esto implica que como N -álgebra (H, N^*) es un producto subdirecto de copias de (T, N) y (B, N) . Ahora, toda ecuación válida en (T, N) lo es en (B, N) , ya que ésta última es imagen homomorfa de (T, N) , luego lo es en cualquier N -álgebra. Aplicando ésto a la N -álgebra libre en enumerables generadores, es decir al álgebra deductiva de fórmulas $H = L(\rightarrow, \vee, \wedge, \neg, N)/\mathcal{F}$, con generadores p_1, p_2, \dots , donde \mathcal{F} es el filtro generado por los axiomas, obtenemos que cualquier fórmula válida en (T, N) se deduce de los axiomas. \square

8. Conectivos invariantes

Un conectivo c sobre un espacio X se dirá *invariante* si para todo par de abiertos U, W en X y todo homeomorfismo $h: U \rightarrow W$ se tiene

$$c_W \circ h' = h' \circ c_U.$$

Esto significa que la propiedad local de abiertos que lo define es invariante bajo homeomorfismos locales:

$$(S_1, \dots, S_n) \in \mathcal{C}_U \Leftrightarrow (h'(S_1), \dots, h'(S_n)) \in \mathcal{C}_W,$$

pues $S \in \mathcal{C}_U \Leftrightarrow c_U(S) = U \Leftrightarrow h'(c_U(S)) = h'(U) = W \Leftrightarrow c_W(h'(S)) = W \Leftrightarrow h'(S) \in \mathcal{C}_W$. Semánticamente, para cualquier fórmula construida con conectivos invariantes y cualquier homeomorfismo $h: U \rightarrow W$:

$$A \Vdash_U \varphi[\sigma] \Leftrightarrow A \Vdash_W \varphi[h \circ \sigma].$$

Se verifica fácilmente que los conectivos invariantes son cerrados bajo composición.

EJEMPLO 12. Los conectivos heytingianos son invariantes sobre cualquier espacio X . Los conectivos en modelos de Kripke de Caicedo (1995b) son invariantes sobre cualquier orden parcial fijo. Todo conectivo defi-

nido por una propiedad local *topológica*, por ejemplo "localmente conexo" (Ejemplo 9) es invariante sobre cualquier espacio.

EJEMPLO 13. Los conectivos de un orden lineal finito son todos invariantes; por ejemplo, los de la lógica trivalente de Heyting. Este no es el caso de los órdenes infinitos; los conectivos constantes $\square^{[j]}$ de (ω, \leq) no son invariantes, pues dado el homeomorfismo $h(x) = x+1$ de $[0]$ en $[1]$ y $S \in [0]^+$ se tiene:

$$h'(\square_{[0]}^{[2]}(S)) = h'(\{2\}) = \{3\} \neq \{2\} = \square_{[1]}^{[2]}(h'(S)).$$

Mostramos en seguida que todos los conectivos invariantes *monádicos* de (ω, \leq) y de (\mathbb{R}, \leq) son generados por un solo conectivo invariante. No sabemos si este genera todos los invariantes n -arios de estos espacios.

DEFINICIÓN. Sea F el conectivo definido en modelos de Kripke por: $\mathfrak{A} \Vdash_p F\varphi \Leftrightarrow \forall q > p: \mathfrak{A} \Vdash_q \varphi$.

Sobre (ω, \leq) , $F\varphi$ significa que φ será forzada a más tardar en el siguiente paso:

$$\mathfrak{A} \Vdash_n F\varphi \Leftrightarrow \mathfrak{A} \Vdash_{n+1} \varphi;$$

y el iterado $F^k = F \dots F$ (k veces) significa que *será forzada a más tardar en k pasos*:

$$\mathfrak{A} \Vdash_n F^k \varphi \Leftrightarrow \mathfrak{A} \Vdash_{n+k} \varphi.$$

La tabla de verdad de F^k es: $c(1/j) = 1/1+(j-k)$, $c(0) = 0$.

TEOREMA 4. *Los conectivos monádicos invariantes de (ω, \leq) son infinitos y están generados por los de Heyting (\vee finito) más el conectivo F .*

Demostración. Verificamos primero que los siguientes son todos los subobjetos correspondientes a conectivos monádicos invariantes $(\mathcal{C}_n)_n = (\mathcal{C}(\llbracket n \rrbracket))_n$ sobre (ω, \leq) :

1. $\mathcal{C}_n = \emptyset$
2. $\mathcal{C}_n = \{\emptyset\}$
3. Para cada $k \in \omega$, $\mathcal{C}_n = \{\llbracket n \rrbracket, \llbracket n+1 \rrbracket, \dots, \llbracket n+k \rrbracket\}$
4. Para cada $k \in \omega$, $\mathcal{C}_n = \{\llbracket n \rrbracket, \llbracket n+1 \rrbracket, \dots, \llbracket n+k \rrbracket, \emptyset\}$
5. $\mathcal{C}_n = \{\llbracket n \rrbracket, \llbracket n+1 \rrbracket, \dots\} = \llbracket n \rrbracket^+$
6. $\mathcal{C}_n = \{\llbracket n \rrbracket, \llbracket n+1 \rrbracket, \dots, \emptyset\} = \llbracket n \rrbracket^+ \cup \{\emptyset\}$.

Es suficiente calcular \mathcal{C}_0 , pues por invarianza

$$[j+n] \in \mathcal{C}_n \Leftrightarrow [j] \in \mathcal{C}_0, \quad (5)$$

ya que $h(x) = x+n$ es un homeomorfismo de $\{0\}$ en $\{n\}$, de modo que \mathcal{C}_0 determina a $(\mathcal{C}_n)_n$ por traslaciones. Observe además que $[k] \in \mathcal{C}_0$ implica $[k] = [k] \cap [j] \in \mathcal{C}_j$, y por (5), $[k-j] \in \mathcal{C}_0$ para toda $j \leq k$. Tenemos, pues, según los casos:

Caso 1: no existe j tal que $[j] \in \mathcal{C}_0$. Entonces $\mathcal{C}_0 = \emptyset$ o $\mathcal{C}_0 = \{0\}$, y así $\mathcal{C}_n = \emptyset$ para toda n , o $\mathcal{C}_n = \{0\}$ para toda n .

Caso 2: existe j tal que $[j] \in \mathcal{C}_0$. Entonces

$$\mathcal{C}_0 = \{[0], [1], \dots, [k]\} \quad \text{o} \quad \mathcal{C}_0 = \{[0], [1], \dots, [k], \emptyset\}$$

si existe máximo k tal que $[k] \in \mathcal{C}_0$; y de lo contrario $\mathcal{C}_0 = \Omega(X)$ o $\mathcal{C}_0 = \Omega(X) - \{\emptyset\}$.

Es inmediato que los conectivos arriba enumerados son, cuando se interpretan:

1. false
2. $\neg\varphi$
3. $F^k\varphi$
4. $F^k\varphi \vee \neg\varphi$
5. $\neg\neg\varphi$
6. true. ■

Como hemos dicho, no sabemos si F genera todos los conectivos invariantes sobre (ω, \leq) . Como ilustración, el conectivo invariante binario

$$\mathcal{C} = \{([p], [q]) : |[p] - [q]| \leq k\}$$

puede expresarse por $\bigwedge_i \in \omega (F^i\varphi \rightarrow F^{i+k}\psi)$.

Para el caso de (\mathbb{R}, \leq) , consideramos por comodidad los siguiente conectivos adicionales:

$$\mathfrak{U} \Vdash_X M\varphi \Leftrightarrow \llbracket \varphi \rrbracket_{[x]} \text{ tiene mínimo}$$

$$\mathfrak{U} \Vdash_X N\varphi \Leftrightarrow \mathfrak{U} \Vdash_{[x]} \varphi \text{ ó } \llbracket \varphi \rrbracket_{[x]} \neq \emptyset \text{ y no tiene mínimo}$$

Sobre (ω, \leq) , estos conectivos son triviales pues $M\varphi \equiv \neg\neg\varphi$ y $N\varphi \equiv \text{false}$, pero sobre (\mathbb{R}, \leq) no son ni siquiera heytinianos.

LEMA 4. En modelos de Kripke sobre (\mathbb{R}, \leq) ,

$$M\varphi \equiv \neg\neg\varphi \wedge (F\varphi \rightarrow \varphi)$$

$$N\varphi \equiv \neg\neg\varphi \wedge (M\varphi \rightarrow \varphi).$$

Demostración. Utilice la densidad y completez del orden de (\mathbb{R}, \leq) . ■

TEOREMA 5. Los conectivos monádicos invariantes de (\mathbb{R}, \leq) son 14 y están generados por los de Heyting más el conectivo F .

Demostración. Solamente hay dos tipos de abiertos no vacíos en (\mathbb{R}, \leq) : $[x] = [x, \infty) \approx [1, \infty)$ y $(x, \infty) \approx (1, \infty)$. Por tanto, para determinar un conectivo invariante $\mathfrak{F} = \{\mathfrak{F}([x]), \mathfrak{F}((x, \infty))\}_{x \in \mathbb{R}}$ como subobjeto es suficiente conocer

$$\mathfrak{F}(1) = \mathfrak{F}([1]) \quad \text{y} \quad \mathfrak{F}(1^*) = \mathfrak{F}((1, \infty)).$$

Caso 1: existe $[y] \in \mathfrak{F}(1)$ con $y > 1$. Entonces $[z] \in \mathfrak{F}(1)$ para todo $z > 1$, pues hay un endo-homeomorfismo de $[1]$ que envía $[y]$ a $[z]$, y por restricción a $(1, \infty)$ se tiene también $[z] \in \mathfrak{F}(1^*)$ para todo $z > 1$. Además, $[y] \in \mathfrak{F}([y])$ y $(y, \infty) \in \mathfrak{F}((y, \infty))$ por restricción y así $[1] \in \mathfrak{F}(1)$, $(1, \infty) \in \mathfrak{F}(1^*)$ por homeomorfismo. En suma, tenemos:

$$\begin{aligned} \mathfrak{F}(1) &\supseteq \{[z] : z \geq 1\}, \\ \mathfrak{F}(1^*) &\supseteq \{[z] : z > 1\} \cup \{(1, \infty)\}. \end{aligned}$$

Caso 2: existe $(y, \infty) \in \mathfrak{F}(1)$ con $y > 1$. Entonces se obtiene análogamente que

$$\begin{aligned} \mathfrak{F}(1) &\supseteq \{(z, \infty) : z \geq 1\} \cup \{[1]\}, \\ \mathfrak{F}(1^*) &\supseteq \{(z, \infty) : z \geq 1\} \end{aligned}$$

Combinando la presencia y ausencia de los dos casos anteriores, tenemos los posibles valores de $\mathfrak{F}(1)$ y $\mathfrak{F}(1^*)$:

- No vale 1 ni 2:

1. $\mathfrak{F}(1) = \mathfrak{F}(1^*) = \emptyset$
2. $\mathfrak{F}(1) = \mathfrak{F}(1^*) = \{0\}$
3. $\mathfrak{F}(1) = \{[1]\}$, $\mathfrak{F}(1^*) = \{(1, \infty)\}$
4. $\mathfrak{F}(1) = \{[1], (1, \infty)\}$, $\mathfrak{F}(1^*) = \{(1, \infty)\}$.

- Vale 1 pero no 2:

5. $\mathfrak{F}(1) = \{[z] : z \geq 1\}$,
 $\mathfrak{F}(1^*) = \{[z] : z > 1\} \cup \{(1, \infty)\}$
6. $\mathfrak{F}(1) = \{(1, \infty), [z] : z \geq 1\}$,
 $\mathfrak{F}(1^*) = \{[z] : z > 1\} \cup \{(1, \infty)\}$.

- Vale 2 pero no 1

7. $\mathfrak{F}(1) = \{[1], (z, \infty) : z \geq 1\}$,
 $\mathfrak{F}(1^*) = \{(z, \infty) : z \geq 1\}$.

- Valen 1 y 2:

8. $\mathfrak{F}(1) = \{[z], (z, \infty) : z \geq 1\}$,
 $\mathfrak{F}(1^*) = \{(1, \infty), [z], (z, \infty) : z > 1\}$.

Se duplican los casos 3 a 8 añadiendo \emptyset a cada uno, lo que da 14 conectivos, pues $\emptyset \in \mathcal{F}(1) \Leftrightarrow \emptyset \in \mathcal{F}(1^*)$. Finalmente, se verifica que los conectivos arriba enumerados corresponden respectivamente a:

1. false,
2. $\neg\varphi$
3. φ
4. $F\varphi$
5. $M\varphi$
6. $F\varphi \vee M\varphi$,
7. $N\varphi$
8. $\neg\neg\varphi$.

Ahora, los conectivos 5, 6 y 7 son expresables con F por el Lema 4, y añadir \emptyset a los conectivos 3 a 8 equivale tomar la disyunción $\Box\varphi \vee \neg\varphi$ para cada uno. ■

9. Conectivos globales.

Llamaremos *conectivo global (de espacios topológicos)* a toda escogencia de un conectivo $c^X: \Omega(X)^n \rightarrow \Omega(X)$ en cada espacio X que sea preservada por inyecciones homeomorfas abiertas. Es decir, cada c^X es invariante y la invarianza se extiende a abiertos homeomorfos que residen en distintos espacios. También podemos ver los conectivos globales como la escogencia de una propiedad topológica de abiertos \mathcal{C} tal que para cada X , $\mathcal{C}(X) \subseteq \Omega(X)^n$ cumple la condición de haz sobre $(\Omega(X), \subseteq)$.

Los conectivos heyтинianos son globales, lo mismo que todo conectivo definible por una propiedad topológica. Si nos restringimos a los espacios provenientes de órdenes parciales, los conectivos globales coinciden esencialmente con los conectivos intuicionistas en modelos de Kripke de Caicedo (1995b). Para ver esto, dado un conectivo \mathcal{C} en modelos de Kripke, introduzcamos su *normalización* :

$$\mathcal{C}^* = \{(\Sigma, \leq, \mathbf{S}) : \forall p \in \Sigma ([p], \leq, \mathbf{S} \cap [p]) \in \mathcal{C}\}.$$

Entonces \mathcal{C} y \mathcal{C}^* son equivalentes para forzamiento en modelos de Kripke, y $\mathcal{C}^{**} = \mathcal{C}^*$. Además:

PROPOSICION 2. *Los conectivos normalizados en modelos de Kripke coinciden con los conectivos globales en órdenes parciales.*

Demostración. Dado un conectivo normalizado \mathcal{C} en modelos de Kripke, la asignación para cada orden par-

cial $\Sigma = (\Sigma, \leq)$ de:

$$\mathcal{C}(\Sigma) = \{\mathbf{S} \in \Omega(\Sigma)^n : (\Sigma, \leq, \mathbf{S}) \in \mathcal{C}\}.$$

define un conectivo global, pues se cumple:

Si $\mathbf{S} \in \mathcal{C}(\Sigma)$ y $h: \Sigma' \rightarrow V \subseteq \Sigma$ es un homeomorfismo entonces $(\Sigma, \leq, \mathbf{S}) \in \mathcal{C}$ y $h: \Sigma' \rightarrow V$ es un isomorfismo de orden. Por las propiedades de \mathcal{C} , $(V, \leq, \mathbf{S} \cap V) \in \mathcal{C}$ y $(\Sigma', \leq, h^{-1}(\mathbf{S})) = (\Sigma', \leq, h^{-1}(\mathbf{S} \cap V)) \in \mathcal{C}$; o sea, $h^{-1}(\mathbf{S}) \in \mathcal{C}(\Sigma')$.

Si $\Sigma = \cup W_i$, $\mathbf{S} \in \Omega(\Sigma)^n$ y $\mathbf{S} \cap W_i \in \mathcal{C}(W_i)$ para todo i , sea $p \in \Sigma$, entonces $[p] \subseteq W_i$ para algún i , y por tanto $\mathbf{S} \cap [p] = (\mathbf{S} \cap W_i) \cap [p] \in \mathcal{C}([p])$. Es decir, $([p], \leq, \mathbf{S} \cap [p]) \in \mathcal{C}$. Por normalidad, $(\Sigma, \leq, \mathbf{S}) \in \mathcal{C}$.

Recíprocamente, si $\Sigma \mapsto \mathcal{C}(\Sigma)$ es un conectivo global en órdenes parciales, dado como propiedad topológica,

$$\mathcal{C} = \{(\Sigma, \leq, \mathbf{S}) : \mathbf{S} \in \mathcal{C}(\Sigma)\}$$

es un conectivo normalizado en modelos de Kripke, y las asignaciones descritas son mutuamente inversas. ■

Se puede verificar que los conectivos heyтинianos son preservados por imágenes inversas de funciones continuas abiertas. Este no es el caso de otros conectivos globales como "localmente conexo".

CONJETURA. Los conectivos heyтинianos sobre espacios topológicos coinciden con los conectivos globales preservados por funciones continuas abiertas.

Sobre órdenes parciales las funciones continuas abiertas son los *homomorfismos fuertes* de Caicedo (1995b); es razonable conjeturar también que los conectivos heyтинianos en modelos de Kripke son exactamente los preservados por dichos homomorfismos.

Categorialmente, los conectivos globales son las transformaciones naturales $(c^X)_X$ de $(\Omega|_{\mathbf{Topia}})^n$ en $\Omega|_{\mathbf{Topia}}$, donde $\Omega: \mathbf{Top} \rightarrow \mathbf{Conj}$ es el funtor contravariante que envía cada espacio topológico a su topología y cada función continua a la función imagen recíproca, y \mathbf{Topia} es la subcategoría de \mathbf{Top} determinada por las inyecciones homeomorfas abiertas. Estas transformaciones están en correspondencia con los subfuntores de $\Omega|_{\mathbf{Topia}}$ que cumplen en cada X la condición de haz.

Generalizando, podemos definir los conectivos globales de cualquier subcategoría \mathcal{C} de \mathbf{Top} como las transformaciones naturales $(c^X)_X \in \mathbf{Obj}(\mathcal{C})$ de $\Omega|_{\mathcal{C}}$ en si mismo, siempre que \mathcal{C} contenga todas las inclusio-

nes de abiertos en sus objetos. Estas últimas se necesitan para que cada función c^X defina en realidad un conectivo. Los conectivos globales de la categoría $(\Omega(X), \subseteq)$ son precisamente los conectivos de $\text{Sh}(X)$. Los de la categoría $(\Omega(X), \subseteq)$ enriquecida con todas las inyecciones continuas abiertas entre sus objetos son los conectivos invariantes de $\text{Sh}(X)$. Hemos visto que los de la categoría de espacios provenientes de órdenes parciales con inyecciones homeomorfas abiertas son los conectivos en modelos de Kripke.

De ser cierta la conjetura arriba propuesta, los conectivos globales de la categoría de funciones abiertas continuas serían exactamente los heytingianos. Obsérvese que no toda función continua preserva la negación o la implicación de Heyting. Como el espacio de Sierpinski S representa al funtor Ω en Top (con todas las funciones continuas), se tiene por el Lema de Yoneda que los conectivos globales de Top están en correspondencia con las funciones continuas de S^n en S . No es difícil mostrar que éstos son los generados por \wedge , \vee , **true** y **false**. Es decir, la lógica global de Top es la de los reticulados distributivos con máximo y mínimo.

Reconocimientos. La demostración del Teorema 3 nos fue inspirada por las sugerencias del Prof. Roberto Cignoli (U. de Buenos Aires) respecto a utilizar métodos algebraicos en el estudio de los conectivos. También se ha beneficiado este trabajo de las observaciones y correcciones del Prof. Francisco Miraglia (U. de São Paulo).

Bibliografía

- Caicedo, X.** 1995a: Lógica de los haces de estructuras. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **21 (74)**: 569-585.
- Caicedo, X.** 1995b: Investigaciones sobre los conectivos intuitionistas. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **21 (75)**: 705-716.
- Cignoli, R., D'Ottaviano, I. & D. Mundici** 1995: Álgebras das lógicas de Lukasiewicz. CLE, Unicamp, Brasil.
- Fraïssé, R.** 1954: Sur quelques classifications des systèmes de relations. *Université d'Alger, Publications Scientifiques, Série A*, **1**, 35-182.
- Freyd, P.** 1972: Aspects of Topoi. *Bull. Austral. Math. Soc.* **7**:

1-76.

- Freyd, P. & A. Scedrov** 1990: *Categories, Allegories*. North Holland, Amsterdam.
- Godement, R.** 1958: *Topologie Algébrique et Théorie des Faisceaux*. Hermann, Paris.
- Goldblatt, R.** 1984: *Topoi, the Categorical Analysis of Logic*. North Holland, Amsterdam.
- Goldblatt, R.** 1987: Grothendieck topologies as geometric modalities. *Zeitschr. f. math. Logik und Grundl. d. Math.*, **d. 27**: 495-529.
- Heyting, A.** 1930: Die formalen Regeln der intuitionistischen Logik. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, Physikalisch-mathematische Klasse*, 42-56.
- Johnstone, P. T.** 1977: *Topos Theory*. Academic Press, New York.
- Johnstone, P. T.** 1982: *Stone Spaces*. Cambridge University Press.
- Kripke, S.** 1965: *Semantical Analysis of Intuitionistic Logic I. Formal systems and recursive functions*, (Crossley and Dummett, eds.). North Holland, Amsterdam.
- Lukasiewicz, J.** 1920: O logice Trójwartościowej. *Ruch Filozoficzny* **6**: 170-171.
- Makkai, M. & G. E. Reyes** 1977: *First order categorical Logic*. *Lecture Notes in Math.* **611**, Springer Verlag.
- MacLane, S.** 1971: *Categories for the Working Mathematician*. Springer Verlag.
- MacLane, S. & I. Moerdijk** 1992: *Sheaves in Geometry and Logic*, Springer Verlag.
- Monteiro, L.** 1964: Sur les Algèbres de Heyting trivalentes. *Notas de Lógica Matemática No. 19*, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Monteiro, L.** 1970: Les algèbres de Heyting et the Lukasiewicz trivalentes. *Notre Dame Journal of Formal Logic*, **XI**, **4**: 453-466.
- Reyes, G. E.** 1974: From sheaves to logic. *MAA Studies in Algebraic Logic*.
- Sette, A. M. & X. Caicedo** 1993: Equivalencia elemental entre feixes. *Proceedings of the IX Latin American Symposium on Mathematical Logic*, *Notas de Lógica Matemática*, **38**: 129-141.
- Stone, M. H.** 1937. Topological representation of distributive lattices and Brouwerian logics. *Cas. Mat. Phys.* **67**: 1-25
- Tennison, B. R.** 1975: *Sheaf Theory*. London Math. Soc. Lect. Notes **20**. Cambridge University Press.
- van Dalen, D.** 1983: *Logic and Structure*. Springer Verlag.

DISEÑO, CONSTRUCCION Y CALIBRACION DE UN DENSIMETRO DE FLOTACION MAGNETICA

por

Carmen María Romero I.¹, Ricardo Enrique Munar L.

Resumen

Romero, C. M. & R.E. Munar: Diseño, construcción y calibración de un densímetro de flotación magnética. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21** (81): 535-540. 1997. ISSN: 0370-3908.

Se describe un densímetro de flotación magnética que puede ser usado para medir la densidad de soluciones acuosas diluidas en un rango de $\pm 2 \times 10^{-6}$ g/cm³. El equipo desarrollado incluye modificaciones a diseños anteriormente propuestos y se caracteriza por su sensibilidad y facilidad de manipulación.

Palabras claves: densímetro, flotación magnética, densidad.

Abstract

A magnetic float densimeter that can be used to measure the density of dilute aqueous solutions in a range of $\pm 2 \times 10^{-6}$ g/cm³ is described. The developed equipment includes modifications to previous proposed designs and its main features are its precision and easiness of operation.

Key words: Densimeter, Magnetic float, density.

Introducción

La técnica empleada en el presente trabajo, se apoya en el fenómeno que tiene lugar cuando se coloca un objeto en el seno de un líquido el cual ejerce una fuerza o empuje hacia arriba que se contrapone al descenso del objeto. Si se conserva constante la temperatura del líquido así como el peso y volumen del objeto o flotador a sumergir, el empuje ejercido dependerá de la densidad

del líquido en cuestión. De acuerdo con lo anterior, se puede establecer una relación entre la densidad de la solución y la fuerza ejercida por ésta sobre el objeto o flotador (Franks, & Smith, 1967; Pinzón, & Blanco, 1983; Weissberger, 1972).

Una manera de evaluar el empuje ejercido sobre el flotador, es midiendo la fuerza necesaria para contrarrestar ese efecto y en consecuencia, lograr mantener el flotador en una posición fija.

Lamb & Lee, (1913) introducen el uso de la fuerza generada por un campo magnético al actuar sobre un

¹ Laboratorio de Investigaciones Básicas. Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

núcleo de hierro colocado en el interior de un flotador, para contrarrestar parcialmente el efecto de flotación. Ellos dividen las contribuciones al peso del flotador en una componente fija, su propio peso, y una variable resultante de pequeños pesos de platino que se colocan en el tope del flotador. Son estos últimos los que se equilibran con la fuerza generada por el campo magnético. De esta manera estos autores logran una sensibilidad de 0.04761 miligramos por miliamperio, midiendo corrientes del orden de 0.5 mA. Un análisis cuidadoso los lleva a asegurar que, para su instrumento y sus condiciones de trabajo, la incertidumbre total en la densidad no debería exceder una unidad en el séptimo lugar decimal. Van un poco más allá cuando afirman que al ajustar la densidad del flotador mas cerca de la densidad que se desea medir, con pesos de platino más pequeños y corrientes menores, la incertidumbre podría reducirse a una décima parte del valor obtenido por ellos.

Desde esa época se han hecho múltiples usos y variaciones de la técnica original (ver por ejemplo **Hall & Jones**, 1936; **Richards**, 1942; **Masterton et al**, 1968 y **Burns et al** 1974). Muy importante es el equipo desarrollado por **Millero** (1967) pues se trata de un densímetro más versátil que la mayoría de los que se usaban hasta el momento y constituye una magnífica aplicación del método original de **Lamb & Lee**. En él la sensibilidad se determina usando pesos de platino y midiendo la corriente necesaria para lograr el empuje de equilibrio. Los autores logran una desviación promedio de ± 3 mA en la corriente medida, lo que corresponde a $\pm 0.3 \times 10^{-6}$ g/ml en la densidad. Adicionalmente, **Franks & Smith** (1967) hacen un análisis interesante de la propagación de incertidumbres en el método de flotación y analizan la sensibilidad del mismo.

En este trabajo se hizo una variación al método general. Se utilizaron flotadores de densidad muy cercana a la de las soluciones que se midieron. Esto hace que el rango para cada flotador sea más reducido que el que obtuvo **Millero** (1967), pero se simplifica el montaje y se aumenta la sensibilidad del método. La modificación descrita permite determinar seis cifras decimales para la densidad, utilizando flotadores calibrados adecuadamente y el campo magnético producido por un voltaje que necesita ser leído a la milésima de voltio. Determinaciones hechas en el Laboratorio demostraron que en el rango de densidades estudiado, una variación de 1×10^{-3} voltios corresponde a una variación de 1×10^{-6} g/cm³ en la densidad. La sensibilidad del método fue comprobada efectuando lecturas con un multímetro Hewlett Packard Modelo 34401A que permite leer el voltaje con una sensibilidad de 1×10^{-6} voltios en el rango de interés.

Los cálculos de nuestro trabajo fueron simplificados ajustando la componente que llaman **Lamb & Lee** (1913) "pesada electromagnética", a una sola ecuación de densidad en función del voltaje medido en los extremos de una resistencia fija, siguiendo el método de **Millero** (1967). Si a esta función se suma la densidad del flotador se obtiene la densidad del líquido problema. La ecuación tiene la forma :

$$d = aV + b \quad (1)$$

En ella a es una constante característica del equipo b representa la densidad del flotador y V es el voltaje.

La calibración se hizo manteniendo fija la densidad del flotador y variando la densidad de la solución.

Descripción del equipo

El densímetro de flotación magnética construido consta de las siguientes partes:

1. Celda
2. Flotador
3. Bobina
4. Circuito eléctrico y sistema de lectura
5. Control de temperatura

1. Celda

El diseño de la celda se realizó tomando como referencia la información disponible en la literatura, adoptando de cada uno de los modelos encontrados la geometría y las dimensiones mas apropiadas de acuerdo con las características de los equipos y materiales disponibles y con el rango de densidad a estudiar. De estos modelos de celda, el que mas se acerca al empleado en el presente trabajo es el propuesto por **Franks & Smith** (1967), al que se omitieron algunas de sus partes y se redujo el volumen. El diseño final se ilustra en la figura 1.

La celda se construyó con vidrio Pyrex tal como la celda diseñada por **Franks y Smith**, pero a diferencia de esta, tiene un menor volumen (120 cm³), lo cual representa una ventaja debido a que se reducen los costos por empleo de reactivos, sin sacrificar en gran medida la precisión de los resultados. Además de lo anterior, el diseño plano del fondo de la celda permite observar con mayor claridad la posición del extremo inferior del flotador dentro de la solución en el momento de realizar una medida.

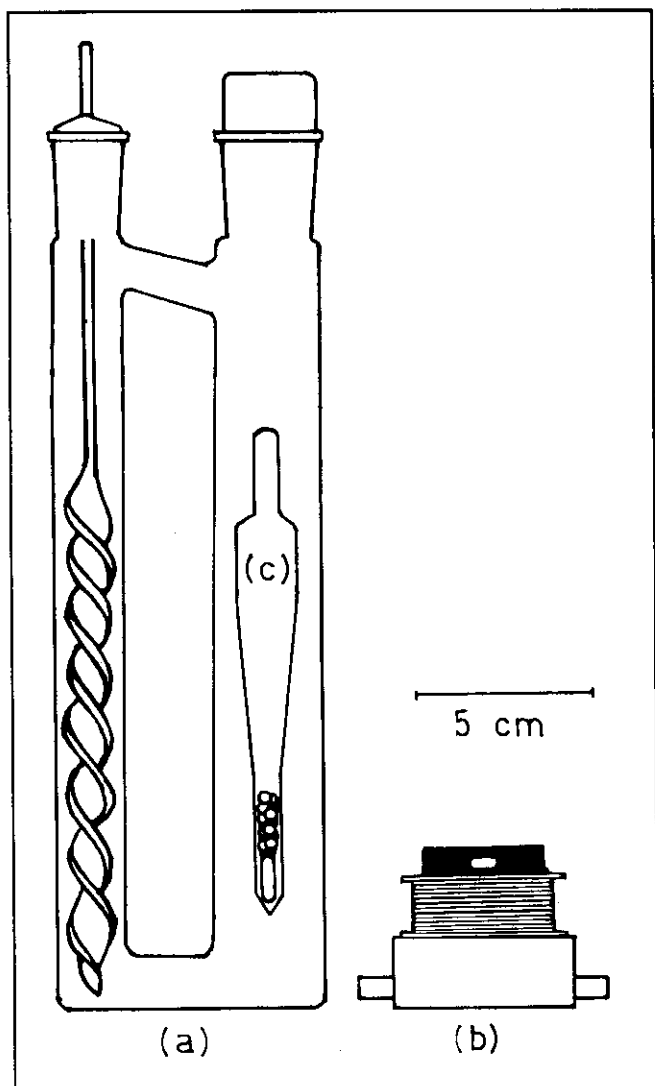


Figura 1. Celda de flotación
(a) Celda de vidrio, (b) Bobina, (c) Flotador

Con relación a las demás características que se muestran en la figura 1, se procuró conservar el modelo original, aunque algunas de las partes se utilizaron con un propósito diferente. Lo anterior explica la presencia del agitador dispuesto en el tubo que se deriva de la celda, cuya función es facilitar la remoción de las burbujas de aire que se pudieran formar, las cuales afectan el resultado final. Este agitador estaba destinado a homogenizar la solución, en caso de hacer diluciones, sin necesidad de retirar la muestra de la celda.

La figura 1 es esquemática y se omiten por claridad los soportes, pinzas y demás previsiones tomadas para

asegurar que el nivel y la posición de la celda sean totalmente reproducibles.

2. Flotador

La construcción del flotador se realizó teniendo en cuenta las características de diseño reportadas por **Cartan & Anacker** (1960), y aunque no se adoptó exactamente este modelo, fue de gran utilidad por ser muy simple y de fácil construcción.

El material empleado para construir el flotador fue vidrio Pyrex y las dimensiones finalmente establecidas, teniendo en cuenta la capacidad de la celda, se indican en la figura 1. En la parte inferior del flotador se colocó un imán, el cual es la pieza fundamental para poder realizar las posteriores determinaciones. Sobre este imán, se dispusieron pequeñas esferas de plomo, cuya cantidad fue la necesaria para ajustar el peso del flotador de manera que este no se hundiera completamente hasta el fondo de la celda.

3. Bobina

En la construcción de la bobina se emplearon los materiales recomendados en la literatura (**Richards**, 1942; **Masterton et al**, 1968 **Millero** 1967 y **Burns et al** 1974). Básicamente consta de un núcleo de polietileno y alambre de cobre esmaltado número 21 y el diseño final se ajustó de acuerdo con las especificaciones de la celda, tal como se ilustra en la figura 1. Experimentalmente se encontró que el número de espiras adecuado es de 124, para el magneto y los sistemas utilizados.

Debido a que la técnica exige que la bobina y la celda se conserven en una posición definida y reproducible, se dispuso una base en la bobina la cual evita que esta se desplace. Por otra parte, para inmovilizar la celda, se dispuso sobre el carrete, también de manera permanente, una pieza de caucho provista de una pequeña ventana que permite observar el despegue del flotador del fondo de la celda, en el momento de realizar una determinación.

4. Circuito eléctrico y sistema de lectura

El diagrama del circuito eléctrico se ilustra en la figura 2. Para su construcción se empleó una resistencia constante de 20 ohm y dos resistencias variables conectadas en paralelo. La primera de ellas (R_1), es una caja de resistencias marca LEEDS & NORTHRUP CO. de 10.000 ohm de capacidad, la cual permite como variación mínima 1 ohm; con esta resistencia se realiza el ajuste grueso de voltaje que se debe suministrar a la bobina. La segunda resistencia (R_2), presenta un ajuste grueso que

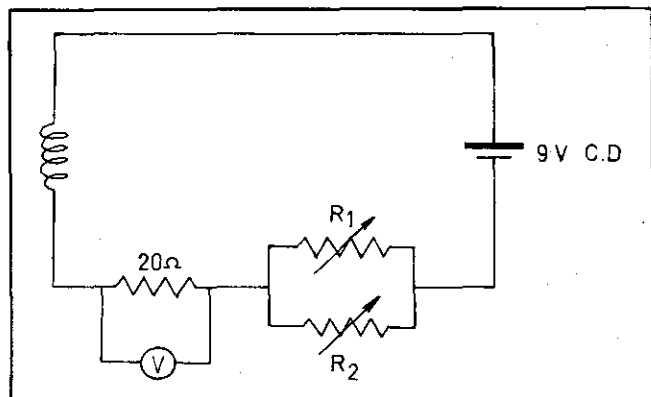


Figura 2. Circuito eléctrico

permite variaciones de 50 ohm y un ajuste fino continuo que cubre un rango de 50 ohm con el cual, se logran modificaciones de voltaje de 1 mV.

La fuente regulada de poder es de 9V C.D. y 500 mA y fue diseñada de manera que no presente variaciones de voltaje superiores a 1 mV.

Para realizar la lectura del potencial de equilibrio, se utilizó un multímetro digital marca HUNG CHANG, cuya precisión en las lecturas de voltaje es de $\pm 0,001$ V en la escala utilizada.

El diseño final del densímetro de flotación magnética se ilustra en la figura 3.

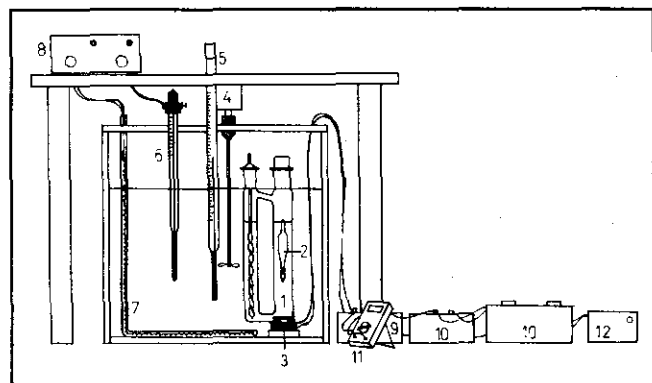


Figura 3. Densímetro de flotación magnética. 1. Celda, 2. Flotador, 3. Bobina, 4. Agitador, 5. Termómetro Beckmann, 6. Termómetro de contacto, 7. Resistencia de calentamiento, 8. Control de temperatura, 9. Resistencia constante de 20Ω , 10. Resistencia variable, 11. Multímetro, 12. Fuente de poder

5. Control de temperatura

El control de temperatura se realizó, colocando la celda en un baño de agua termostataado a $25,000 \pm 0,002^\circ\text{C}$. Para alcanzar estas condiciones, se dispuso de una resistencia, un termómetro de contacto y un regulador de temperatura fabricado en el CEIF-UN. La temperatura se registró con un termómetro calibrado en grados Fahrenheit y certificado por el NITS y por el Centro de Control de Calidad y Meteorología de la Superintendencia de Industria y Comercio. Las oscilaciones de temperatura se verificaron con un termómetro diferencial Beckmann de 1°C que permite observar cambios de $\pm 0,002^\circ\text{C}$.

Para aislar el equipo de las fluctuaciones externas de temperatura y lograr un mejor control, se recubrieron las paredes de la cubeta con icopor. Además se instaló un agitador que permite lograr uniformidad en la temperatura del termostato. Se logro obtener así una temperatura constante con una máxima fluctuación de 0.002°C .

AJUSTE Y CALIBRACION DEL EQUIPO

Para realizar la calibración del equipo se empleó Cloruro de Potasio, Merck, reactivo analítico, el cual se secó a temperatura ambiente por un tiempo no inferior a 48 horas.

El agua empleada en la preparación de las soluciones de cloruro de potasio, fue sometida previamente al tratamiento descrito en la literatura **Riddick & Bunger** (1970), para poder obtener agua de densidad $0,997047 \text{ g/cm}^3$ a $25,000^\circ\text{C}$. Las constantes físicas utilizadas para caracterizar el agua así tratada dieron los siguientes resultados: índice de refracción a $25,00^\circ\text{C}$ 1,3325, temperatura de congelación $0,0^\circ\text{C}$ y conductividad inferior a $2 \mu\text{s}$.

La calibración del equipo de flotación magnética se hizo teniendo en cuenta que va a ser utilizado para la determinación de densidades de soluciones acuosas muy diluidas. La escogencia del sistema de calibración estuvo determinada por la disponibilidad de datos de densidad muy cercanos al valor correspondiente al agua, con una incertidumbre no mayor que $\pm 1,0 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$. Con estos criterios y con base en la información reportada en la literatura, se seleccionaron soluciones de Cloruro de Potasio y se escogieron datos que cubren un rango de concentración entre $0,34601 \text{ m}$ y $0,002001 \text{ m}$ y de densidad entre $1,01276$ y $0,997137 \text{ g/cm}^3$ (**MacInnes & Dayhoff** 1952, **Jones & Talley**, 1933).

Los valores de densidad y concentración de las soluciones de Cloruro de Potasio fueron ajustadas por el método de mínimos cuadrados a la siguiente ecuación:

$$d = Am + B \quad (2)$$

En ella m representa la molalidad de las soluciones de KCl y A y B son constantes empíricas.

Para efectuar la calibración se prepararon por pesada 18 soluciones de Cloruro de Potasio en un rango de concentración entre 0,10008 m y 0,00200 m. Su densidad se calculó a partir de la ecuación (2).

Con cada solución se siguió el procedimiento que se describe a continuación. La celda con la solución se coloca durante 20 minutos dentro del termostato cuya temperatura se ha ajustado previamente a $25,000 \pm 0,002^\circ\text{C}$ (ver figura 3). El peso del flotador se ajusta adicionándole un anillo de plata de peso conocido que permite que el flotador se sumerja en la solución sin que llegue hasta el fondo de la celda. Se aplica entonces el máximo potencial generado por la fuente, manteniendo las resistencias variables en cero; con esto se logra un campo suficientemente intenso para que el flotador sea atraído hasta el fondo de la celda. Una vez en esta posición, se aumenta poco a poco la resistencia R_1 para disminuir la intensidad del campo sin que el flotador cambie de posición. Este proceso se continúa, aumentando la resistencia R_2 la cual permite efectuar un ajuste mas fino y detectar claramente el momento en que el flotador sube. El voltaje correspondiente se lee en el multímetro. Siguiendo este procedimiento, se realizan diez determinaciones para conseguir un buen estimativo de la reproducibilidad de las medidas.

Posteriormente y para ampliar el rango de operación del equipo, se cambia el peso del flotador, reemplazando el anillo de plata por otro de peso conocido y ajustado de modo que los nuevos voltajes de equilibrio queden dentro de los límites de operación del equipo. Así se repite el procedimiento ya descrito.

El peso de los anillos de plata se midió periódicamente constatando que se mantuvo constante.

Con los valores de voltaje obtenidos para cada solución de KCl y las densidades obtenidas a partir de los datos de literatura, se construyeron las curvas de calibración correspondientes al flotador con cada uno de los anillos utilizados. Las gráficas obtenidas se presentan en la figura 4 y las ecuaciones de calibración son:

$$d_1 = 0,001121 V + 0,994632 \quad r = 0,999984 \quad (3)$$

$$d_2 = 0,001120 V + 0,996079 \quad r = 0,999994 \quad (4)$$

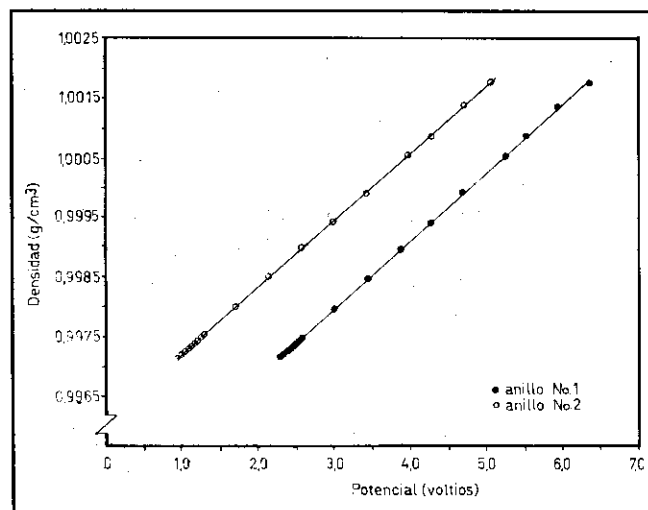


Figura 4. Curvas de calibración

En ellas d_1 y d_2 representan respectivamente la densidad calculada a partir del voltaje promedio obtenido cuando se usa el anillo No. 1 y el anillo No. 2; r es el coeficiente de correlación lineal.

Determinación de la densidad del agua

Para verificar la calibración del equipo se determinó la densidad del agua pura a $25,000 \pm 0,002^\circ\text{C}$. Siguiendo el procedimiento indicado, se obtuvieron los siguientes resultados de voltaje de equilibrio con cada uno de los dos anillos y las respectivas densidades calculadas para el agua.

Tabla 1.

ANILLO 1		ANILLO 2	
V_1 (voltios)	d (g/cm^3)	V_2 (voltios)	d (g/cm^3)
2.153	0.997046	0.864	0.997047
2.153	0.997046	0.864	0.997047
2.154	0.997047	0.864	0.997047
2.153	0.997046	0.864	0.997047
2.153	0.997046	0.864	0.997047
2.154	0.997047	0.863	0.997046
2.154	0.799047	0.864	0.997047
2.155	0.997048	0.864	0.997047
2.154	0.997047	0.864	0.997047
2.154	0.997047	0.864	0.997047

En cada caso, la densidad fue calculada mediante la ecuación de calibración correspondiente (ver ecuaciones 3 y 4). Tomando el valor promedio se obtuvo un valor de $0,997047 \text{ g/cm}^3$ para la densidad del agua a $25,000 \pm 0,002^\circ\text{C}$ con una rango de $\pm 2 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$. El resultado obtenido coincide con los datos más confiables reportados en la literatura para la densidad del agua, $0,997047 \text{ g/cm}^3$ (Weissberger, 1972 y Riddick & Bunger 1970), obtenidos mediante distintas técnicas incluyendo la de flotación magnética.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con financiación parcial de CINDEC, COLCIENCIAS y del Banco de la República.

Bibliografía

- Franks, F. & Smith, T. H. 1967. Apparent Molal Volumes and Expansibilities of Electrolytes in Dilute Aqueous Solutions. *Trans. Faraday. Soc.* **63**: 2586.
- Pinzón, J. A. & Blanco, L. H. 1983. Construcción de un Densímetro Oparado Magnéticamente. *Rev. Col. Quim.* **12**: 31.
- Weissberger, A. Ed. 1972. *Techniques of Chemistry 1(4)*: Wiley-Interscience, New York. 57-124.

- Riddick, J. A. & Bunger, W. B. 1970. *Techniques of Chemistry 2*: Wiley-Interscience, New York. 66-69.
- Lamb, A. B. & Lee, R. E. 1913. The densities of certain dilute Aqueous Solutions by a New and Precise Method. *J. Am. Chem. Soc.* **35**: 1668.
- Richards, A. R. 1942. An Electromagnetic Densitometer. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* **14**: 595.
- Millero, F.J. 1967. High Precision Magnetic Float Densimeter. *The Review of Scientific Instruments.* **38**: 1441.
- Masterton, W.L. & Seiler, H.K. 1968. Apparent and Partial Molal Volumes of Water in Organic Solvents. *J. Phys. Chem.* **72**: 4257.
- Hall, N. F. & Jones, T. O. 1936. A redetermination of the Protium-Deuterium Ratio in Water. *J. Am. Chem. Soc.* **58**: 1915.
- Cartan, F.; Anacker, E. W. 1960. Density Measurements with a Magnetically Controlled Float. *J. Chem. Ed.* **37**: 36.
- Burns, J. A. & Verrall, R. E. 1974. Thermodynamics of Bolaform Electrolytes. *J. Sol. Chem.* **3**: 289.
- MacInnes, D. A. & Dayhoff, M. O. 1952. The partial Molal Volumes Of Potassium Chloride, Potassium and Sodium Iodides and Iodine in Aqueous Solutions at 25°C . *J. Am. Chem. Soc.* **74**: 1017.
- Jones, G. & Talley, S. 1933. The viscosities of Aqueous Solutions as a Function of the Concentration. *J. Am. Chem. Soc.* **55**: 624.

RANAS CENTROLENIDAE DE COLOMBIA X. Los centrolénidos de un perfil del flanco oriental de la Cordillera Central en el Departamento de Caldas

por

Pedro M. Ruiz-Carranza* & John D. Lynch*

Resumen

Ruiz-Carranza, P.M. & J.D. Lynch: Ranas Centrolenidae de Colombia X. Los centrolénidos de un perfil del flanco oriental de la Cordillera Central en el Departamento de Caldas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **21** (81): 541-553, 1997. ISSN 0370-3908.

Se reportan doce especies de ranas centrolénidas en un transecto sobre el flanco oriental de la Cordillera Central en el Departamento de Caldas entre los 620 y los 2650m. La fauna centrolénida del oriente de Caldas incluye cinco especies de *Centrolene* (*C. antioquiensis*, *C. buckleyi*, *C. geckoideum*, *C. prosoblepon*, *C. robledoii*), siete de *Cochranella* (*C. griffithsi*, *C. posadae*, *C. punctulata*, *C. savagei*, *C. susatamai*, dos del grupo *ocellata* que se describen como especies nuevas), una de *Hyalinobatrachium* (*H. colymbiphyllum*). Tradicionalmente cuatro de estas especies se han considerado como elementos chocoanos u occidentales. En el transecto estudiado, hay solamente una especie por debajo de los 1000m (*Cochranella punctulata*) mientras que entre los 1100 y 1700m hay seis y entre los 1700 y 2650m hay seis especies (una compartida por las dos unidades entre los 1100 y 2000m). Arriba de los 2800m está solamente *Centrolene buckleyi*. Se redescubre *Centrolene antioquiensis*.

Palabras claves: Amphibia, Anura, biogeografía, Centrolenidae, nuevas especies, taxonomía, Cordillera Central, Colombia.

Abstract

Twelve species of centrolenid frogs are reported along a transect over the eastern slope of the Cordillera Central in Departamento Caldas between 620 and 2650m. The centrolenid fauna in eastern Caldas includes five species of *Centrolene* (*C. antioquiensis*, *C. buckleyi*, *C. geckoideum*, *C. prosoblepon* and *C. robledoii*), seven of *Cochranella* (*C. griffithsi*, *C. posadae*, *C. punctulata*, *C. savagei*, *C. susatamai*, and two species of the *ocellata* group described as new species), and one *Hyalinobatrachium* (*H. colymbiphyllum*). Four of these species have

* Profesores Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Apartado 7495, Santafé de Bogotá D.C., Colombia.

traditionally been viewed as western or chochoan elements. In the transect, a single species occurs below 1000m (*C. punctulata*) whereas between 1100 and 1700m, one finds six species and between 1700 and 2650m one finds six species (one new species occurs in each of these units, between 1100 and 2000m). Above 2800m, one finds only *Centrolene buckleyi*. *Centrolene antioquiensis* is redescribed.

Key words. - Amphibia, Anura, biogeography, Centrolenidae, new species, taxonomy, Cordillera Central, Colombia.

Introducción

Cochran & Goin (1970) reportaron en su libro solamente ocho especies de centrolénidos, sin embargo dos de ellas (*Centrolenella buckleyi* y *C. johnelsi*) posteriormente son consideradas sinónimas por Ruiz-C. & Lynch, 1991a. Actualmente más de 60 especies se conocen del país (Ruiz-C. *et al.*, 1996). Estas cifras revelan que anterior a nuestros trabajos, la fauna de los bosques nublados era poco conocida (Lynch *et al.*, 1997).

Trabajo de campo en las laderas orientales de la Cordillera Central en el Departamento de Caldas entre los años 1992 y 1994 reveló la presencia de 12 especies de centrolénidos (cuatro del género *Centrolene*, siete del género *Cochranella* y una del género *Hyalinobatrachium*) de un transecto entre los 620 y los 2650m.s.n.m. en los municipios de Pensilvania y Samaná; en éstas hay dos especies del género *Cochranella* sin describir y una del género *Centrolene* que es poco conocida. Dado que el trabajo de campo sólo cubrió hasta los 2650m los colectores no encontraron *Centrolene buckleyi*, especie que vive en los páramos y subpáramos de los Andes norteños, pero que muy seguramente se debe encontrar en esta parte del departamento de Caldas.

La mayoría de los bosques nativos de la zona cafetera han sido destruidos desde principios de este siglo dificultando la descripción de patrones de distribución de las especies de ranas porque muchas de ellas no pueden sobrevivir en un medio tan transformado como los cafetales. En la zona del transecto estudiado, los bosques existen principalmente sobre las cuchillas y como bosques de galerías.

Centrolene antioquiensis (Noble) (Fig. 1)

Centrolenella antioquiensis Noble, 1920:317 (holotipo AMNH 1354, hembra adulta).

Centrolene antioquiensis: Ruiz-C. & Lynch, 1991a:19.

Diagnosis.- Una especie del género *Centrolene* grupo *peristictum* caracterizada por la siguiente combina-

ción de caracteres: 1) procesos dentígeros y dientes vomerinos ausentes; 2) huesos verde en vida; 3) peritoneo parietal (1/2 anterior) amarillento, estómago y colon blancos, resto del peritoneo visceral translúcido; 4) color dorsal en vida verde amarillento con flecos blancos dispersos, en etanol 70% el dorso con flecos blancos y motas lavanda oliva, línea labial blanca que se continúa en una serie de flecos blancos sobre el 1/2 anterior de los flancos a lo largo del borde externo de tarso y pie; 5) fórmula modal de la palmadura manual: II 3⁺ - 4^{1/4} III 3⁺ - 2 IV; 6) fórmula modal de la palmeadura pedial: I 2 - 2^{2/3} II 1 - 3⁺ III 2 - 3⁺ IV 3⁺ - 1 V; 7) rostro redondeado en vista dorsal, inclinado en vista lateral; 8) piel dorsal con gránulos bajos; 9) pliegue ulnar presente, borde externo del tarso y pie con una serie de tubérculos; 10) espina humeral de los machos pequeña, curvada; 11) tímpano grande, visible completamente, dirigido lateralmente; 12) adultos de tamaño pequeño (machos con LRC 20.5mm-22.5mm); 13) excrecencias nupciales tipo I (*sensu* Flores, 1985).

Centrolene antioquiensis ha sido una rana rara, más íntimamente relacionada con *C. peristictum* del sudoeste de Colombia y Ecuador (Ruiz-C. & Lynch, 1995a). Estos son los únicos dos centrolénidos que tienen espina humeral pequeña, curva, terminada en lámina de punta aguda, más o menos paralela al eje del húmero. En vida las dos difieren por tener *C. antioquiensis* mayor cantidad de flecos blancos en el dorso y una línea blanca en el 1/2 anterior de los flancos y bordeando completamente el labio superior. Estructuralmente las dos son casi idénticas pero *C. peristictum* tiene la región internarial deprimida (no así *C. antioquiensis*) y tubérculos subarticulares distales bifidos en dedos manuales III y IV (sencillos, bifidos sólo en ICN 37503 de *C. antioquiensis*).

Descripción.- Adultos de tamaño pequeño, longitud rostro-cloacal 20.9-22.0mm (\bar{x} = 21.6mm, S = 0.39, N = 7) en los machos; cabeza ligeramente más ancha que el cuerpo, más ancha que larga, anchura cefálica equivalente al 34.1-37.4% (\bar{x} = 35.7%, S = 1.13, N = 7) de la longitud rostro-cloacal, rostro muy corto, redondeado en vista dorsal algo redondeado e inclinado antroventral en aspecto lateral (Fig.1); distancia ojo-narina equivalente

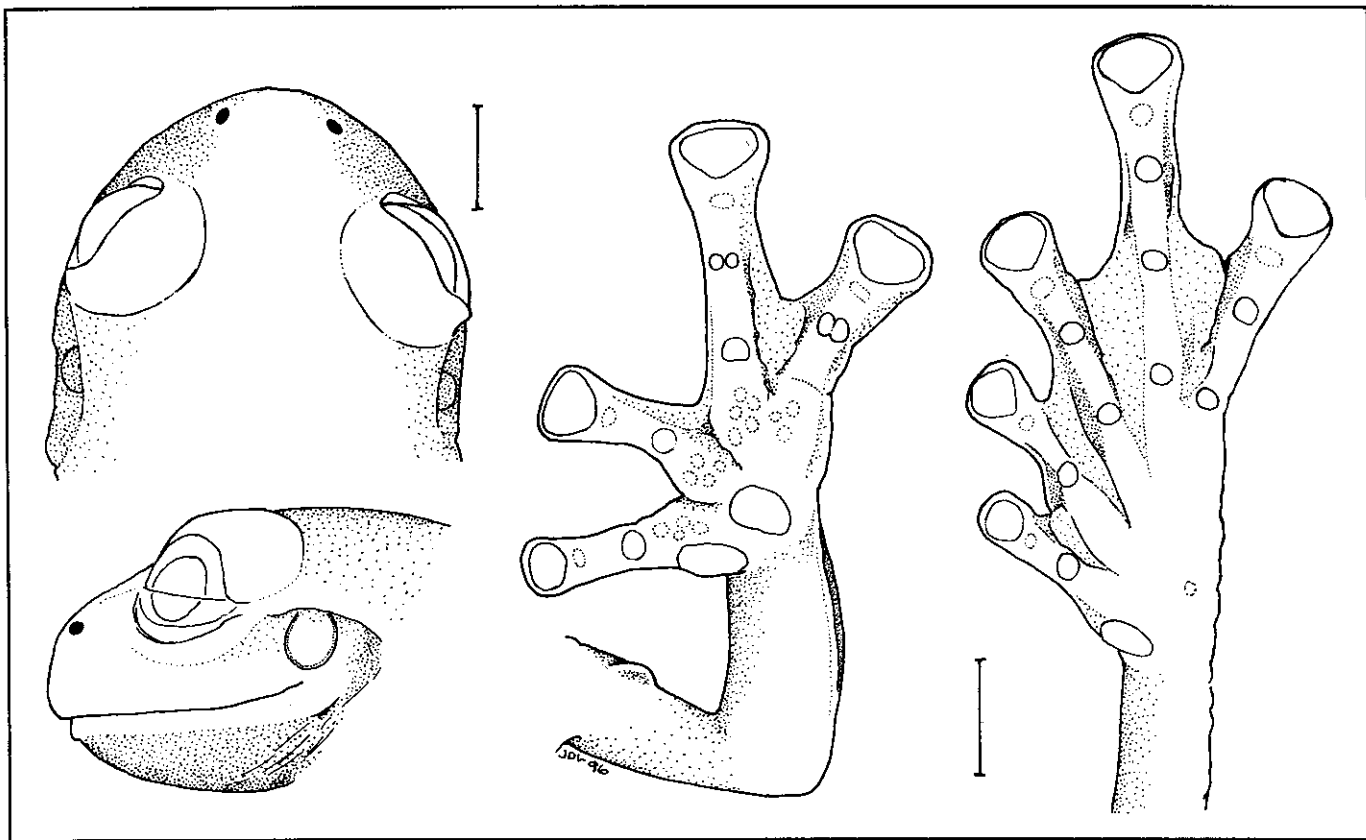


Figura 1. *Centrolene antioquiensis*. Cabeza, mano y pie (ICN 37503). Escala = 2mm.

al 64.0-86.9% (\bar{x} = 35.7%, S = 8.32, N = 7) del diámetro anteroposterior del ojo; región loreal ligeramente cóncava y algo recta, labio superior bien demarcado, sobresaliente; narinas muy levemente prominentes, con dirección más lateral que superior sin depresión entre las mismas; *canthi rostrales* redondeados, casi indefinidos, algo cóncavos, oblicuos; ojos de moderado tamaño, prominentes dirigidos bastante más anterior que lateralmente, sobrepasan el borde externo del labio superior cuando la cabeza se observa en vista ventral, diámetro antero posterior de la órbita equivalente al 31.1-37.7% (\bar{x} = 73.5%, S = 2.40, N = 7) de la longitud cefálica; anchura del párpado superior equivalente al 43.3-64.3% (\bar{x} = 56.3%, S = 7.44, N = 7) de la distancia interorbital, tímpano grande dirigido lateralmente, su diámetro equivale al 45.8-54.5% (\bar{x} = 48.9%, S = 2.88, N = 7) del diámetro ocular, pliegue supratimpánico grueso, poco definido, se localiza entre el extremo posterior de la órbita y el nivel de la inserción del brazo; aberturas nasales internas pequeñas, redondeadas; odontóforos y dientes vomerinos ausentes; lengua con escotadura amplia pero muy poco profunda

en el borde posterior, márgenes posterior y laterales libres, no adherentes al piso de la boca; hendiduras vocales dirigidas de la base medial lateral de la lengua a los ángulos mandibulares, saco vocal medial externo.

Espina humeral presente sólo en los machos, apreciable externamente sin hacer saliente por perforación de la piel, de tamaño pequeño, curva, terminada en lámina de punta aguda, paralela al eje mayor del húmero (ver figura 3 en Ruiz-C. & Lynch, 1991b); antebrazo de los machos robusto con muy ligero pliegue dérmico en el borde externo; aún cuando están adpresos los dedos manuales el I es ligeramente más largo que el II; dedos relativamente anchos con discos truncados en su borde distal siendo su diámetro transversal mayor, más ancho que los artejos distales correspondientes; diámetro transversal del disco del dedo III manual equivalente al 53.8-72.7% (\bar{x} = 62.1%, S = 5.91, N = 7) del diámetro anteroposterior de la órbita; sin palmeaduras entre los dedos manuales I y II, fórmula de la palmeadura manual (*sensu* Savage & Heyer, 1967): II (3 - 3*) - 4¼ III (3 - 3*) - (2 - 3) IV (Fig. 1); tubérculos

subarticulares de los dedos manuales grandes, redondos, prominentes (sólo en ICN 37503 se presentan tubérculos distales bifidos); tubérculos supernumerarios palmares granulares de tamaño mediano; tubérculo palmar ovalado, algo más largo que ancho, algo más corto que el tenar, el cual es alargado; excrescencias nupciales tipo I.

Extremidades posteriores algo robustas, longitud tibial equivalente al 55.2-59.6% (\bar{x} = 57.9%, S= 1.64, N= 7) de la longitud rostro-cloacal; cuando el miembro posterior se halla adpreso hacia adelante, el talón sobrepasa en algo el extremo rostral; cuando los miembros posteriores se hallan flexados hacia adelante y los anteriores hacia atrás, las rodillas casi se tocan con los codos, y cuando los muslos se hallan perpendiculares al plano sagital del cuerpo y con las piernas flexadas hacia atrás, los talones se sobreponen en corta distancia; borde tarsal externo con una serie de tubérculos, tubérculo metatarsal interno 2 veces más largo que ancho, tubérculo metatarsal externo no diferenciable del resto de los tubérculos plantares los cuales son granulares, pequeños, redondos, situados a nivel de los metatarsales; discos pediales algo más pequeños que los manuales, ligeramente más anchos que los artejos distales correspondientes; fórmula de la palmeadura pedial: I (1 - 2) - (22/3 - 3*) II (1 - 2) - (3* - 31/3) III (1 - 2) - 3* IV 3* - (1 - 2*) V (Fig. 1).

Piel dorsal con gránulos bajos; machos con pequeñas espículas de cantidad moderada, agudas en la superficie anterior del brazo y del antebrazo, en menor cantidad en la región infratimpánica, en la parte posterior y alrededor del labio superior (ausentes en hembras); diminutas espículas (microscópicas) pueden también estar presentes en los flancos; vientre y superficies ventrales de los muslos uniformemente granulares, garganta granular; orificio cloacal no levantado, horizontal, dirigido posteriormente, situado a nivel superior de los muslos, un par de tubérculos infracloacales de mayor tamaño sobresalen en la región glandular pericloacal.

Coloración *in vivo*.- Dorsalmente verde amarillento a verde oscuro con puntos amarillentos y blanquecinos dispersos, borde externo ulnar y tarsal, región glandular pericloacal blancos; labio superior blanco; iris crema con retículo fino negro; peritoneo parietal blanco; huesos verdes.

Coloración en etanol 70%- Superficies dorsales de color lavanda con puntos blancos, dedos manuales y pediales I y II crema, párpados superiores lavanda oscuro, las marcas blancas en vida se conservan, labio superior y gránulos de los flancos blancos.

Distribución. *Centrolene antioquiensis* es una de las especies más raras en Colombia. En el Departamento de Antioquia, se conoce de la localidad típica y del municipio de Yarumal. Actualmente está entre 1850 y 2450m sobre los flancos norteños y orientales de la Cordillera Central en los departamentos de Antioquia, Caldas y Tolima. No creemos que la especie esté en peligro de extinción sino que ocupa un microhábitat localizado más arriba de la zona de búsqueda de los colectores. En los sitios donde hemos encontrado *C. antioquiensis*, hemos oído un centrolénido (supuestamente éste) cantando muy alto en los árboles. También la especie hermana (*C. peristictum*) parece ser una especie más común en los árboles que están cerca del piso (experiencia de JDL en el norte del Ecuador donde encontró *C. peristictum* más común en árboles a 4-5 metros sobre el piso). Otra explicación de su escasez pudiera ser la pérdida o fragmentación del hábitat, especialmente en Antioquia, donde los bosques andinos fueron víctimas del hacha paísa.

Centrolene buckleyi (Boulenger)

Esta especie tiene la distribución más amplia conocida para los centrolénidos en América del Sur. Se encuentra en los Andes desde Venezuela hasta el sur del Ecuador. Aunque no hay colecciones de *C. buckleyi*, se incluye en el transecto referido anteriormente porque tenemos registros del norte (Antioquia, municipio Sonsón, páramo de Sonsón y alrededores, 2420-2800m) y del sur ("Caldas, Páramo de Herveo", 3050m) sobre el flanco oriental de la Cordillera Central. No sería frecuente que la especie baje hasta menos de los 2600m.

Centrolene geckoideum Jiménez de la Espada

Se encuentra esta especie en las tres cordilleras de Colombia (Lynch *et. al.*, 1983; Rueda-A., 1994), casi siempre hacia los 2000m, pero su distribución no es tan amplia como la de *C. buckleyi*. V. Rueda encontró tres ejemplares a 2450m el 9 nov. de 1994, describió el hábitat como "bosque andino parcheado, conservado parcialmente en los filos y orillas de cañadas, continuamente nubladas, árboles ca 20m altura con abundante musgo y epífitas sobre los troncos." Este registro, con datos confiables, es el más alto que hemos encontrado para la especie, pero nosotros la hemos encontrado incluso a 1750m en el Departamento de Valle del Cauca.

Centrolene prosoblepon (Boettger)

Aunque usualmente es considerada como una especie chocona, Ruiz-C. & Lynch (1995b) reportaron esta especie sobre el flanco oriental de la Cordillera Central en

los departamentos de Antioquia, Caldas, y Tolima, entre 730 y 1470m. Los cuatro registros de Caldas la sitúan entre 1100 y 1610m. También, tenemos registros nuevos de Antioquia (municipios Argelia y San Luis) entre los 970 y los 1800m.

Centrolene robledo Ruiz-C. & Lynch

Ruiz-C. & Lynch (1995a) registraron esta especie del norte de la Cordillera Central en el Depto. de Antioquia y del flanco occidental en el Depto. de Risaralda entre 2300 y 2520m. En Caldas, sobre el flanco oriental, los registros se encuentran entre los 2000 y los 2650m. Hemos examinado materiales del sur de Antioquia (municipio Sonsón, alrededores del páramo de Sonsón entre los 2700 y los 2800m), también del flanco oriental de la Cordillera Central.

Cochranella griffithsi (Goin)

Esta especie tiene una distribución muy amplia sobre el flanco occidental de la Cordillera Occidental de Colombia y las laderas occidentales de los Andes del Ecuador (**Duellman & Burrowes**, 1989, **Lynch & Duellman**, 1973; **Ruiz-C. et al.**, 1996). Información disponible indica que *C. griffithsi* es una de las especies más comunes a lo largo de la Cordillera Occidental (con *Cochranella ignota*). Su presencia en la Cordillera Central no había sido publicada (hasta el momento) pero hemos estudiado materiales de ambos flancos de esta cordillera en Caldas. Hemos encontrado la especie entre los 2000 y los 2650m. ampliando así los registros altitudinales de la Cordillera Central. Esta especie parece estar distribuida parapátricamente con respecto a *Cochranella garciae* (la cual es muy parecida cuando se examinan ejemplares que no estén en la época de reproducción).

Cochranella posadae Ruiz-C. & Lynch

Los registros más al norte y de nivel altitudinal más bajo para la especie, en Caldas, son del sitio San Lucas a los 1100m. El ejemplar registrado por **Ruiz-C. & Lynch** (1995a) carecía de datos completos.

Cochranella punctulata Ruiz-C. & Lynch

Esta especie está en la parte más baja del transecto. Se distribuye en la parte baja oriental de la Cordillera Central, en los departamentos de Antioquia, Caldas, y Tolima, entre los 620 y los 930m (**Ruiz-C. & Lynch**, 1995a). Registros nuevos de Antioquia (municipio de San Luis, corregimiento el Prodigio) la sitúan a menor altura, de 360 a 470m.

Cochranella rosada sp. nov. Fig. 2

Holotipo.- Macho adulto depositado en la colección batracológica del Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, número ICN 34761 (número de campo PR 15553), uno de una serie coleccionada en marzo 17 de 1994 por Ruth Estupiñán, Jeannette Nieto, Vicente Rueda, Pedro M. Ruiz y Claudia Vélez.

Localidad típica. COLOMBIA, Departamento de Caldas, municipio de Samaná, Km. 5.8 y vecindario hacia Samaná de la carretera Samaná a La Cristalina, 1430-1500m.

Paratopótipos.- Machos ICN 34764-65, hembras ICN 34762-63, 34766.

Parátipos.- Ejemplares adultos: Departamento de Caldas, municipio de Samaná, abajo del Km. 1.6 de la carretera Samaná a vereda California Alta, 1650m, machos ICN 34769-75, mismos colectores, 21 marzo de 1994; Km. 1.6-3.0 carretera Samaná a vereda California Alta, machos ICN 34776-77, mismos colectores, 22 marzo de 1994; Km. 1.7 carretera de "El Codo" (Samaná) a Florencia, 1375m, macho ICN 34778, col. V. Rueda, 24 marzo de 1994; corregimiento de Florencia, sitio "El Estadero", 1850m, machos ICN 35217-19, cols. V. Rueda et al., 10 junio de 1994.

Material referido. Caldas, Samaná, Km. 1.6-3.0 carretera Samaná a vereda California Alta, 1650m (ICN 34767-68); Samaná, corregimiento Florencia, vereda San Lucas, 1100m (ICN 30091); Pensilvania, Km 18 carretera Pensilvania-Arboleda, trocha hacia Arboleda, 2000-2450m (ICN 36524-25).

Etimología. El nombre específico (español, en aposición) alude al color rosado que tienen los animales de la especie en vida.

Diagnosis.- Una especie del género *Cochranella* grupo *ocellata* caracterizada por la siguiente combinación de caracteres: **1)** procesos dentígeros y dientes vomerinos ausentes; **2)** huesos blancos en vida; **3)** peritoneo parietal 1/2 anterior blanco, peritoneo visceral translúcido; **4)** color dorsal en vida café pálido con tinte rosado y puntos naranja; en etanol 70% lavanda a lila oscuro en cabeza y tronco, manos y pies crema; **5)** fórmula modal de la palmadura manual: III 3²/₃ - 3¹/₃ IV; **6)** fórmula modal de la palmeadura pedial: I 2½ - 3+ II 2 - 3+ III 2 - 3+ IV 3½ - 2+ V; **7)** rostro subtruncado en vistas dorsal y lateral; **8)** piel dorsal finamente granular con pequeñas pústulas diseminadas en el dorso (pústulas en puntos páli-

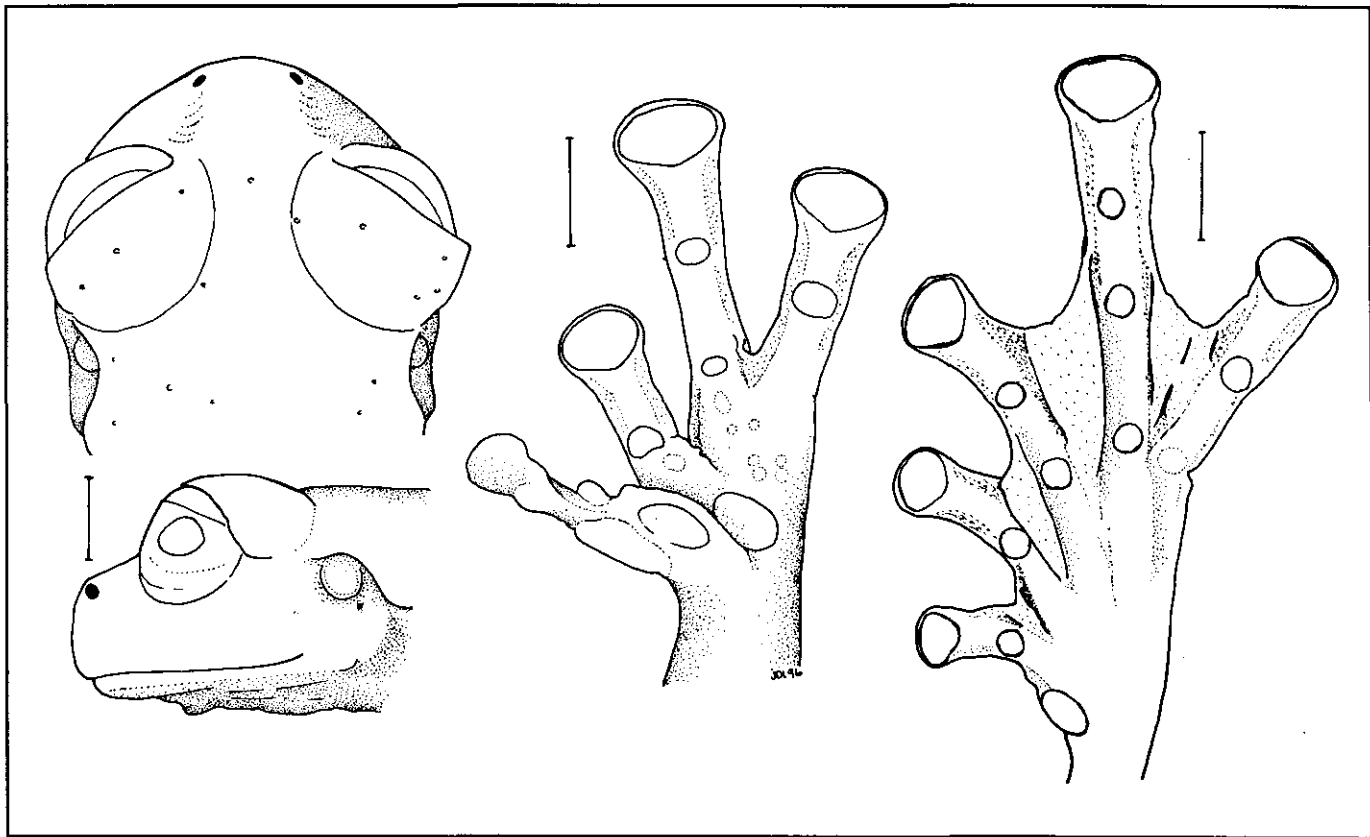


Figura 2. *Cochranella rosada* sp. nov. Cabeza (ICN 34776), mano y pie (ICN 34775). Escala = 2mm.

dos); 9) pliegues ulnares y tarsales ausentes; 10) espina humeral ausente; 11) tímpano pequeño, visible en sus 3/4 inferiores, con inclinación dorsolateral; 12) adultos de tamaño moderado (25.4-27.5mm en 3 hembras, 24.9-28.3mm en 15 machos); 13) excrescencias nupciales tipo I.

Cochranella rosada superficialmente se semeja a *C.anomala* y *C.ignota* porque las tres no son verde en vida y tienen los huesos blancos (no verde oscuro), sin embargo *C.anomala* y *C.ignota* tienen ocelos distinguibles en el dorso. Los puntos pálidos en el dorso de *C.rosada* contienen un pequeño tubérculo y pueden representar un ocelo vestigial pero no concentración de pigmento oscuro rodeando el punto pálido. Por el momento consideramos a *C.rosada* más estrechamente relacionada con las especies oceladas mencionadas por Lynch (1990) *C.anomala*, *C.cochranae* y *C.ignota*.

Descripción.- Adultos de tamaño moderado, longitud rostro-cloacal 25.4-27.5mm (\bar{x} = 26.2mm, S= 1.14, N= 3) en las hembras y 24.1-28.3mm (\bar{x} = 26.0mm, S= 1.07, N= 15) en los machos; cabeza bastante más ancha

que el cuerpo, más ancha que larga, anchura cefálica equivalente al 33.4-35.8mm (\bar{x} = 34.6mm, S= 1.19, N= 3) de la longitud rostro-cloacal en hembras y al 30.0-34.4mm (\bar{x} = 32.6mm, S= 1.06, N= 14) en machos, rostro truncado en vista dorsal y subtruncado en vista lateral (Fig. 2); distancia ojo-narina equivalente al 52.5-56.8mm (\bar{x} = 54.4mm, S= 2.15, N= 3) del diámetro anteroposterior del ojo en hembras y al 48.7-67.7mm (\bar{x} = 59.8mm, S= 6.65, N= 14) en machos; región loreal casi recta; narinas con aberturas elipsoideas, diagonales hacia abajo y atrás; *canthi rostrales* algo definidos exteriormente, ligeramente cóncavos; ojos grandes, abultados, de dirección anteromedial, sobrepasan el borde externo del labio superior cuando la cabeza se observa en vista ventral, labio superior algo prominente, diámetro antero posterior de la órbita equivalente al 42.0-48.2mm (\bar{x} = 45.3mm, S= 3.09, N= 3) de la longitud cefálica en hembras y al 40.2-48.7mm (\bar{x} = 44.1mm, S= 2.36, N= 14) en machos; anchura del párpado superior equivalente al 73.3-85.7mm (\bar{x} = 81.2mm, S= 6.85, N= 3) de la distancia interorbital en hembras y al 85.1-100.0mm (\bar{x} = 94.4mm, S= 7.09,

N= 13) en machos; tímpano muy pequeño, de visibilidad variable sólo en el 1/4 inferior, con inclinación dorsolateral, cuyo diámetro equivale al 27.0-35.1mm (\bar{x} = 31.5mm, S= 4.14, N= 3) del diámetro anteroposterior de la órbita en hembras y al 20.6-29.4mm (\bar{x} = 25.2mm, S= 2.56, N= 13) en machos; aberturas nasales internas de tamaño pequeño, redondeadas; lengua redondeada con muy leve escotadura en el borde posterior, márgenes posterior y laterales libres, no adherentes al piso de la boca; hendiduras vocales largas, dirigidas de la base medial en el piso de la boca, saco vocal medial externo, subgular.

Espina humeral ausente; antebrazo más robusto en los machos; dedos I y II manuales adpresos subiguales, dedos delgados, con discos grandes, de borde distal redondeado; diámetro transverso del disco del dedo III manual equivalente al 40.0-56.8mm (\bar{x} = 47.6mm, S= 8.50, N= 3) del diámetro ocular en hembras y al 46.1-63.6mm (\bar{x} = 55.7mm, S= 6.65, N= 6) en machos; palmeadura manual bastante reducida con fórmula: III ($3\frac{1}{2}$ - $3\frac{3}{4}$) - ($3\frac{1}{3}$ - $3\frac{2}{3}$) IV (Fig. 2); tubérculos subarticulares de los dedos manuales grandes, ovalados, poco prominentes, supernumerarios pequeños, abundantes, granulares, restringidos a la palma; tubérculo palmar pequeño, ovalado, plano, tenar elíptico, pequeño, de longitud algo mayor que el palmar; excrescencias nupciales tipo I.

Extremidades posteriores relativamente delgadas; longitud tibial equivalente al 57.5-61.8mm (\bar{x} = 60.1mm, S= 2.34, N= 3) de la longitud rostro-cloacal en hembras y al 55.4-61.4mm (\bar{x} = 59.2mm, S= 1.94, N= 14) en machos; cuando el miembro posterior se halla adpreso hacia adelante, el talón sobrepasa en algo el nivel del extremo rostral; cuando los miembros posteriores se hallan flexados hacia adelante y los anteriores hacia atrás, las rodillas y los codos se sobreponen considerablemente y cuando los muslos se hallan perpendiculares al plano sagital del cuerpo y con las piernas flexadas hacia atrás, los talones se sobreponen considerablemente; pliegue tarsal ausente; tubérculo metatarsal interno ovalado, ca 2 veces más largo que ancho; tubérculo metatarsal externo no evidenciable; tubérculos subarticulares de los dedos pediales planos, de tamaño moderado; tubérculos supernumerarios evidenciables, granulares; discos digitales de contorno distal redondeado, ligeramente más ancho que los artejos distales correspondientes, fórmula de la palmeadura pedial: I (2^- - 3^+) - 3 II 2 - (3^+ - $3\frac{1}{2}$) III (2^- - $2\frac{1}{2}$) - (3^+ - $3\frac{1}{2}$) IV ($3\frac{1}{3}$ - $3\frac{2}{3}$) - (2^- - $2\frac{1}{2}$) V (Fig. 2).

Piel dorsal finamente granular con pequeñas pústulas diseminadas en las superficies dorsales expuestas (Fig. 2); vientre y superficies ventrales de los muslos granulares;

pliegue cloacal corto, horizontal, dirigido posteriormente, situado a nivel superior de los muslos.

Coloración *in vivo*.- Superficies expuestas café con tinte rosado y puntos naranja (da un aspecto general rosado). Superficies ocultas rosado pálido; manos y pies amarillo naranja. Hueso blancos. Peritoneo parietal blanco. Iris dorado con fina línea irregular olivácea.

Coloración en etanol 70%.- Dorsalmente lavanda obscuro en cabeza y tronco con puntos gruesos blancos. Ventralmente crema uniforme. Labio superior blanco.

Dimensiones del holótipo.- Longitud rostro-cloacal 25.6, longitud cefálica 7.7, anchura cefálica 8.5, diámetro orbital 3.1, distancia ojo-narina 2.0, anchura del párpado superior 2.0, distancia interorbital 2.4, diámetro transverso del tímpano 0.8, diámetro del disco del dedo III manual 1.9, longitud de la tibia 15.4 mm.

Distribución.- *Cochranella rosada* es conocida del flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia en el Departamento de Caldas (municipios de Pensilvania y Samaná), entre los 1100 y los 2000m.

Aspectos ecológicos y reproductivos.- Los adultos se encontraron sobre vegetación en los bordes de quebradas. Las hembras contienen huevos a término de color blanco y negro y sus oviductos son gruesos y muy contorneados.

Cochranella savagei Ruiz-C. & Lynch

Ruiz-C. & Lynch (1991c) describieron *C. savagei* de los bosques nublados del flanco occidental de la Cordillera Central (Deptos. de Quindío y Risaralda) entre los 1980 y los 2410m y del flanco occidental de la Cordillera Occidental en el Depto. Valle del Cauca (a los 1800m). Posteriormente encontramos la especie en un rango de 1750 a 2000m en los bosques de "San Antonio" en el Valle del Cauca. El hallazgo de esta especie en el flanco oriental de la Cordillera Central inicialmente pareció muy extraño pero no es la única especie conocida que tenga "afinidades" con la fauna occidental que tenemos de las zonas de Samaná y del medio Magdalena (en prep.). Los registros de *C. savagei* del oriente de Caldas entre 1400 y 1650m son los más bajos conocidos.

Cochranella spilota sp. nov. Fig. 3

Holótipo.- Hembra adulta depositada en la colección batracológica del Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural, Universidad Nacional de Colombia,

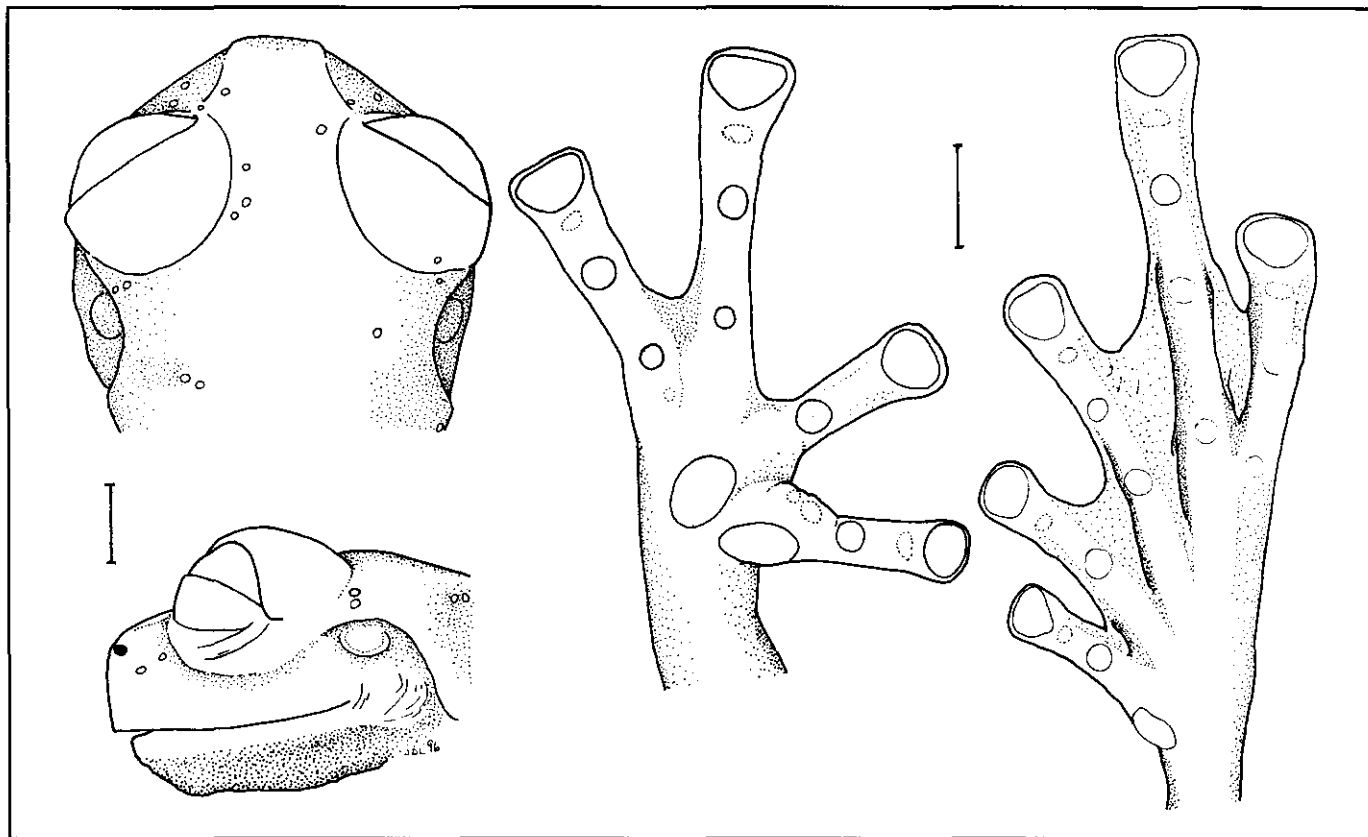


Figura 3. *Cochranella spilota* sp. nov. Cabeza (ICN 38073), mano (ICN 35155) pie, (ICN 38073). Escala = 2mm.

Bogotá, número ICN 35155 (número de campo PR 14934) coleccionada por J. Vicente Rueda-A., julio 14 de 1992.

Parátipos.- Ejemplares adultos machos ICN 35157-58 coleccionados en Depto. Caldas, mpio. Samaná, correg. Florencia, sitio El Estadero, 1850m, col. J. V. Rueda, 10 junio de 1994; hembra ICN 38073, zona "El Estadero" (o "Rancho Quemado"), col. J. V. Rueda, nov. de 1993.

Localidad típica.- Departamento de Caldas, municipio de Samaná, corregimiento Florencia, sitio "Rancho Quemado", 1940m.

Material referido: de la localidad típica (ICN 35156).

Etimología.- El epíteto específico (del Gr. *Spilotos*= marcas en puntos) alude al patrón de color dorsal de la especie.

Diagnosis.- Una especie del género *Cochranella* grupo *ocellata* caracterizada por la siguiente combinación de

caracteres: 1) procesos dentíferos y dientes vomerinos presentes sobre odontóforos prominentes en los machos, menos evidentes en las hembras, con 2-4 dientes en cada proceso en machos; 2) huesos verde en vida; 3) peritoneo parietal 2/3 anteriores blancos, peritoneo visceral translúcido; 4) color dorsal en vida verde bajo con flecos amarillo; en etanol 70% lavanda con flecos blancas, ligera banda postaxilar y banda labial blancas; 5) fórmula modal de la palmadura manual: III $3\frac{3}{4}$ - $3\frac{3}{4}$ IV; 6) fórmula modal de la palmeadura pedial: I 3 - $3\frac{1}{2}$ II 2 - $3\frac{1}{2}$ III 2 - $3\frac{2}{3}$ IV $3\frac{2}{3}$ - 2 V; 7) rostro truncado en vistas dorsal y lateral; 8) piel dorsal muy finamente granular sin tubérculos; 9) pliegues dérmicos ulnares y tarsales ausentes; 10) espina humeral ausente; 11) tímpano pequeño, ligeramente inclinado dorsolateralmente; 12) adultos de tamaño mediano, 27.6-28.5mm en dos hembras y 25.3-26.4mm en dos machos; 13) excrecencias nupciales tipo I.

Cochranella spilota es muy similar a *C. luminosa* pero los flecos son más escasos, los adultos son de tamaño

ligeramente menor, la cabeza es más truncada en perfil lateral, es ligeramente menos palmeada en manos y pies y carece de tubérculos en cabeza y cuerpo.

Descripción.- Adultos de tamaño mediano, longitud rostro-cloacal 27.6-28.5mm (\bar{x} = 28.1mm, N= 2) en las hembras y 25.3-26.4mm (\bar{x} = 25.8mm, N= 2) en los machos; cabeza bastante más ancha que el cuerpo, más ancha que larga, anchura cefálica equivalente al 34.1% (N= 2) de la longitud rostro-cloacal en hembras y al 36.7% (N=2) en machos; rostro truncado en vistas dorsal y lateral (Fig. 3); distancia ojo-narina equivalente al 63.4% (N= 2) del diámetro anteroposterior de la órbita en hembras y al 61.6% (N=2) en machos; región loreal oblicua, casi plana; narinas protuberantes, con ligera depresión medial y aberturas ovaladas diagonales hacia abajo y atrás; *canthi rostrales* algo definidos, cóncavos; ojos grandes, muy protuberantes dorsalmente, dirigidos anterolateralmente, sobrepasan el borde externo del labio superior, que es abultado, cuando la cabeza se observa en vista ventral; diámetro anteroposterior de la órbita equivalente al 44.5% (N= 2) de la longitud cefálica en hembras y al 45.7% (N=2) en machos; anchura del párpado superior equivalente al 106.2% (N= 2) de la distancia interorbital en hembras y al 99.8% (N=2) en machos; tímpano pequeño, redondeado ligeramente inclinado dorsolateralmente, visible en sus 3/4 inferiores, su diámetro equivale al 22.5% (N= 2) del diámetro anteroposterior de la órbita en hembras y al 23.5% (N= 2) en machos; aberturas nasales internas más bien grandes, redondeadas; procesos dentígeros y dientes vomerinos presentes sobre odontóforos prominentes en los machos, menos evidentes en las hembras, con 2-4 dientes en cada proceso en machos, 0-2 en hembras, algo separados entre sí, redondeados, situados a nivel de las narinas; lengua redondeada con muy leve escotadura en el borde posterior, márgenes posterior y laterales libres, no adherentes al piso de la boca; hendiduras vocales cortas, dirigidas de la base media de la lengua a la articulación mandibular, saco vocal medial externo, subgular.

Espina humeral ausente; antebrazo algo más robusto en los machos; dedos manuales I y II delgados, largos, con discos de extremo distal truncado; diámetro transverso del disco del dedo III manual equivalente al 58.4% (N= 2) de la del diámetro ocular en hembras y al 50.5% (N=2) en machos; palmeadura manual ausente entre los dedos I-II-III, con fórmula: III (33/4 - 34/5) - (3½ - 33/4) IV (Fig. 3); tubérculos subarticulares de los dedos manuales de tamaño moderado, redondos, algo levantados, supernumerarios pequeños, poco abundantes,

granulares, restringidos a la palma; tubérculo palmar reducido, ovoide, plano, tenar elíptico, poco definido; discos digitales manuales pequeños, truncados, diámetro transverso del disco del dedo III mayor que la anchura del dedo a nivel de la articulación de la última y penúltima falanges; excrescencias nupciales tipo I.

Extremidades posteriores delgadas; longitud tibial equivalente al 59.2% (N= 2) de la longitud rostro-cloacal en hembras y al 60.9% (N=2) en machos; cuando el miembro posterior se halla adpreso hacia adelante, el talón llega al nivel del extremo rostral; cuando los miembros posteriores se hallan flexados hacia adelante y los anteriores hacia atrás, las rodillas y los codos se sobrepone considerablemente y cuando los muslos se hallan perpendiculares al plano sagital del cuerpo y con las piernas flexadas hacia atrás, los talones se sobrepone considerablemente; pliegue tarsal ausente; tubérculo metatarsal interno ovalado, pequeño; tubérculo metatarsal externo no evidenciable; tubérculos subarticulares de los dedos pediales redondos, de moderado tamaño; tubérculos supernumerarios pequeños, granulares; discos digitales de contorno distal truncado, ligeramente más ancho que los artejos distales correspondientes, fórmula de la palmeadura pedial: I 3⁻ - 3½ II (2 - 2+) - (31/3 - 3½) III (1½- 2+) - (3½- 4) IV 32/3 - (2 - 2½) V (Fig. 3).

Piel dorsal muy finamente granular; vientre y superficies posteroventrales de los muslos densamente granulares; pliegue cloacal corto, horizontal, dirigido posteriormente, situado a nivel superior de los muslos, con un par de tubérculos subcloacales grandes destacables.

Coloración *in vivo*.- Superficies expuestas verde a verde "opaco" con puntos amarillos dispersos, manos y pies amarillentos. Gula y miembros ventralmente verde claro azulado. Peritoneo parietal 1/2 anterior blanco, visceral translúcido. Huesos verdes.

Coloración en etanol 70%.- Todas las superficies expuestas lavanda a lavanda obscuro con pecas blancas dispersas correspondientes a las pequeñas verrugas apenas levantadas en cabeza, tronco, antebrazo y piernas. Manos y pies crema. Ventralmente crema uniforme. Labio superior blanco difuso.

Dimensiones del holótipo.- Longitud rostro-cloacal 27.6, longitud cefálica 7.6, anchura cefálica 9.4, diámetro orbital 3.5, distancia ojo-narina 2.3, anchura del párpado superior 2.7, distancia interorbital 2.4, diámetro transverso del tímpano 0.8, diámetro del disco del dedo III manual 1.3, longitud de la tibia 16.3 mm.

Distribución. *Cochranella spilota* es conocida del flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia en el Departamento de Caldas (municipio de Samaná) entre los 1850 y los 1940m.

Aspectos ecológicos y reproductivos. Los dos hembras examinadas tienen huevos crema pequeños. Parece que la especie no estaba en época de reproducción. Una hembra juvenil (ICN 35156) tiene 19.8mm de LRC.

Cochranella susatamai Ruiz-C. & Lynch

Ruiz-C. & Lynch (1995a) registraron esta especie en cinco localidades entre los 900 y los 1650m sobre el flanco oriental de la Cordillera Central en los Deptos. de Antioquia, Caldas, y Tolima. Ahora se incluyen un nuevo registro del municipio de Samaná (1100m) y otro de Antioquia (municipio Sonsón, vereda La Soledad, 1200m).

Hyalinobatrachium colymbiphyllum (Taylor)

La serie comparte bien los caracteres diagnósticos y descriptivos de la especie (Haynes & Starrett, 1980; Starrett & Savage, 1973). En vida tienen el corazón visible. *H. colymbiphyllum* es otra especie con varios registros dentro del valle del Río Magdalena conocida anteriormente como un elemento chocoano (ver comentarios anteriores sobre *Centrolene prosoblepon* y *Cochranella savagei*).

Aunque no tenemos material de Caldas, *Hyalinobatrachium fleischmanni* se encuentra en el Departamento de Antioquia, algo al norte del transecto. Suponemos que la especie también se encuentra en las tierras bajas de Caldas.

Discusión. Las trece ranas centrolénidas reportadas para las laderas orientales de la Cordillera Central (Fig. 4) constituyen una fauna centrolénida comparable a la conocida de las laderas amazónicas de los Andes del Ecuador (Lynch & Duellman, 1973), de las laderas occidentales de los Andes en el sur de Colombia y la del Ecuador (Duellman & Burrowes, 1989) o la de Costa Rica (Savage, 1980). El patrón altitudinal de la diversidad (más rica en bosques nublados es ligeramente mayor en la parte baja que en la alta de los bosques montanos) como lo anotan Duellman & Burrowes (1989).

En el valle alto del Magdalena la fauna centrolénida de las laderas de las cordilleras es notablemente pobre (no más de cuatro especies), tal vez sea el reflejo de la influencia de las tierras bajas áridas sobre los bosques nublados. Las laderas del Magdalena medio tienen mu-

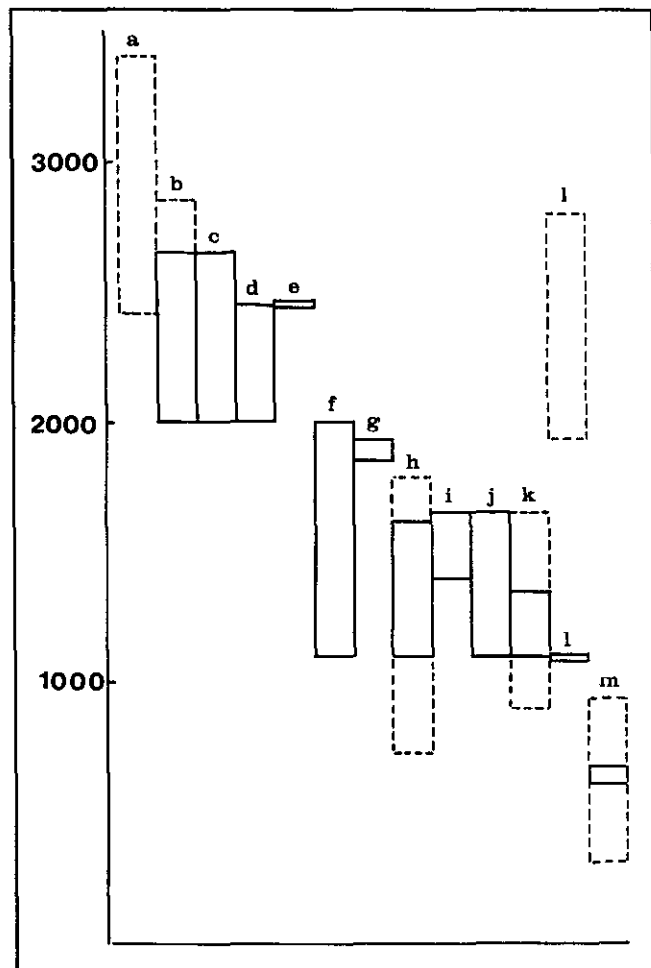


Figura 4. Perfil de los centrolénidos en el flanco oriental de la Cordillera Central en el Departamento de Caldas. Las especies se representan con rectángulos (líneas continuas o interrumpidas) y son (comenzando por la izquierda), a) *Centrolene buckleyi*, b) *C. robledoii*, c) *Cochranella griffithsi*, d) *Centrolene antioquiensis*, e) *C. geckoideum*, f) *Cochranella rosada*, g) *C. spilota*, h) *Centrolene prosoblepon*, i) *Cochranella savagei*, j) *Hyalinobatrachium colymbiphyllum*, k) *Cochranella susatamai*, l) *C. posadae*, m) *C. punctulata*. Los límites altitudinales en Caldas se indican con rectángulos de líneas continuas mientras que los de otras latitudes del flanco oriental de la Cordillera Central se indican con líneas interrumpidas. La escala de la izquierda da la elevación en metros.

chas más especies. Contrastando el perfil de Caldas con el de las laderas occidentales de la Cordillera Oriental en el Depto. Cundinamarca (Fig. 5), se encuentran algunas especies paralelas (especies hermanas putativas) pero más obvia es la pobreza relativa del flanco occidental de la Cordillera Oriental (solamente siete especies). Los bosques de las tierras bajas del Magdalena medio han sido

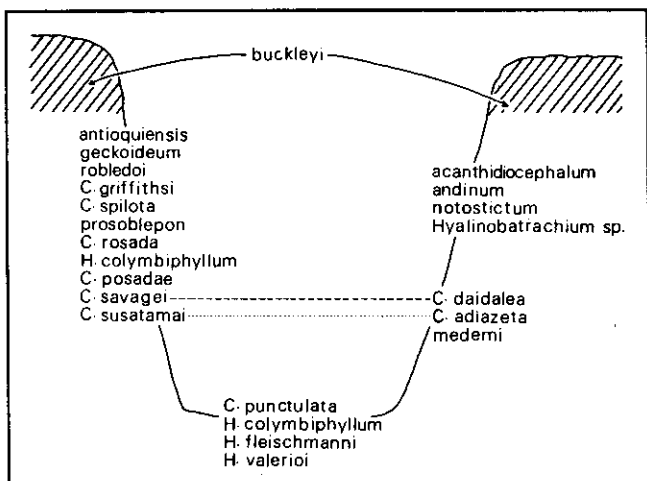


Figura 5. Corte del valle del Magdalena en la zona Caldas - Cundinamarca para mostrar la diversidad de centrolénidos en tierras bajas del Magdalena medio y los flancos de las cordilleras adyacentes. Los géneros están indicados así: H = *Hyalinobatrachium*, C = *Cochranella*, donde falta letra mayúscula corresponde a *Centrolene*. Especies hermanas son conectadas por líneas de puntos o interrumpida. Los páramos corresponden a las zonas rayadas.

poco estudiados por problemas de orden público sin embargo tenemos de allí registros de cuatro especies centrolénidas (*Cochranella punctulata*, *Hyalinobatrachium colymbiphylum*, *H. fleischmanni*, y *H. valerioi*).

Un perfil idealizado sobre las tres cordilleras (Fig. 6) incluye 39 especies de ranas centrolénidas (15 del género *Centrolene*, 17 del género *Cochranella*, y 7 del género *Hyalinobatrachium*). El flanco oriental de la Cordillera Central es casi tan rico como el flanco occidental de la Cordillera Occidental. Sin embargo la Cordillera Occidental ha sido considerada como la más rica por estar próxima a las tierras bajas del Pacífico (también ricas). Las cuatro áreas de tierras bajas son muy diferentes en la diversidad de centrolénidos porque en el valle del Río Cauca no hay especies de esta familia y en el piedemonte oriental sólo hay dos especies (*Cochranella flavopunctata* y una especie de *Hyalinobatrachium*). Las faunas de los flancos orientales y occidentales de las cordilleras Occidental y Oriental son muy diferentes mientras que los de la Cordillera Central entre sí difieren mucho menos (la diferencia más obvia está en el número de especies sobre flancos diferentes).

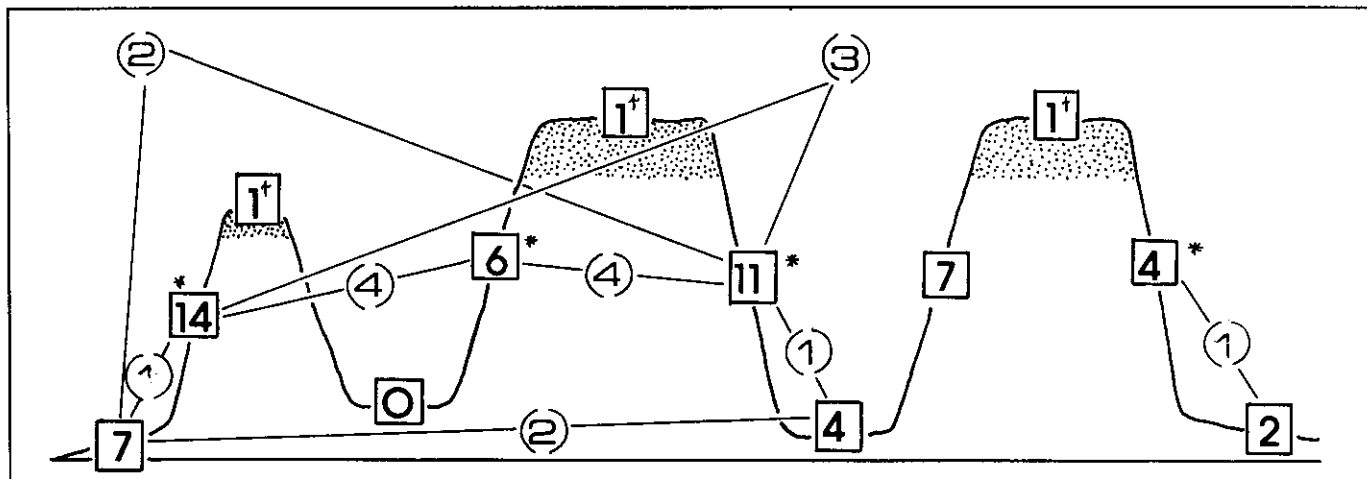


Figura 6. Perfil de las tres cordilleras en una zona Cundinamarca - Caldas - Risaralda. El número de especies en cada unidad (páramos, bosques nublados, tierras bajas) se ubica en los cuadrados. El número en paréntesis significa el número de especies en común en dos unidades. Las cruces significan *Centrolene buckleyi*, una especie paramera y los asteriscos significan *C. geckoideum*. Las especies que no se detallan en la Fig. 5 son las siguientes: en el piedemonte llanero (*Cochranella flavopunctata* y *Hyalinobatrachium* sp. 2), en el flanco oriental de la Cordillera Oriental (*Centrolene geckoideum*, *C. hybrida*, *C. petrophilum*, *H.* sp. 2), en el flanco occidental de la Cordillera Central (*Centrolene geckoideum*, *C. grandisonae*, *C. quindianum*, *C. robledoi*, *Cochranella griffithsi*, *C. savagei*), en el flanco occidental de la Cordillera Occidental (*Centrolene geckoideum*, *C. grandisonae*, *C. helodermum*, *C. lynchi*, *C. peristictum*, *C. prosoblepon*, *Cochranella albomaculata*, *C. cristinae*, *C. euknemos*, *C. griffithsi*, *C. ignota*, *C. megistra*, *C. prasina*, *C. ruizi*) y en las tierras bajas del Pacífico (*Centrolene ilex*, *C. prosoblepon*, *Cochranella spinosa*, *H. aureoguttatum*, *H. colymbiphylum*, *H. pulveratum*, *H. valerioi*). Los páramos corresponden a las zonas punteadas.

Agradecimientos

Los biólogos Mariela Osorno, Vicente Rueda, Claudia Vélez permitieron reportar materiales coleccionados en sus trabajos de campo. Por su colaboración en el trabajo de campo agradecemos además de V. Rueda a la profesora María Cristina Ardila y a los estudiantes de la asignatura Sistemática Animal (Introducción y Profundización I-II) del I semestre de 1994.

Bibliografía

- Cochran D. M. & C. J. Goin. 1970. Frogs of Colombia. U. S. Natl. Mus. Bull., (288): xii + 654pp.
- Duellman W. E. & P.A. Burrowes. 1989. New species of frogs *Centrolenella* from the Pacific versant of Ecuador and south Colombia. Occas. Pap. Mus. Nat. Hist. Univ. Kansas, (132): 1-4.
- Flores, G. 1985. A new *Centrolenella* (Anura) from Ecuador, with comments on nuptial pads and prepollical spines in *Centrolenella*. Journ. Herpetology 19: 313-320.
- Hayes, M. P. & P. H. Starrett. 1980. Notes on a collection of centrolenid frogs from the Colombian Choco. Bull. So. California Acad. Sci., (79): 89-96.
- Lynch, J. D. 1990. A new ocellated frog (Centrolenidae) from western Colombia. Proc. Biol. Soc. Washington, (103): 35-38.
- Lynch, J. D. & W. E. Duellman. 1973. A review of the centrolenid frogs of Ecuador, with descriptions of new species. Occ. Pap. Mus. Nat. Hist. Univ. Kansas, (16): 1-66.
- Lynch, J. D., P. M. Ruiz-C. & M. C. Ardila-R. 1997. Biogeographic patterns of Colombian frogs and toads. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat., 21(80): 237-248.
- Lynch, J. D., P. M. Ruiz & J. V. Rueda. 1983. Notes on the distribution and reproductive biology of *Centrolene geckoideum* Jiménez de la Espada in Colombia and Ecuador (Amphibia: Centrolenidae). Stud. Neotrop. Fauna Environ., (18): 239-243.
- Noble, G. K. 1920. Two new batrachans from Colombia. Bull. Amer. Mus. Nat. Hist., (42): 441-446.
- Rueda-A., J. V. 1994. Estudio anatómico y relaciones sistemáticas de *Centrolene geckoideum* (Salientia: Anura: Centrolenidae). Trianea (Act. Cien. Tecn. INDERENA), (5): 133-187.
- Ruiz-C., P. M., M. C. Ardila-R. & J. D. Lynch. 1996. Lista actualizada de la fauna de Amphibia de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat., 20 (77): 365-415.
- Ruiz-C, P. M. & J. D. Lynch. 1991a. Ranas Centrolenidae de Colombia I. Propuesta de una nueva clasificación genérica. Lozanía (57): 1-30.
- _____. 1991b. Ranas Centrolenidae de Colombia II. Nuevas especies de *Centrolene* de la Cordillera Oriental y Sierra Nevada de Santa Marta. Lozanía (58): 1-26.
- _____. 1991c. Ranas Centrolenidae de Colombia III. Nuevas especies de *Cochranella* del Grupo *granulosa*. Lozanía (59): 1-18.
- _____. 1995a. Ranas Centrolenidae de Colombia V. Cuatro nuevas especies de *Cochranella* de la Cordillera Central. Lozanía (62): 1-24.

_____. 1995b. Ranas Centrolenidae de Colombia VII. Redescrición de *Centrolene andinum* (Rivero 1968). Lozanía (64): 1-12.

_____. 1995c. Ranas Centrolenidae de Colombia VIII. Cuatro nuevas especies de *Centrolene* de la Cordillera Central. Lozanía (65): 1-16.

Savage, J. M. 1980. A handlist with preliminary keys to the herpetofauna of Costa Rica. Allen Hancock Found., Univ. Southern California. p. 1-111.

Savage, J. & W. R. Heyer. 1967. Variation and distribution in the tree-frog genus *Phyllomedusa*. Beitr. Neotrop. Fauna, (5): 111-131.

Starrett, P. H. & J. M. Savage. 1973. The systematic status and distribution of Costa Rican glass-frogs, genus *Centrolenella* (family Centrolenidae), with description of a new species. Bull. So. California Acad. Sci., (72): 57-78.

APENDICE 1 (Materiales examinados)

Centrolene antioquiensis

ANTIOQUIA: municipio Yarumal, Ventanas, 2040-208m (ICN 9773). CALDAS: municipio Pensilvania, Km 24 de la vía Pensilvania - Arboleda, sitio Puerto Suárez, por la trocha que conduce a Florencia, 2150m (ICN 37500-03), Km 18 de la vía Pensilvania - Arboleda, hacia Arboleda, 2000-2450m (ICN 35194, 36527, 36529). TOLIMA: municipio Líbano, quebrada vía a Murillo, 1850m (MLS 1089 [3]).

Centrolene buckleyi

ANTIOQUIA: municipio Sonsón, vereda San Francisco, finca Los Olivos, 2650m (ICN 38098-102), finca La Quinta, 2700-2800m (ICN 38103-07), vereda Sirgua Arriba, quebrada San Andrés, 2420m (ICN 38108). CALDAS: Páramo de Herveo, Alto de las Cruces, 3050m (ICN 26962).

Centrolene geckoideum

CALDAS: municipio Pensilvania, Km 18 carr. Pensilvania - Arboleda, hacia Arboleda, 2450m (ICN 36514-16).

Centrolene prosoblepon

ANTIOQUIA: municipio San Carlos, vereda San José, quebrada San José, 970m (ICN 38110); municipio Sonsón, camino La Soledad-Arenal-Playa Rica, 1200-1800m (ICN 38109). CALDAS: municipio Samaná, corregimiento Florencia, vereda San Lucas, 1100m (IND-AN 5575-78, 1400m (IND-AN 5574), Km 1.7 carr. El Codo a Florencia, 1375m (ICN 34804-05), Km 1.6-3.0,

carr. Samaná a vereda California Alta, 1616m (ICN 34786-803), Km 5.6 carr. Samaná a La Cristalina, 1350m (ICN 34779-85).

Centrolene robledoi

ANTIOQUIA: municipio Sonsón, vereda San Francisco, finca El Olivo, 2600m (ICN 38117), finca La Quinta, 2700-2800m (ICN 38111-14), vereda Sirgua Arriba, quebrada San Andrés, 2420m (ICN 38115-16). CALDAS: municipio Pensilvania, Km 18 de la carretera Pensilvania - Arboleda hasta Km 28 de la misma ruta, 2000 - 2650m (ICN 38122-24).

Cochranella griffithsi

CALDAS: Pensilvania, Km 18 de la carretera Pensilvania - Arboleda, hacia Arboleda, 2000-2450m (ICN 36526, 36530), 2000-2650m (ICN 38141-46), Km. 24 de la vía Pensilvania - Arboleda, trocha que conduce a Florencia, sitio Puerto Suárez, 2000-2150m (ICN 38125-37), afluente de las Mercedes (ICN 38138-39), 2450-2600m (ICN 38140).

Cochranella posadae

CALDAS: municipio Samaná, corregimiento Florencia, vereda San Lucas, 1100m (IND-AN 5582, VR 4767).

Cochranella punctulata

ANTIOQUIA: municipio San Luis, corregimiento El Prodigio, vereda Las Confusas, 360-470m (ICN 38095), vereda Playa Rosa (ICN 38096-97). CALDAS: municipio Samaná, vereda La Miel, 640-660m (ICN 34745),

campamento Tasajos, proyecto Miel II, 620-680m (ICN 34746-59).

Cochranella savagei

CALDAS: municipio Samaná, Km 3.8 carretera Samaná a La Cristalina, 1400m (ICN 34926-27), Km 1.6 carretera Samaná a vereda California Alta, vereda Macías, 1610m (ICN 34928), abajo de Km 1.6, 1650m (ICN 34929), Km 1.6-3.0 carretera Samaná a vereda California Alta (ICN 34930).

Cochranella susatamai

ANTIOQUIA: municipio Sonsón, vereda La Soledad, Río Verde de los Montes, Arenal, Playa Rica, 1200m (ICN 38094). CALDAS: municipio Samaná, corregimiento Florencia, vereda San Lucas, 1100m (ICN 38092-93); Km. 5.6 carretera Samaná a La Cristalina, 1350m (ICN 34809-12, IND-AN 5579-80), Km. 1.6 carretera Samaná a vereda California Alta (ICN 34814), Km 9 carretera Samaná a vereda California Alta, 1350m (ICN 34813).

Hyalinobatrachium colymbiphylum

CALDAS: municipio Samaná, corregimiento Florencia, vereda San Lucas, 1100m (IND-AN 5572), Km 5.6 carretera Samaná a La Cristalina, 1350m (ICN 34727-30), Km 1.6 carretera Samaná a vereda California Alta, 1650m (ICN 34732-43), Km 9, 1350m (ICN 34731).

Hyalinobatrachium fleischmanni

ANTIOQUIA: municipio San Luis, corregimiento El Prodigio, vereda Las Confusas, 360-470m (ICN 38118-21).

UNA NUEVA ESPECIE DE *ATELOPUS* (AMPHIBIA: ANURA: BUFONIDAE) DE LA CORDILLERA CENTRAL, COLOMBIA

por

Claudia M. Vélez-Rodríguez* & Pedro M. Ruiz-Carranza**

Resumen

Vélez-Rodríguez, C. M., & P. M. Ruiz-Carranza: Una nueva especie de *Atelopus* (Amphibia: Anura: Bufonidae) de la Cordillera Central, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 21 (81): 555-563, 1997. ISSN 0370-3908.

Se nomina y describe una nueva especie del género *Atelopus*, procedente del flanco oriental de la Cordillera Central, 1500m, Departamento de Antioquia. Se compara con *A. minutulus*, *A. nicefori*, *A. quimbaya*, *A. sernai* y se discute la utilización del patrón de coloración de las larvas como elemento adicional para diferenciar las especies.

Palabras claves: Amphibia, Anura, Bufonidae, *Atelopus*, nueva especie, taxonomía, Cordillera Central, Antioquia, Colombia.

Abstract

A new species of the genus *Atelopus* from the Eastern slope of the Cordillera Central, Antioquia, 1500m, is named and described. It is compared with *A. minutulus*, *A. nicefori*, *A. quimbaya*, *A. sernai*. The use of the coloration pattern of tadpoles as an additional element for species differentiation is discussed.

Key words: Amphibia, Anura, Bufonidae, *Atelopus*, new species, taxonomy, Cordillera Central, Antioquia, Colombia.

Introducción

El género *Atelopus* es estrictamente neotropical, Lotters (1996) señala la existencia hasta el momento de

66 especies para el neotrópico, Ruiz-C, Ardila-R & Lynch (1996) anotan 34 para Colombia.

Las especies del género habitan desde la selva húmeda tropical hasta el páramo, con registros altitudinales

* Bióloga, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Santafé de Bogotá, Colombia.

** Profesor, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Santafé de Bogotá, Colombia.

desde el nivel del mar hasta los 4800m, siempre muy asociadas a sitios con poca o ninguna alteración y presencia de quebradas, indispensables para la oviposición, fertilización de las posturas y desarrollo de las larvas de tipo gastromizóforo (con una ventosa suctorial en la superficie ventral corporal) *sensu* Altig & Johnston (1989). Son anfibios de actividad principalmente diurna, los adultos de colores muy vistosos y larvas con diseños corporales bien definidos.

Hasta el presente se conocen 6 especies del género *Atelopus* en la Cordillera Central de Colombia: *A. ebenoides* Rivero 1963, *A. eusebianus* Rivero & Granados-D. 1993, *A. quimbaya* Ruiz-C & Osorno-M 1994, *A. sanjosei* Rivero & Serna 1989, *A. sernai* Ruiz-C & Osorno-M 1994, y *A. simulatus* Ruiz-C & Osorno-M 1994. La aquí descrita ocupa el bosque muy húmedo premontano (bmh-P), con una biotemperatura media aproximada entre 18 y 24°C y un promedio anual de precipitación entre 2.000 y 4.000mm, (vertiente oriental de la Cordillera Central), Espinal (1992), la zona montañosa cruzada por varios ríos, con alta concentración de población humana y extensas zonas de cultivo. En el área se ha permitido el aprovechamiento forestal lo que unido a las presiones sociales y económicas ha ocasionado la desaparición paulatina del bosque.

Metodología

A los ejemplares preservados en etanol 70%, se les tomaron las siguientes medidas, con un calibrador de precisión de 0.02mm, bajo estereoscopio:

AC=anchura máxima cefálica a nivel de la articulación mandibular

AP=mayor anchura del párpado superior

DIO=distancia interorbital, menor distancia entre los bordes internos de las órbitas

DO=(ojo), distancia entre el ángulo anterior y posterior de la órbita

DON=(ojo-narina), distancia del ángulo anterior de la órbita al extremo posterior de la apertura nasal

LC=longitud cefálica, tomada desde la articulación mandibular (cuerda), hasta el extremo rostral

LF=máxima distancia entre las articulaciones femorotibiales, manteniendo los muslos perpendiculares al plano sagital corporal, dividido el valor por dos

LP=longitud del pie, desde el borde proximal del tubérculo metatarsal interno hasta el extremo del dedo IV

LR-U=longitud rostro-urostilar (*sensu* Peters, 1973)

LT=longitud tibio-fibular, de la rodilla al talón

O-R=órbita-extremo rostral, distancia entre el extremo del rostro y el ángulo anterior de la órbita (cuerda)

Abreviaturas de los datos morfométricos:

n= número de ejemplares

V= variabilidad morfométrica

\bar{X} = promedio aritmético

S= desviación "standar" de la serie

Para osteología craneal y de columna vertebral se sigue la nomenclatura de Trueb (1973), aparato hyolaríngeo Trewavas (1933), tarso y carpo Fabrezi (1992, 1993).

Atelopus sonsonensis sp. nov.

(Fig. 1A y B)

Holotipo. Hembra adulta, de una serie coleccionada por Claudia M. Vélez, (número de campo CMV 357), en abril 3 de 1996, depositada en la colección batracológica del Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. No. ICN 37516.

Paratopótipos. Machos adultos, coleccionados con el holotipo (números de campo CMV 342-51, 364-67), abril 2-5 de 1996. Nos. ICN 37517-30.

Localidad típica. COLOMBIA, Antioquia, municipio de Sonsón, vereda Caunzal, flanco oriental de la Cordillera Central, ca 15km. al sureste del municipio de Argelia, 1500m.

Etimología. El epíteto específico es el adjetivo derivado del nombre geográfico del sitio de colección, municipio de Sonsón, Departamento de Antioquia.

Diagnosis. Una especie del género *Atelopus*, del grupo *longirostris sensu* Peters (1973), reconocible por la siguiente combinación de caracteres: 1) adultos de tamaño moderado, longitud rostro-urostilar 31.0mm en una hembra adulta y 21.7-28.8mm (\bar{X} = 23.3, S = 1.71, n = 14) en machos adultos; 2) rostro moderadamente largo; 3) porte moderadamente esbelto; 4) fórmula falangeal manual 1-2-3-3; 5) miembros posteriores de moderada lon-



Fig. 1.-A) Vista dorsal de *Atelopus sonsonensis* sp.nov. ICN 37516 (holótipo), hembra adulta (LR-U= 31.0mm.), B) ICN 37525 (paratopótipo), macho adulto (LR-U= 25.0mm).

gitud; 6) tímpano, anillo timpánico, oído medio y *columella auris* ausentes; 7) palmeadura manual vestigial; 8) dedos pediales palmeados; 9) apófisis neurales de todas las vértebras troncales prominentes, observables a manera de cresta baja, continua; 10) piel dorsal fina y densamente granular, tronco, flancos, muslos y piernas con tubérculos subcónicos de tamaño moderado, superficie ventral granular; 11) color *in vivo*, en la única hembra conocida, el dorso café oscuro, en los machos café oscuro con un tinte verde difuso hacia la cabeza, flancos troncales en hembra café rojizo, en machos verde-verde azuloso con retículo café; ventralmente en la hembra anaranjado, en los machos café claro, gula con pequeñas manchas café oscuro; 12) larvas con el cuerpo café, rostro en su porción ventral crema, con dos manchas amarillas, alargadas, simétricas posteriores a los ojos y algunas pequeñas en región corporal dorsal, aletas translúcidas incoloras, porción dorsal de la musculatura caudal negra, ventralmente translúcido incoloro, con algunos cromatóforos café oscuro, dispersos.

Descripción (de la serie típica): porte moderadamente esbelto. Hembra con anchura cefálica equivalente al 27% de la longitud rostro-urostilar y al 23.0-32.0% (\bar{X} =29%, S =0.02, n =14) en machos; anchura cefálica el 90% de su propia longitud en la hembra y 83-100% (\bar{X} =90%, S =0.04, n =14) en machos; longitud cefálica equivale al 30% de la longitud rostro-urostilar en la hembra y al 25-36% (\bar{X} =32%, S =0.03, n =14) en machos. Rostro relativamente largo, acuminado en vista dorsal, sobrepasa moderadamente el nivel anterior del labio inferior. Sin carina medial rostral. Superficie rostral ampliamente cóncava, poco profunda. *Canthus rostralis* bien definido, algo romo en la hembra, poco en machos. Narinas algo protuberantes, oblicuas dorso-ventralmente, la distancia órbita-narina el 97% del diámetro orbital en la hembra y 63-108% (\bar{X} =85%, S =0.12, n =14) en los machos. Ojos poco protuberantes, diámetro orbital el 62% de la distancia órbita-extremo rostral en la hembra y 60-75% (\bar{X} =66%, S =0.05, n =14) en los machos; anchura del párpado superior equivalente al 71% de la distancia

interorbital, en la hembra y al 62-100% (\bar{X} =82%, S= 0.10, n=14) en los machos. Distancia interorbital equivalente al 36% de la anchura cefálica en la hembra y al 34-45% (\bar{X} = 38%, S= 0.03, n=14) en machos. Crestas timpánicas prominentes, romas, de dirección algo convergente hacia el plano medio sagital. Región loreal algo cóncava, labio superior no abultado. Superficie interorbital posterior algo levantada.

Apófisis neurales de todas las vértebras troncales prominentes, forman una cresta baja, continua hasta la parte anterior de la vértebra sacra. Superficie sacra o coccígea ampliamente cóncava. Bordes distales de la vértebra sacra prominentes. Borde medial de la supraescápula amplio, prominente, algo obtuso.

Piel de cabeza, flancos cefálicos, región escapular, superficies expuestas de los miembros anteriores y posteriores, fina y densamente granular, con pequeños tubérculos cónicos, de ápice agudo y de color blanco. Tronco, flancos troncales y abdominales, muslos y piernas con tubérculos subcónicos más grandes, dispersos. Región timpánica con escasos tubérculos subcónicos. Artejos digitales manuales y pediales bien delimitados dorsalmente por surcos tenues transversos, a nivel de las articulaciones. Gula, pecho, y vientre granulares. Superficies femorales ventrales proximales, con gránulos de mediano tamaño, aplanados, densos, irregulares. Tubo cloacal corto, abertura redondeada, situado a nivel medio de los muslos. Hembra con miembros anteriores esbeltos, machos con antebrazos robustos. Longitud tibial equivalente al 48% de la longitud rostro-urostilar en la hembra y al 40-52% (\bar{X} =48%, S=0.03, n=14) en los machos y al 105% de la longitud femoral en la hembra y 97-105% (\bar{X} =102%, S= 0.02, n=14) en los machos. Longitud del pie equivalente al 41% de la longitud rostro-urostilar en la hembra y al 32-45% (\bar{X} =41%, S= 0.04, n=14) en los machos. Dedos manuales cortos, de extremos redondeados, no dilatados lateralmente. Tubérculos subarticulares manuales grandes, ligeramente prominentes. Tubérculo palmar de mediano tamaño, poco levantado, de contorno regular, ovoide. Primer dedo manual ampliamente ensanchado en la base, carnoso; tubérculos supernumerarios palmares pequeños, irregulares, poco levantados. Palmeadura digital manual en dedos II, III y IV apenas vestigial. Longitud relativa de los dedos manuales I<II<IV<III. Dedos pediales palmeados y con finos rebordes dérmicos. Tubérculos subarticulares del pie casi del mismo tamaño que manuales, de contorno redondeado, algo protuberantes. Tubérculos plantares supernumerarios abundantes y granulares. Tubérculo metatarsal interno elíptico, dos veces más largo que an-

cho. Tubérculo metatarsal externo subcónico la mitad en longitud que el metatarsal interno.

Lengua espatulada, 1/3 posterior libre. Narinas internas ovaladas, pequeñas, completamente visibles en vista perpendicular.

Machos con testículo blanco, mesorquio blanco. Peritoneo parietal y visceral negro. Hendiduras vocales pareadas, bastante posteriores, laterales, de longitud moderada, presentes en todos los machos adultos estudiados. Excrecencias nupciales a manera de parche espinar córneo, de ubicación laterodorsal en el primer dedo manual.

Dimorfismo sexual externo dado por el mayor tamaño de la hembra, el antebrazo más robusto en los machos y la coloración diferencial.

Osteología. (paratopótipo, macho adulto ICN 37527, LR-U= 23,2mm), esqueleto bien osificado, nasales lisos, grandes, ovalados, moderadamente divergentes en sentido anteroposterior (Fig. 2A). El cartílago nasal sobrepasa el nivel de las premaxilas. Frontoparietales amplios, lisos, sin crestas, de bordes laterales casi rectos, bordes anteriores irregulares, con ligera sobreposición sobre los nasales, se expanden moderadamente sobre la parte posterior interna de la órbita, fusionados con los proóticos, éstos con una amplia fosa ovoidea en la parte posterior, gotera occipital no identificable. El extremo anterior osificado del esfenetmoides casi alcanza el extremo anterior de los nasales. Rama zigomática y ótica del escamoso, en vista dorsal, angostas, cortas, rama ventral recta, casi perpendicular al plano dorsal craneal. Palatinos largos y delgados, en media-luna amplia (Fig. 2B), de extremos muy agudos. Vómeres pequeños, angostos, de bordes paralelos. Pterigoides muy robusto, su rama anterior articula con la maxila a nivel medio del plano anterior de la órbita, rama media corta, gruesa, no se sobrepone sobre el extremo del proceso alar del paraesfenoides. Cuadratoyugal corto, ancho, no articulado con la maxila. Proceso cultriforme del paraesfenoides corto, amplio de extremo anterior obtuso, no sobrepasa anteriormente el nivel medio de la órbita, procesos alares de bordes subparalelos, inclinados lateral y posteriormente, algo dilatados distalmente. Maxila algo robusta, proceso nasal amplio, de forma rectangular. Premaxilas, fuertes, con amplios procesos palatinos, triangulares, cortos, proceso nasal amplio de forma rectangular.

Cintura pectoral firmisternal. *Mesosternum* óseo, amplio, dilatado posteriormente, de bordes cóncavos, *Xiphisternum* cartilaginoso, laminar, ensanchado, en for-

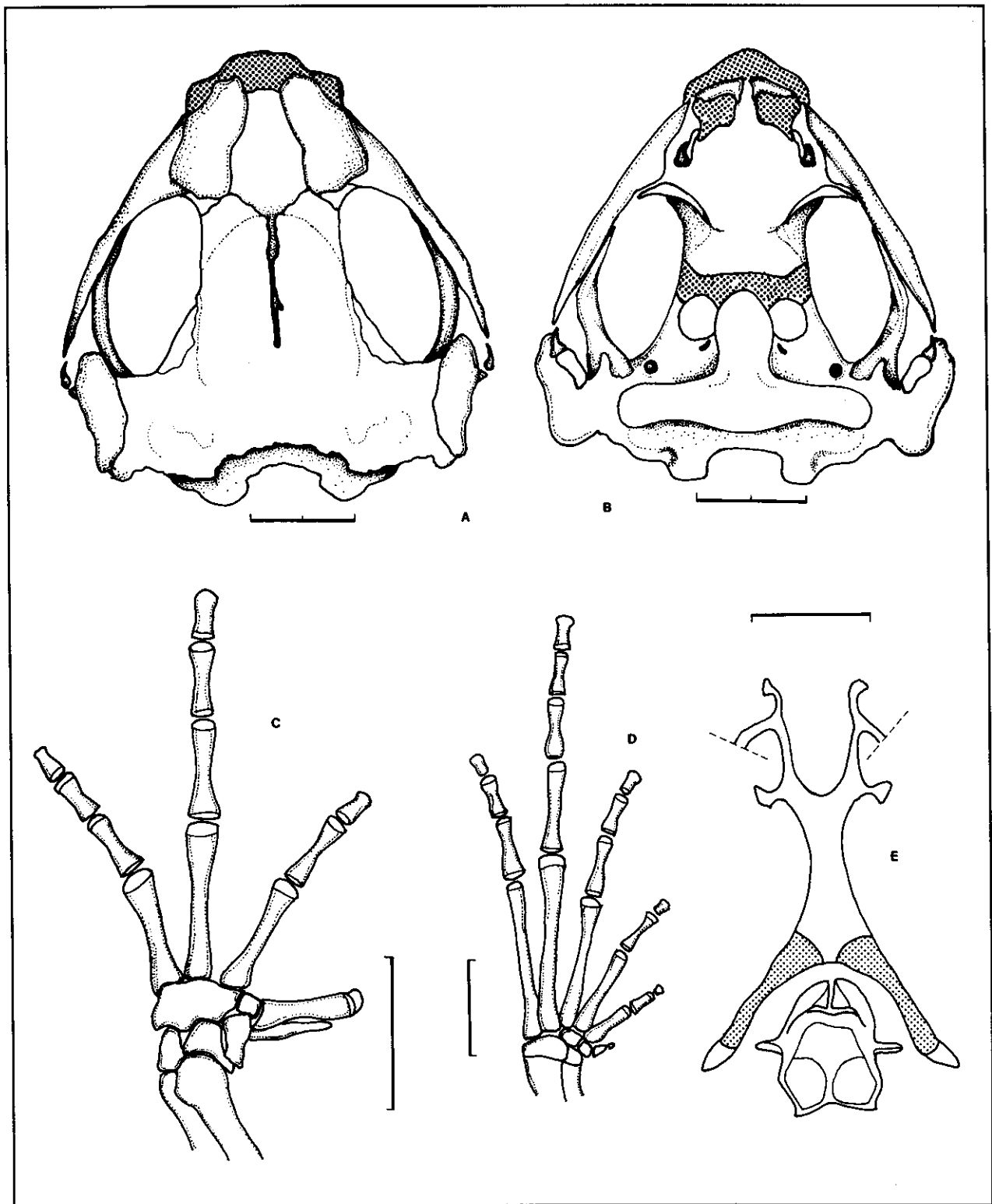


Figura 2. *Atelopus sonsonensis* sp.nov. ICN 37527 (paratopótipo): cráneo: (A) vista dorsal, (B) vista ventral. (cartílago = área de punteadura gruesa).

(C) mano vista dorsal. (D) pie vista dorsal. (E) aparato hiolaríngeo (vista ventral), proceso posteromedial osificado, resaltado. Escalas= 2mm.

ma de áncora. Clavículas cortas, de bordes paralelos, casi perpendiculares con respecto a los cartílagos epicoracoides, Coracoides divergente laterodorsalmente.

Cótilos cervicales craneales tipo I, **Trueb** (1973: fig 2, pág 101), atlas no fusionado a la segunda vértebra, apófisis transversa corta, dirigida algo hacia adelante, siguientes vértebras subiguales en longitud, más dilatadas y delgadas, segunda y tercera con ligera dirección posterior, cuarta a sexta casi perpendiculares, última algo dirigida anteriormente. Borde proximal anterior y posterior de las vértebras quinta, sexta, séptima y la región posterior de la vértebra sacra con lámina ósea. Sacro con procesos o diapófisis transversos muy dilatados. Apófisis neurales moderadamente sobresalientes, sin imbricación. Urostilo con ligeras aristas dorsales longitudinales. Articulación sacro-coxígea monocondilar.

Con seis elementos carpales individuales (Fig. 2C) así: uno ulnar, uno radial, un elemento "y", un elemento formado por la fusión de los carpales distales 3-4-5, un carpal distal 2, y un elemento proximal del *prepollex*. Fórmula falangeal manual 1-2-3-3. Tarso (Fig. 2D), con fusión de los distales tarsales 2-3, presencia del elemento "y", que se articula con metatarsal I y un único elemento del *prehallux*. Fórmula falangeal pedial 2-2-3-4-3.

Esqueleto hiolaríngeo con lámina cartilaginosa angosta de bordes moderadamente cóncavos (Fig. 2E), proceso alar de la lámina hioídea con un corto pedúnculo dilatado distalmente. Procesos anteriores ceratohyales largos, con ligera dilatación en su porción distal. Proceso posteromedial de la lámina hioídea en su mayor parte osificado, casi tan largo como la lámina hioídea, 1/5 distal cartilaginosa. Cartílago cricoides con anillo completo (=cerrado), delgado, con proceso bronquial muy largo, de dirección posterior, extremo con una ramificación corta, redondeada, sin procesos cardíacos. Cartílago aritenoides de formaacampanulada, con dos casquetes amplios.

Coloración *in vivo*. Hembra adulta con dorso café oscuro, flancos troncales café rojizos; axila, vientre, ingle, y región ventral del muslo, de color anaranjado, gula con varias manchas café sobre fondo naranja, palmas y plantas naranja-amarillento. Machos con superficies dorsales café oscuro y pequeñas manchas verdes, de forma irregular, en mayor número hacia la cabeza; flancos troncales, ingle, porción proximal ventral de brazo y región posterior de muslo, pierna y pie ocultos de color verde con tinte verde azulado y manchitas café; región cloacal, plantas, y palmas amarillo intenso; flancos, hacia región ventral, con manchas azulosas; gula crema-verdoso con manchas en disposición transversa

café hacia el pecho, superficies ventrales café claro, un ejemplar café azulado. En juveniles predomina el color verde con manchitas café; región posterior de muslo café con puntos verdes; ventralmente anaranjado con manchas café. Iris verde "cítrico" brillante.

Coloración en etanol 70%. El color café oscuro del fondo se conserva, los tintes verde azulado y naranja se tornan crema o amarillo pálido.

Coloración de las larvas. Dorsalmente con amplio margen rostral crema, dos manchas amarillas alargadas simétricas, posteriores a los ojos, dirigidas posteriormente de la región interorbital a los márgenes corporales, otras más pequeñas en región posterior corporal. Margen dorsal de la musculatura caudal con una banda delgada de cromatóforos café oscuro. Margen de aletas con agrupación longitudinal de cromatóforos, en mediana densidad, que alcanzan los dos tercios anteriores caudales. Ventralmente cuerpo translúcido con algunos cromatóforos café oscuro.

Dimensiones del holótipo. (en mm) longitud rostro-urostilar 31,00; anchura cefálica 8,50; longitud cefálica 9,40; longitud femoral 14,20; longitud tibial 14,90; longitud del pie 12,60; diámetro ocular anteroposterior 2,90; distancia ojo-narina 2,80; distancia órbita-extremo rostral (cuerda) 4,70; menor distancia interorbital 3,10; anchura del párpado superior 2,20. Para la variabilidad morfométrica y de proporciones corporales, ver Tabla 1.

Aspectos ecológicos. Los machos adultos fueron colectados junto con las larvas durante el día, en una pequeña quebrada, algo angosta, muy asociados a gran cantidad de piedras cubiertas de musgo y líquenes, la hembra se encontró aleadaña a la quebrada, movilizándose y los juveniles en el bosque. La quebrada atraviesa un bosque muy húmedo premontano, cuyas especies madereras con importancia económica fueron taladas en años anteriores, lamentablemente en zona aleadaña a la colección de las larvas, en época reciente se cortó totalmente la vegetación para sembrar yuca y plátano, lo cual es altamente preocupante, por el interés que mostraron los campesinos de la zona en continuar aumentando el área de cultivo, dejando totalmente desprotegida la quebrada.

Distribución. Especie conocida hasta el momento sólo en la localidad típica.

Relaciones taxonómicas

Atelopus sonsonensis muestra afinidad con *A. sernai*, de la Serranía de las Baldías, Municipio de Bello,

Antioquia, especialmente en el tamaño, LR-U en la hembra adulta 31.0mm y 21.7-28.8mm en los machos adultos, *versus* 30.0-33.0mm en hembras y 20.8-26.0mm en machos de *A. sernai*. Se diferencian (caracteres de *A. sernai* en paréntesis) por poseer un rostro largo (rostro corto); una proporción de la tibia con relación a la longitud rostro-urostilar mayor, 48% en hembra, 40-52%, $\bar{X}=48$, $S=0.02$ en machos (en hembras 37-40%, $\bar{X}=39$, $S=0.01$, $n=4$, y en machos 36-41%, $n=2$); una falange en el primer dedo manual (dos falanges); apófisis neurales de todas las vértebras troncales prominentes (apófisis neurales de vértebras troncales no sobresalientes); textura de la piel en el tronco, flancos, muslos y piernas con tubérculos subcónicos moderadamente grandes (textura de superficies expuestas de cabeza y tronco de liso a finamente granular, en algunos casos con espículas blancuecinas, esporádicas hacia los flancos, miembros anteriores y posteriores con densas pústulas pequeñas). Color *in vivo* en hembras y machos de *A. sernai*, las superficies expuestas son de color café rojizo con manchas, y vermiculaciones verde opaco, los flancos café rojizo con manchas amarillentas, gula, pecho, vientre, muslos y plantas naranja con puntos manchas o motas café oscuro. Adicionalmente las larvas de *A. sernai* poseen el cuerpo y primer quinto caudal café oscuro (en formol 10%), con una área incolora medial grande (en vivo pudo ser amarilla o crema) y un par más pequeñas a cada lado en el extremo rostral, la mitad anterior dorsal y la ventral de las aletas con algunos cromatóforos dispersos, el extremo posterior caudal con flecos negros poco densos, musculatura caudal crema.

A. sonsonensis también muestra semejanzas con *A. minutulus*, pues hace parte del grupo de especies de tamaño pequeño a moderado, se diferencia por (características de *A. minutulus* en paréntesis) el tamaño ligeramente mayor, hembra adulta 31,0 mm, machos adultos 21.7-28.8 (24.70-25.45mm en hembras, 17.10-19.9mm en machos); primer dedo manual embebido dentro de la palmeadura manual (primer dedo manual claramente diferenciado exteriormente); crestas timpánicas prominentes, romas, algo obtusas, de dirección convergente hacia el plano sagital (crestas timpánicas no exostosadas); apófisis neurales de todas las vértebras troncales prominentes, observables a manera de línea protuberante (espinas neurales exteriormente no sobresalientes); hembra con superficie dorsal café oscuro, machos con superficie dorsal café oscura y algunas manchas difusas verde hacia cabeza, (hembras y machos con partes superiores verdes y retículo pardo oscuro). Las larvas de *A. minutulus*, (en formol al 10%), exhiben un amplio contorno corporal translúcido, el cuerpo dorsalmente café, con algunas

áreas translúcidas pequeñas en la región posterior, cola en vista dorsal con una banda medial café, márgenes laterales más claros.

A. sonsonensis se diferencia de *A. nicefori*, presente en la vertiente occidental de la Cordillera Occidental, municipio de Urao, Departamento de Antioquia, 1800-2670m., por ser ligeramente más grande, ya que la serie topotípica de *A. nicefori* del Instituto de Ciencias Naturales, Ruiz *et. al.* (1988) tiene un tamaño menor (LR-U=16.4-29.3mm, $\bar{X}=23,44$ mm en hembras y 17.6-21.23mm, $\bar{X}=19.86$ mm en machos); miembros posteriores más cortos (LF/LR-U= 39.13-44.28%, $\bar{X}=41,28$, $S=1.51$, $n=12$ en hembras, y 42.97-46.60%, $\bar{X}=44.49$ %, $S=1.31$ en machos; LT/LR-U=36.58-42.29%, $\bar{X}=39.22$, $S=1.62$ en hembras, 39.68-44.35%, $\bar{X}=41.91$, $S=1.72$ en machos) y por el color *in vivo* con una superficie dorsal tanto en hembras como en machos verde oscuro pino, con algunas manchas negras, flancos verde-amarillentos, vientre y región gular amarillosos con franja verdosa en base de miembros inferiores. Las larvas de *A. nicefori*, (en formol 10%), presentan un contorno anterior corporal translúcido, con algunos cromatóforos café, resto corporal con una densidad mayor de cromatóforos, además un par de bandas paralelas, laterales caudales café oscuro.

En tamaño *A. sonsonensis* es muy similar, aunque ligeramente más pequeño que *A. quimbaya*, del flanco occidental de la Cordillera Central, Parque Regional de Ucumari, Departamento de Risaralda, con una LR-U= 30.22-32.34mm, $\bar{X}=32,46$ mm, $S=2,25$, $n=5$ en hembras y 22.52-27.32, $\bar{X}=25.05$ mm, $S=1.10$, $n=14$ en machos; una proporción LT/LR-U menor, 38-42%, $\bar{X}=40$ %, $S=0.015$, $n=5$ en hembras y 39-45%, $\bar{X}=41$ %, $S=0.01$, $n=16$ en machos; no muestra dimorfismo en el color, *in vivo* superficies expuestas gris, gris verdoso o gris castaño, con puntos gruesos café oscuro que pueden formar flecos o bandas longitudinales, manchas amarillas pequeñas, en disposición variable en cabeza y tronco, gula y pecho café claro y vientre amarillento, gula amarilla a crema rosáceo en machos. Las larvas *in vivo* de *A. quimbaya* muestran un contorno rostral y anterior corporal amarillosos, cuerpo dorsal y ventralmente negro, con cromatóforos de distribución regular, poco densa, mitad superior de la musculatura caudal oculta por pigmentación negra, densa y uniforme de la piel.

Discusión

La especie aquí descrita es asignable al grupo *A. longirostris* Peters 1973 basado en las proporciones corporales. Pero como bien lo anotan Lynch (1993) y Ruiz

& Osorno-M (1994) existe inconsistencias en los caracteres utilizados para incluir las especies en los dos grupos, *longirostris* o *ignescens*, ya que en cualquiera de ellos se presentan especies con miembros posteriores largos o cortos con relación a la longitud del cuerpo, de colores vistosos o no y por encima o por debajo de los 2000 m.

Lynch (1993) y Ruiz-C & Osorno-M (1994) plantean que la presencia de una falange en el primer dedo manual podría ser de mayor utilidad para construir grupos naturales dentro del género *Atelopus*, dado que es un carácter derivado dentro de los bufónidos y por lo tanto brindaría información sobre las relaciones filogenéticas, contrario a lo que ocurre con la presencia de dos falanges, carácter compartido por algunas especies de los géneros *Atelopus*, *Frostius* y *Osornophryne*. Pero es interesante anotar que la especie más afín a *A. sonsonensis*, tanto en proporciones corporales, como en el patrón de coloración y al área geográfica ocupada es *A. sernai*, pero difiere, entre otras cosas, por la presencia de dos falanges en el primer dedo manual, lo que llevaría a pensar en la necesidad de continuar en la búsqueda de otros caracteres que dilucidan apropiadamente las relaciones filogenéticas dentro del género.

Además de las afinidades o diferencias entre los adultos, creemos importante tener muy en cuenta, en consideraciones filogenéticas, las formas larvales; la morfología en general y en parte la morfometría de los renacuajos es muy similar, pero exhiben patrones de coloración bien definidos, con una mínima variación ontogénica, lo que permite diferenciar las especies entre sí y más aún formar grupos al combinarse con caracteres exhibidos por los adultos.

Las larvas de las especies existentes en Colombia muestran dos patrones básicos de coloración corporal, combinados con algunas características cromáticas caudales que permiten diferenciarlas entre sí. Uno de los patrones consiste en la presencia de múltiples manchas corporales con una organización simétrica o asimétrica muy conspicua, en el caso de *A. subornatus*, *A. simulatus*, *A. elegans*, *A. eusebianus*, *A. famelicus*, *A. farci* y *A. pictiventris*, además de varias indescritas; el segundo patrón consiste en una coloración negra o café uniforme en todo el cuerpo, en algunos casos con los márgenes corporales algo claros, presente en *A. e. marinkellei*, *A. muisca*, *A. nahumae*, *A. quimbaya*, *A. sernai*, *A. minutulus*, y *A. nicefori*. Como hipótesis de las relaciones filogenéticas se podría asumir que la ausencia de un patrón de coloración en las larvas es un carácter primitivo.

Tabla 1. Variabilidad morfométrica (en mm) y de proporciones (en %) de la serie típica de *Atelopus sonsonensis* sp. nov.

	Machos n=14	Hembra n=1		Machos n=14	Hembra n=1
LR-U	V= 21,7-28,8 \bar{X} = 23,3 S= 1,71	31,0	ACx100/LR-U	V= 23-32 \bar{X} = 29 S= 0,02	27
LC	V= 7,0-8,1 \bar{X} = 7,5 S= 0,30	9,4	ACx100/LC	V= 83-100 \bar{X} = 90 S= 0,04	90
AC	V= 6,3-7,3 \bar{X} = 6,8 S= 0,28	8,5	LCx100/LR-U	V= 25-36 \bar{X} = 32 S= 0,03	30
LT	V= 10,2-11,6 \bar{X} = 11,1 S= 0,47	14,9	APx100/DIO	V= 62-105 \bar{X} = 82 S= 0,10	71
LP	V= 8,0-10,3 \bar{X} = 9,46 S= 0,53	12,6	DIOx100/AC	V= 34-45 \bar{X} = 38 S= 0,03	36
LF	V= 10,10-11,75 \bar{X} = 10,87 S= 0,44	14,20	LTx100/LR-U	V= 40-52 \bar{X} = 48 S= 0,03	48
DO	V= 2,3-2,8 \bar{X} = 2,5 S= 0,13	2,9	LPx100/LR-U	V= 32-45 \bar{X} = 41 S= 0,04	41
DIO	V= 2,2-2,9 \bar{X} = 2,6 S= 0,23	3,1	LFx100/LR-U	V= 39-50 \bar{X} = 47 S= 0,03	46
DON	V= 1,7-2,7 \bar{X} = 2,1 S= 0,25	2,8	LT/LF	V= 97-105 \bar{X} = 102 S= 0,02	105
O-R	V= 3,6-4,3 \bar{X} = 3,9 S= 0,19	4,7	DONx100/DO	V= 63-108 \bar{X} = 85 S= 0,12	97
AP	V= 1,8-2,3 \bar{X} = 2,1 S= 0,11	2,2	DOx100/OR	V= 60-75 \bar{X} = 66 S= 0,05	62

vo, compartido con larvas de *Bufo marinus* o del grupo *Bufo typhonius*, pero para tal efecto se necesita realizar un trabajo detallado de descripción y análisis de los diseños corporales de larvas inter e intra genéricas.

Por ahora nos referimos al patrón de coloración de las especies más afines a *A. sonsonensis* como un carácter útil para establecer diferencias taxonómicas. Los adultos de *A. sonsonensis* y *A. sernai* son muy similares, pero las larvas son claramente diferenciables por la presencia de un par de manchas simétricas, alargadas, posteriores a los ojos, de color amarillo y la ausencia de retículo caudal en *A. sonsonensis*, mientras que *A. sernai* tiene una área redondeada, sin pigmentación y un par más lateral en el extremo rostral (que pudieron ser amarillas en vivo), el cuerpo en general y el primer quinto caudal es de color uniforme café oscuro y presenta algunos flecos en la porción distal caudal. Las larvas de *A. minutulus*, *A. nicefori* y *A. quimbaya* exhiben un amplio contorno corporal translúcido y un cuerpo dorsalmente café uniforme. *A. minutulus* exhibe en la cola, en vista dorsal una amplia banda café y hacia los márgenes laterales menos pigmentación. *A. nicefori* y *A. quimbaya* presentan en la porción proximal caudal y en los márgenes una pigmentación café oscura que se hace más clara hacia la región medial. *A. quimbaya* presenta una pigmentación epidérmica caudal con cromatóforos en alta densidad que cubren la mitad dorsal de la musculatura, en vista ventral hay muy pocos o ningún cromatóforo. *A. nicefori* presenta una pigmentación muy clara en la cola, y en vista ventral tiene abundantes cromatóforos.

Agradecimientos

El material fue colectado durante el desarrollo del Inventario de Fauna del Suroriente de Antioquia, auspiciado por la Asociación de Biólogos de la Universidad de Antioquia y la Corporación Autónoma Regional de los ríos Rionegro, Nare, CORNARE. Especial agradecimiento a los biólogos Manuel Peña y Carlos Cuartas, por su

ayuda en campo y en especial a la familia Hincapié, de la Vereda San Francisco, en Sonsón y a las familias Londoño y Torres en Medellín, por su grata hospitalidad y su incondicional colaboración. También gracias a Ruth A. Estupiñán y Juan Carlos Pinzón por su dirección en la ejecución de los dibujos. Las fotos fueron tomadas por Manuel Peña.

Bibliografía

- Altig, R. & G. Johnston.** 1989. Guilds of anuran larvae: relationships among developmental modes, morphologies and habitats. *Herpetological Monographs* (3): 81-109.
- Espinal, L.** 1992. Geografía ecológica de Antioquia. Zonas de Vida. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias y Facultad de Ciencias Agropecuarias. Seccional Medellín, 146pp.
- Fabrezi, M.** 1992. El carpo de los Anuros. *Alytes* 10 (1): 1-29.
- _____. 1993. The anuran tarsus. *Alytes* 11 (2): 47-63.
- Lotter, S.** 1996. The neotropical toad genus *Atelopus*. M. Vences & F. Glaw Verlags. Koln, Germany, 143pp.
- Lynch, J.D.** 1993. A new harlequin frog from the Cordillera Oriental of Colombia (Anura, Bufonidae, *Atelopus*). *Alytes*, 11 (3): 77-87.
- Peters, J.A.** 1973. The frogs genus *Atelopus* in Ecuador (Anura: Bufonidae). *Smithsonian. Contrib. Zool.* (45): 1-49.
- Ruiz-C., M.C. Ardila-R. & J.D. Lynch.** 1996. Lista actualizada de la lista de Amphibia de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 20 (77): 365-415.
- Ruiz-C., J. Hernández-C. & M.C. Ardila-R.** 1988. Una nueva especie de *Atelopus* A.M.C. Dumeril & Bibron 1841 (Amphibia: Bufonidae) de la Cordillera Oriental de Colombia. *Trianea*, 1: 57-69.
- Ruiz-C., P.M. & M. Osorno-M.** 1994. Tres nuevas especies de *Atelopus* A.M.C. Dumeril & Bibron 1841 (Amphibia: Bufonidae) de la Cordillera Central de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 19 (72): 165-179.
- Trewawas, E.** 1933. The hyoid and larinx of the Anura. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.* 222 (10): 257pp.
- Trueb L.** 1973. Bones, frogs and Evolution. En: Vial (ed.). *Evolutionary biology of the Anurans.* University of Missouri Press. Columbia. U.S.A. Págs. 65-132.

LA DINAMICA DE LAS REACCIONES QUIMICAS ULTRARRAPIDAS EN RACIMOS MOLECULARES IONICOS

por
Eduardo A. Castro*

Introducción

En la mayoría de las reacciones químicas los reactantes y los productos no se encuentran aislados sino que están en contacto con sus vecinos. Aun un solvente que sólo perturbe débilmente a los reactivos puede influir marcadamente en el caso de la reacción, ya sea bloqueando la salida de un átomo que se separa o quitando el exceso de energía de los productos o de las especies intermedias reactivas. Uno de los ejemplos más ilustrativos y bien estudiado en este terreno es la fotodisociación y la recombinación de la molécula de I_2 en solventes no polares ¹ racimos ² y matrices sólidas ³.

Los efectos del solvente se hacen más importantes cuando la reacción química involucra especies cargadas ya que las fuerzas entre un soluto jónico y un solvente polar o polarizable pueden llegar a ser tan intensas como las fuerzas de unión química entre los mismos reactantes. Entonces, el solvente no solamente interrumpe y

redirecciona el movimiento del soluto aislado sobre la s superficies de energía potencial, sino que en verdad modifica la topología de tal superficie. Nada de esto es totalmente novedoso para los químicos, quienes saben desde hace mucho tiempo que un solvente puede llegar a estabilizar el estado de transición de una reacción de un modo diferente a lo que lo hace con reactivos y/o productos. Sin embargo, la tarea de comprender acabadamente la influencia total de las interacciones solvente-soluto sobre la dinámica de la reacción química ha sido siempre bastante complicada.

El propósito de esta nota de actualización y divulgación es el de describir algunos de los últimos aportes al estudio de la dinámica molecular por medio de nuevas técnicas experimentales así como analizar algunas nuevas perspectivas se abren en este fascinante campo de la química y cuales serían algunos de los próximos pasos a seguir en la investigación y el desarrollo de las reacciones químicas.

Dinámica química en racimos

Actualmente se están utilizando nuevas técnicas experimentales para estudiar todas las cuestiones atientes a la dinámica molecular en entornos bien caracterizados de solventes y en escalas de tiempo muy pequeñas. A través de la estimulación de moléculas con pulsos de luz láser que tienen una duración de unas pocas decenas de femtosegundos, es dable poder observar la rotura de los enlaces químicos y su nueva formación en una escala real de tiempo. Estudiando las reacciones químicas en pequeños racimos en fase gaseosa se pueden ana-

* CEQUINOR, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, C.C. 962, (1900) La Plata, Argentina.

E-Mail: castro@nahuel,biol,unlp,edu,ar

FAX: 54 - 1 - 259485

¹ A. L. Flarris, J. K. Brown y C. B. Harris, 1988. *Annu. Rev. Phys. Chem.* 39 341.

² Q. Liu, J. -K. Wang y A. LI. Zewail, 1993. *Nature* 364 427.

³ R. Zadoyan, Z. Li, C. C. Martens y V. A. Apkarian, 1994. *J Chem. Phys.* 101 6648.

lizar los efectos del solvente a una escala molecular. Los racimos son particularmente apropiados para el estudio de sistemas iónicos ya que los agregados de dimensiones bien definidos se pueden seleccionar satisfactoriamente con un espectrómetro de masas. Así, recientemente se ha descrito el empleo de esta clase de técnica para investigar la influencia de un solvente sobre la fotodisociación de un ion molecular⁴. Este trabajo se basa en unos experimentos pioneros en el tema^{5,6}. Son de especial importancia dos estudios recientes acerca del I_2 en racimos de Ar⁷⁻⁹. En el primero de ellos, los iones del racimo se generan en una expansión y luego se seleccionan los iones de una medida especificada por medio de un espectrómetro de masas. Luego, con un pulso de luz láser que tiene una duración de varios nanosegundos se disocian los solutos dentro de esos racimos y un espectrómetro de masas determina la distribución de dimensiones de los productos de la fotodisociación. Seleccionando aquellos fragmentos cuyas masas corresponden a los racimos constituidos alrededor de los iones I y I^+ , el experimento determina el grado hasta el cual la «caja» de solvente es capaz de forzar a los átomos disociados a unirse nuevamente. Se encontró que el grado de encajonamiento en función de las dimensiones del racimo es marcadamente rápido, alcanzando un 100% en racimos que poseen menos que una sola capa de solvente alrededor del ion. Varios estudios cuidadosos sobre el análisis de la distribución de masas de los fotofragmentos permitieron concluir que algunos de los productos «encajonados» no contenían I^+ en su estado electrónico y vibracional fundamental sino que estaban constituidos por algunas clases de especies metaestables. La identidad de estas especies no pudo ser determinada a partir solamente del espectro de masas, aunque algunas simulaciones teóricas sobre

la base de la dinámica molecular¹⁰⁻¹² permiten sugerir que el I^+ se encuentra recombinado en un estado electrónico excitado débilmente enlazado, pero con una relativamente larga vida media. La figura ilustra esta situación.

En el segundo experimento, un pulso de luz láser del orden del femtosegundo disocia al soluto y un segundo pulso demorado y del mismo orden de duración demuestra la reaparición del I^+ cerca del fondo del pozo de potencial que corresponde al estado fundamental. Los investigadores concluyeron que la escala de tiempo para el ciclo total de los procesos de fotodisociación, recombinación y relajación es de 100 a 200 ps⁷⁻⁹.

El otro grupo de investigadores^{5,6} también comenzó sus investigaciones disociando racimos de $I^+ - Ar_n$ preseleccionados dimensionalmente con un pulso láser del orden del femtosegundo, pero luego siguieron la evolución de aquellos con un segundo pulso de luz en la región ultravioleta y del orden del femtosegundo, el cual separa al electrón en exceso del anión. Midiendo la energía cinética de los electrones eyectados se pudo determinar la electroafinidad de las especies transientes. Esta técnica, denominada «*Espectroscopía Fotoelectrónica del Femtosegundo*» (FPES), permite realizar una prueba directa del entorno local del electrón separado, el cual es sensible tanto a las interacciones químicas de unión dentro del soluto como a las interacciones entre el soluto y el solvente.

Cuando este experimento se lleva a cabo con el soluto aislado, el espectro fotoelectrónico cambia suavemente desde una forma característica del I^+ a otra propia del I sobre un período de 200 fs, lo cual indica que luego de este lapso el electrón se encuentra localizado sobre un solo átomo. Cuando el soluto se aloja en un racimo de 6 átomos de Ar, el espectro fotoelectrónico transiente pone de relieve que luego de haberse localizado, la carga sigue sintiendo la influencia de varios átomos del solvente por alrededor de 1 ps, el tiempo requerido para que el ion I» pueda escaparse del racimo. Los cálculos teóricos realizados en el marco de la dinámica molecular paa modelar el modo en que el solvente interactúa con

⁴ B. J. Greenblatt, M. T. Zanni y D. M. Neumark, 1997 *Science* 276 1675.

⁵ M. L. Alexander, N. E. Levinger, M. A. Jollinson, D. Ray y W. C. Lineberger, 1988. *J Chem. Phys.* 88 6200.

⁶ J. M. Papanikolas y col., 1993 *J Chem. Phys.* 99 8733.

⁷ V. Versa, P. J. Campagnola, S. Nandi, M. Larsson y W. C. Lineberger, 1996 *J Chem. Phys.* 105 2298.

⁸ V. Vorsa, P. J. Campagnola, S. Nandi, M. Larsson y W. C. Lineberger, 1995 *J Chem. Phys.* 105 2298.

⁹ V. Vorsa, P. J. Campagnola, S. Nandi, M. Larsson y W. C. Lineberger, 1997 *J Chem. Phys.* 106 1402.

¹⁰ V. Batista y D. F. Coker, 1997 *J Chem. Phys.* 106 7102.

¹¹ J. Faeder, N. Delaney, P. E. Maslen y R. Parson, 1997 *Chem. Phys. Lett.* 270 196.

¹² J. Faeder y R. Parson (enviado).

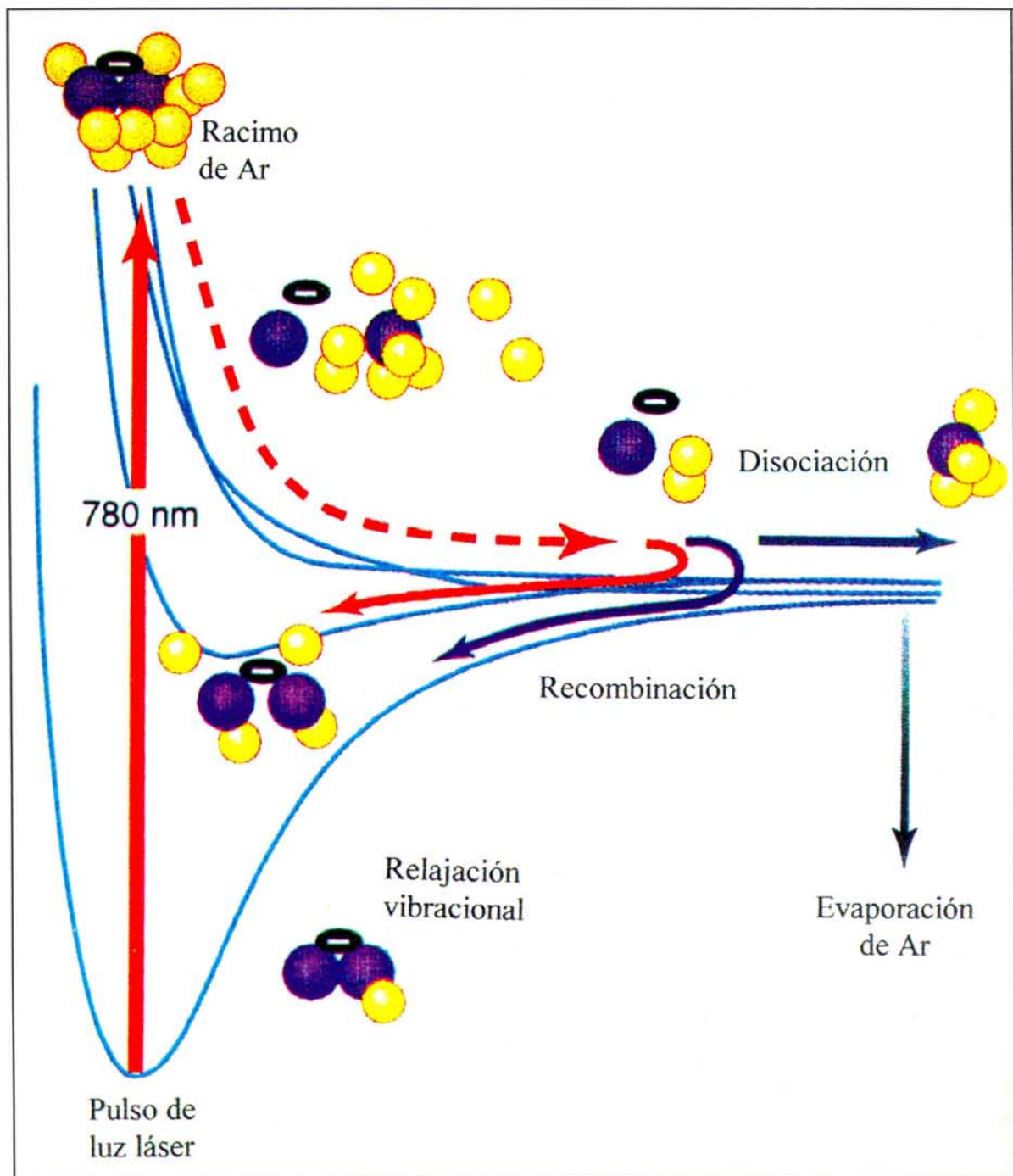


Figura Dinámica química en racimos. Un pulso ultracorto de luz láser a una longitud de onda de 780 nm fotodisocia un ion de I_2^- (color violeta) embebido en un racimo de átomos de Ar (color amarillo). La fuerte atracción entre el ion y el solvente polarizable puede producir un fenómeno tal que los átomos se recombinan en el estado electrónico fundamental (camino oscuro) o un estado metaestable (camino rojo). La subsecuente relajación vibracional es acompañada por una evaporación del solvente. Estos procesos dejan huellas identificables en el espectro fotoelectrónico resuelto en el tiempo de las especies transientes.

la carga localizada del soluto predicen cambios en la electroafinidad que concuerdan muy bien con los datos experimentales.¹²

En racimos más extendidos, el espectro fotoelectrónico transiente se desarrolla de una manera más complicada. En efecto, durante el primer picosegundo, dicho espectro se asemeja al del racimo pequeño, pero en lapsos más prolongados aparecen estructuras peculiares adicionales, las cuales se pueden atribuir a la formación del I_2^- recombinado tanto en el estado fundamental como en otros estados excitados. La recombinación en estados excitados comienza alrededor de 1 ps luego de la excitación y se completa en unos 35 ps, mientras que las características propias del estado fundamental de I_2^- aparecen entre los 4 y 10 ps luego de la excitación y continúan desenvolviéndose hasta unos 200 ps, al tiempo que la molécula entrega energía al racimo. Este tiempo de vida es mucho mayor que los 3 a 6 ps que corresponden al período de relajación vibracional del I_2^- en líquidos polares y no polares^{13,14}. Aunque es dable esperar que el Ar sea menos efectivo en su acción de inducir la transferencia de energía vibracional que una molécula poliatómica se debe tener en cuenta otro factor en la acción del racimo, el cual no posee análogo alguno en la fase líquida: el solvente se evapora durante el proceso de relajación. Así, en lapsos prolongados el solvente se pierde completamente y una relajación posterior ya no es posible. Entonces la escala de tiempo extendida resulta de la interacción mutua entre el relajamiento vibracional y el enfriamiento evaporativo, antes que la sola relajación vibratoria. Siguiendo la evolución temporal del espectro fotoelectrónico transiente⁴ se ha podido confirmar que las

dos clases de productos de la fotodisociación observados oportunamente^{7,9} corresponden a los estados electrónicos diferentes del soluto, y ellos determinan las escalas de tiempo para los procesos de recombinación y relajamiento en cada uno de tales estados.

Conclusión

A lo largo de esta descripción sumaria hemos visto que en un solo experimento⁴ se pudo derivar un panorama coherente y satisfactorio de los distintos procesos de recombinación, relajación y evaporación que siguen al fenómeno de la fotodisociación de un ion molecular diatómico embebido en un racimo de átomos de Ar. Evidentemente, experimentos similares con solventes más complejos podrían ser de gran interés. Mientras que los átomos de Ar ejercen una acción perturbativa sobre un soluto iónico mucho más intensa que sobre una molécula neutra, las interacciones específicas son todavía mucho más débiles que aquellas que se establecen entre un ion y un conjunto de moléculas polares. En verdad, el estudio de los solutos poliatómicos sería bastante más exigente, ya que habitualmente existen diferentes caminos de reacción para la molécula aislada. A partir de experimentos con racimos como los aquí descritos, se puede conjeturar que se avance en el comienzo no solamente de las interacciones moleculares y la dinámica de las reacciones químicas en fases condensadas sino que también se llegue a incrementar la comprensión acerca de los procesos que son únicos en este estado intermedio de agregación de la materia¹⁵.

¹³ I. Benjamin, P. F. Barbara, J. T. Flynnes y B. J. Gertner, 1995 *J. Phys. Chem.* 99 7557.

¹⁴ P. K. Walhout, J. C. Alfaro, K. A. M. Thakur y P. F. Barbara, *J Phys. Chem.* 99 758.

¹⁵ R. Parson y J. Faeder, 1997 *Science* 276 1660.

SIGBMA SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA PARA LA DETERMINACION DE BIOMAS MODIFICADOS POR ACCION NATURAL O ANTROPICA

por

Leyla J. García*

Resumen

García, Leyla J.: Sigbma. Sistema de información geográfica para la determinación de biomas modificados por acción natural o antrópica

Los SIG (Sistemas de Información Geográfica) proveen elementos útiles para el desarrollo de aplicaciones computables para la conservación ambiental. Aquí se muestra un sistema que permite la generación de coberturas vegetales a partir de modelos teóricos y la comparación para el establecimiento de modificaciones en los biomas presentes. Inicialmente se presenta una breve reseña de los SIG tras lo cual se describe SIGBMA, con sus partes y su funcionamiento.

Introducción

La conservación del medio ambiente es un tema de interés general y la informática tiene la posibilidad de realizar grandes aportes en este campo; sin embargo, en Colombia poco se ha aprovechado tal tecnología.

Las herramientas computacionales actuales permiten desde la visualización hasta la simulación. Es posible desarrollar aplicaciones que muestren la localización de las especies animales y vegetales de una zona, aporten elementos útiles para la toma de decisiones en parques y reservas naturales, presenten el comportamiento de un desastre natural y su avance en el tiempo, etc.

SIGBMA, la aplicación que nos ocupa encaja en la descripción del segundo grupo. Esta herramienta está diseñada para definir zonas de vida - biomas - e indicar qué fenóme-

no de modificación se presenta (i.e. erosión, formación de sabanas y desiertos etc.); esto a partir de modelos teóricos que señalen la distribución de los biomas de acuerdo con variables climáticas o de altitud y coberturas de biomas reales (obtenidos mediante fotografía aérea, imágenes de satélite o digitalización de mapas). La determinación de estas zonas es de gran utilidad para las autoridades ambientales en la toma de decisiones que permitan reducir la alteración del medio biótico. Para el caso de SIGBMA se ha utilizado como zona piloto el Parque Nacional Natural Chingaza.

SIG: Sistemas de información geográfica

Existen diferentes acepciones sobre los SIG pero la definición que nos atañe es la siguiente: Los SIG son herramientas computacionales y aplicaciones informáticas que proveen facilidades para el análisis de información geográfica, espacial o geo-referenciada.

Un SIG maneja datos tanto alfanuméricos como espaciales, siempre ligados por referirse a algún lugar

* Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Sistemas y Computación.

localizable mediante un par de coordenadas cartesianas o por la longitud y latitud. Los primeros pueden ser el nombre de una localidad, el área de una zona o alguna característica que se considere relevante. El segundo tipo de datos se distingue por presentar una posición, absoluta o relativa, y por tener un tipo que, en cierta forma lo describe; los tipos existentes son: Punto, línea, polígonos o áreas y superficies continuas. Los datos espaciales pueden ser integrados al sistema de varias maneras; entre las más conocidas se encuentran las siguientes: Digitalización de mapas, levantamientos topográficos, fotografía aérea e imágenes de satélite (estos dos últimos copiados por un escanógrafo).

Vale la pena mencionar que los SIG no necesariamente trabajan solos, pueden ser combinados con modelos matemáticos o con "Sistemas Expertos". Entre las posibles aplicaciones están: Modelos hidrológicos, manejo de infraestructuras, planeación de puentes, prevención de desastres, conservación de recursos y especies, etc.

Utilización de modelos teóricos y determinación de biomas modificados

La determinación de la modificación en los ecosistemas y biomas de un parque se puede realizar mediante comparación de las coberturas vegetales teóricas y reales. Para realizar este proceso es necesario identificar con anterioridad los biomas presentes y las alteraciones que se pueden presentar; además es necesario conocer los factores bióticos y ambientales, son relevantes para la caracterización de un bioma.

Las coberturas vegetales reales deben ser incorporadas al sistema en tanto que las teóricas deben ser generadas a partir de modelos que describan la distribución de los biomas de acuerdo con una variable.

Generación de coberturas teóricas

La generación de coberturas teóricas se realiza mediante la definición de un modelo teórico y una cobertura base que indique el comportamiento de éste dentro del parque; son necesarios sólo algunos puntos para este proceso.

Un modelo teórico es una tabla que indica los rangos en los cuales se encuentra un bioma según una variable climática o altitudinal. Por ejemplo, si se desea obtener una cobertura teórica para la temperatura, es necesario definir una tabla como la siguiente:

Temperatura

Bioma	Cota Mínima	Cota Máxima
Selva	20°C	30°C
Bosque	12°C	20°C
Páramo	5°C	12°C

Figura 1. Modelo Teórico

Adicionalmente, debe existir una cobertura que incluya la temperatura para algunos puntos, una red de estaciones climáticas es la indicada para este caso.

De acuerdo con el modelo teórico y la cobertura de base, se realiza la generación de la cobertura teórica que muestra la distribución de los biomas definidos según los datos suministrados.

El ejemplo anterior ilustra la obtención de una cobertura teórica a partir de una variable; sin embargo, es posible generar coberturas para varias variables o para todas las variables que se estén considerando. En estos dos casos es indispensable tener un modelo de decisión que indique qué hacer si de acuerdo con una variable existe un bioma y según otra variable existe otro distinto. Este modelo de decisión puede tomar en cuenta la fecha de las coberturas y otros aspectos que el jefe del parque considere relevantes; tal información debe haber sido definida con anterioridad y almacenada en una tabla.

Determinación de biomas modificados

El proceso de determinación de un bioma modificado se realiza, esencialmente, por comparación; esta comparación se puede hacer contra lo que indica la teoría u observando una misma zona en diferentes momentos en el tiempo. Para este tipo de comparación es necesario tener dos coberturas vegetales, el resultado es un mapa que indica qué zonas han sido modificadas y qué tipo de transformación ha sufrido cada zona.

Una comparación contra la teoría puede tener en cuenta diversas variables, éstas pueden referirse a la altitud o al clima, generando así diferentes posibilidades de modificación dentro de una zona. Las coberturas requeridas para este proceso son una teórica, generada a partir de uno o varios factores determinantes, y una cobertura vegetal real. El segundo tipo de comparación, precisa de dos coberturas vegetales reales correspondientes a diversos momentos. Puede ayudar a identifi-

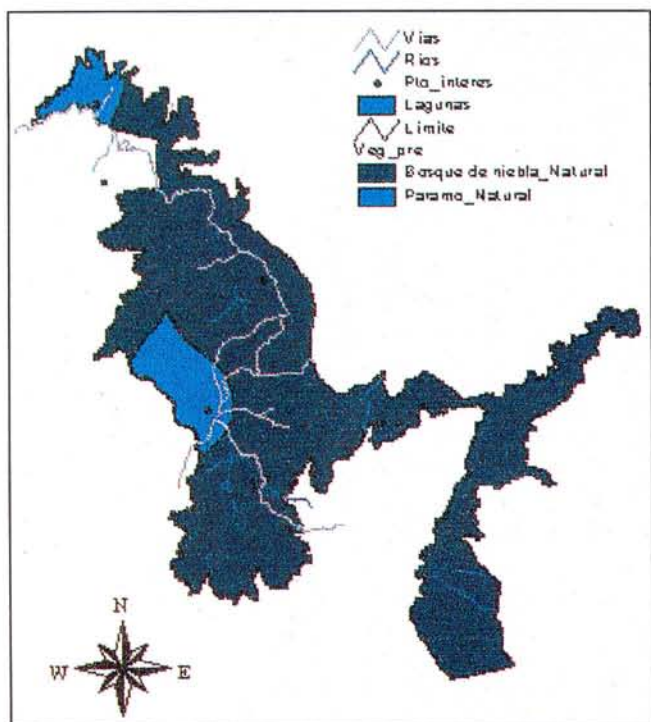


Figura 2. Cobertura teórica a partir de la Precipitación¹

car qué zonas están sufriendo transformaciones dentro del parque, en el caso de este estudio el Parque Natural Chingaza.

SIGBMA

El objetivo principal de este sistema es aportar elementos que le permitan al jefe de un parque o reserva natural tomar decisiones para la conservación de los biomas y la reducción de la alteración de los biomas dentro de su parque. Lo anterior se logra mediante la generación de coberturas conforme a un modelo teórico y la comparación de coberturas vegetales reales y teóricas.

SIGBMA presenta una interfase gráfica de sencillo manejo no sólo para la información alfanumérica sino también para las coberturas; estas son observadas a través de vistas que presentan información general (hidrografía, puestos de control, vías, etc.) y específica (la cobertura misma). El sistema permite manejar varias ca-

tegorías de usuarios y restricciones sobre el acceso de cada una a las distintas posibilidades que contiene la aplicación. El sistema se encuentra dividido en 4 módulos a saber: Manejo de la Base de Datos, Generación de Coberturas, Comparación de Coberturas y Seguridad. A continuación se describe cada uno identificando las funciones que ofrece:

- Manejo de la Base de Datos: Este módulo permite la adición eliminación y consulta de la información que el sistema almacena. Esta información es:
 - Biomas: información, nombre y descripción de los biomas.
 - Fenómenos: modificaciones posibles, (indica el nombre, el bioma inicial y el bioma final). Coberturas: detalles de las coberturas manejadas, nombre, ubicación, clase (base, vegetal, comparación, teórica), vista (nombre que la identifica para la visualización del mapa correspondiente), fecha de la información, etc.
 - Modelos teóricos: tablas que indican los rangos en los que se hallan los biomas de acuerdo con alguna variable).
 - Variables determinantes: variables climáticas y altitud, (se guarda el nombre y la prioridad con respecto a las demás).
 - Tablas de seguridad: aparte de la categoría de usuario y los usuarios mismos, también se almacenan los permisos de acceso para cada categoría de usuario).
- Generación de Coberturas: Este módulo permite la generación de coberturas a partir de modelos teóricos ya definidos. Se pueden generar coberturas simples, (una variable), compuestas, (varias variables), y totales, (todas las variables definidas en el sistema).
- Comparación de Coberturas: La comparación se puede realizar entre una cobertura vegetal real y otra real o teórica. La cobertura que se obtiene indica los biomas y la modificación que se presenta de una cobertura a otra; para esto se tiene en cuenta la fecha de determinación de las coberturas, (se toma como bioma resultado el de fecha más reciente, y teniendo en cuenta el de fecha más lejana, se determina el fenómeno de modificación).
- Seguridad: La seguridad manejada por el sistema se realiza definiendo varias categorías de usuario y res-

¹ La cobertura corresponde al PNN Chingaza y los datos de la precipitación para esta generación son datos de prueba.

tringiendo su acceso a los otros módulos. Cada usuario tiene una identificación y una palabra clave para acceder al sistema; ésta última puede ser cambiada por el usuario o por el administrador del sistema. SIGMA tiene definidas cinco categorías de usuario:

- Administrador del Sistema: Se encarga del mantenimiento y de la seguridad.
- Administrador del Parque: Tiene acceso a todos los módulos del sistema excepto al de Seguridad. Es el encargado del manejo de la información y de las coberturas.
- Guardabosque Administrativo: Pueden generar coberturas, compararlas y visualizarlas. También pueden consultar la información.
- Guardabosque Operativo: Realiza consultas y visualización.
- Visitantes: Pueden realizar consultas de la información almacenada y visualizar coberturas.

La interface de SIGMA, el manejo de la base de datos y la seguridad fueron desarrollados en *Avenue*, lenguaje de programación de *Arcview* y la generación y comparación de coberturas fue implantada en *AML*, lenguaje de programación de *Arc-Info*². La aplicación fue desarrollada como tesis de pregrado para Ingeniería de Sistemas y Computación en la Universidad de los Andes y su versión es la 1.0.

Resultados y mejoras

Resultados

El Sistema que se ha desarrollado presenta una interface de fácil utilización para el usuario; ésta le permite interactuar con la herramienta por medio de botones o de menús y a través de diálogos que facilitan el manejo de la base de datos y de las coberturas incorporadas. Aún más; esta herramienta ofrece varias alternativas útiles al momento de tomar decisiones sobre las zonas de vida de un parque natural, un aspecto de vital importancia dentro de estas áreas.

Por medio de Sistema es posible visualizar los cambios sufridos por los biomas de una zona; estos cambios se pueden observar a través de la comparación de

coberturas vegetales tanto teóricas como reales. La comparación de coberturas teórica contra reales permite establecer los cambios sufridos por los biomas a partir de su estado natural, en tanto que la comparación de coberturas vegetales reales ofrece la posibilidad de identificar las zonas más alteradas con el paso del tiempo.

Otro aspecto de gran interés es la posibilidad de alimentar el Sistema con datos teóricos que permitan el modelaje de una zona en un futuro. El Sistema permite crear modelos teóricos y éstos pueden estar basados en estudios que indiquen los cambios de variables climáticas e hipsográficas dentro de algunos años, teniendo en cuenta diversos fenómenos como la elevación de la temperatura, la destrucción de la capa de ozono, el efecto invernadero, etc. Estos modelos se pueden observar, pudiendo tener una imagen del parque en un futuro, lo cual resulta útil a la hora de tomar decisiones sobre el tratamiento y la protección de los biomas actuales.

Por otra parte, es posible manipular todos los datos del Sistema que permite la adición, consulta y eliminación para cada una de las tablas existentes, garantizando siempre la consistencia de la base de datos. En cuanto a la información gráfica, no sólo se guarda la relacionada directamente con las coberturas, sino también información alfanumérica adicional que permite obtener datos de interés de los mapas almacenados, tales como sus fechas y el origen de la información.

Finalmente, el Sistema presenta varios niveles de acceso de acuerdo con la categoría del usuario, lo cual permite manejar la seguridad y evitar la modificación de la información almacenada por personas no autorizadas.

Posibles mejoras y ampliaciones

A pesar de ser ya una herramienta de gran utilidad para el manejo de los biomas y sus modificaciones, existen algunas ampliaciones que incrementarían el desempeño del Sistema y lo complementarían. A continuación se presentan algunas sugerencias al respecto:

- Comparación con Coberturas no Vegetales: Las coberturas vegetales manejadas por el Sistema podrían ser comparadas con coberturas que indiquen la densidad de uso de la tierra, el tipo de propiedad, la presencia institucional, problemas de orden público, etc. Este tipo de comparaciones mostraría posibles causas para la modificación de los biomas, siendo esto muy útil para la toma de decisiones y para la organización de planes de protección para las diferentes zonas.

² *Arcview* y *Arc-Info* son productos licenciados de software para desarrollo de SIG de la casa ESRI.

- **Adición de Información Vegetal:** La información que se tiene acerca de los biomas no ofrece ningún detalle sobre la vegetación característica y esto podría ser adicionado, no sólo a nivel alfanumérico sino por medio de imágenes y fotografías de las zonas y de las plantas allí presentes.
- **Modelo de Simulación Teórica:** Sería de gran interés al añadir un componente de inteligencia artificial a este Sistema, lo que permitiría el diseño de modelos teóricos a partir de estudios climáticos y hipsográficos. Igualmente podría ser añadido un sistema de simulación para desastres naturales como incendios o, deslizamientos que muestre la recuperación de la vegetación en el tiempo y bajo diversas acciones (reforestación, muros de contención, etc.) que puedan ser tomadas por los directivos del Parque.

Las anteriores son tan sólo algunas de las posibles ampliaciones del Sistema, pero debido a la importancia del tema ecológico y a las numerosas posibilidades que ofrecen los SIG, con seguridad existen mejoras que podrían ser incluidas y aplicadas.

Conclusiones

- El Sistema permite la visualización de los biomas y de sus modificaciones para la toma de decisiones sobre la protección y conservación de los mismos; igualmente, mantiene información relevante para su manejo. Lo anterior es de vital importancia en el cuidado de las áreas protegidas y de las reservas naturales, y es de gran utilidad para su manejo y para la conservación del medio ambiente.
- El Sistema presta su mayor utilidad al administrador del Parque; sin embargo, existen otros tipos de usuarios que pueden disfrutar de las diferentes alternativas ofrecidas.
- Es necesario promover estudios sobre los diferentes biomas existentes en nuestro país. El conocimiento de las zonas de vida es primordial al momento de desarrollar sistemas que de un u otra forma los involucren.
- Los SIG ofrecen grandes posibilidades para la administración del medio ambiente y sus recursos; debido a esto, es fundamental fomentar el desarrollo de este tipo de sistemas.

VIDA ACADEMICA

INFORME PRESENTADO POR EL DR. JOSE A. LOZANO, SECRETARIO DE LA CORPORACION, SOBRE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE EL AÑO ACADEMICO 1997-1998

A continuación se resumen las actividades adelantadas por la Corporación durante el año académico estatutario comprendido entre el 20 de agosto de 1996 y el 19 de agosto de 1997.

SESIONES

a- Junta Directiva

La Junta Directiva sesionó de manera ordinaria en once oportunidades, los primeros miércoles de cada mes, y extraordinariamente en cuatro ocasiones. En estas reuniones tomó las decisiones necesarias para el funcionamiento y orientación de las políticas de la Academia.

El 20 de septiembre se firmó el contrato de asesoría y servicios con el Ministerio de Educación Nacional, correspondiente a 1996, por un valor de \$214.316.805.00, incluidos \$22.216.805.00 que fueron transferidos al Colegio Máximo de las Academias y al Patronato de Artes y Ciencias, mediante el contrato No. 02 de octubre de 1996.

Se dictaron resoluciones sobre viáticos, sobre financiación a proyectos, eventos y publicaciones, se reglamentaron algunos artículos de los estatutos y con la intención de cumplir los objetivos prioritarios de la Academia, en particular el fomento de la investigación científica en los campos de las ciencias exactas, físicas y naturales y el de prestar su cooperación en el mejoramiento de las ciencias en estas ramas del conocimiento en los distintos niveles de la enseñanza, se crearon **la Comisión Permanente para el Fomento de la Investigación**

Científica en los Campos de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, constituida por Don Diógenes Campos, Don José María Rincón y Don Josué Quintero y la **Comisión Permanente para el Mejoramiento de la Enseñanza de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en los distintos niveles de la enseñanza**, constituida por Doña Margarita Perea, Don Carlos Corredor, Don José A. Lozano y Don Luis Guillermo Durán. Estas comisiones iniciaron labores en el segundo semestre del año académico. También se autorizó al Presidente para que con la colaboración del Secretario Ejecutivo coordine y adelante las actividades necesarias, con el fin de impulsar el establecimiento y puesta en marcha del Instituto Interinstitucional Colombiano para el Estudio de las Areas de Alta Montaña (ICEAM).

La Junta Directiva consciente de la necesidad de colocar a la institución en un lugar digno en la red mundial de información WWW, celebró contratos para alquilar un sitio en la red, localizado en los EE.UU, y para colocar y mantener allí la información institucional y científica en su página electrónica.

b- Sesiones Ordinarias

En las ocho reuniones ordinarias celebradas los terceros miércoles de cada mes, entre septiembre de 1996 y julio de 1997, se dictaron las siguientes conferencias:

Septiembre 18: Don Jairo Mojica "El Terremoto del 6 de junio de 1994 en el Suroccidente Colombiano. Interpretación Tectónica"

Octubre 23: Doña Margarita Perea "La Biotecnología en la agricultura del siglo XXI"

Noviembre 20: Don Gabriel Toro "El género Senecio y sus efectos adversos"

Febrero 19: Don José María Rincón "Uso de oxigenados para reducir la contaminación en automotores".

Marzo 19: Don Hernando Groot Liévano "Vida y Obra de César Uribe Piedrahita".

Abril 16: Doña Inés Bernal de Ramírez "Y... ¿Qué es la Cordierita?".

Mayo 21: Don Gabriel Toro "Tumores, Temores y Sistema Nervioso".

Junio 18: Don Efraín Barbosa "El centenario del electrón".

c- Sesiones Especiales

El 21 de agosto durante la sesión Solemne Estatutaria de la Academia Don Santiago Díaz Piedrahita dictó la conferencia "Enrique Pérez Arbeláez y la Fundación de la Academia Colombiana de Ciencias"

En sendas sesiones especiales tomaron posesión once académicos correspondientes, quienes, en la ceremonia de posesión, presentaron los respectivos trabajos científicos preparados especialmente para la ocasión:

Septiembre 11: Don Luis Enrique Moreno Armella: "Matemática, explicar y comprender".

Noviembre 27: Don Diógenes Campos Romero: "Modelo Logístico: Un paradigma en la teoría del caos".

Marzo 12: Don Juan Crisóstomo Martínez Valderrama "Cincuenta años de la resonancia magnética".

Abril 9: Don Pedro Antonio Prieto Pulido "Los primeros diez años de la superconductividad de alta temperatura".

Abril 23: Don Jorge Martínez Collantes "Análisis de series de tiempo con observaciones faltantes".

Mayo 14: Don Gonzalo Andrade Correa "Utilización de las mariposas como bioindicadoras del tipo de hábitat y su biodiversidad en Colombia".

Mayo 28: Don Polidoro Pinto Escobar "José Cuatrecasas, la flora y la vegetación colombiana".

Junio 11: Don Pedro Joseph Nathan "Nuevas anillaciones generadas por transposiciones moleculares a partir del esqueleto del longipineno".

Julio 30: Doña Carmenza Duque Beltrán "Búsqueda de compuestos bioactivos en organismos marinos del Caribe Colombiano".

La Academia promovió a cuatro de sus miembros correspondientes a la categoría de numerarios, quienes durante la ceremonia de posesión pronunciaron los correspondientes discursos de fondo:

Septiembre 25: Don Carlos Corredor "Proteínas: Una hipótesis para explicar la forma como la estructura está relacionada con la función".

Octubre 23: Doña Margarita Perea "Biotecnología en la agricultura del siglo XXI".

Febrero 26: Don Jairo Mojica Corzo "Evolución geológica de Colombia".

Junio 25: Don Enrique Forero "La Sistemática en Colombia en el siglo XXI".

El Colegio Máximo de las Academias continuó la celebración de reuniones de su Junta Directiva. Estas se llevan a cabo, cada mes, en la sede de las diferentes corporaciones que lo constituyen.

SEMINARIOS

Seminario Permanente de Ciencia Teórica

El grupo de Ciencia Teórica mantiene su actividad a través de este seminario, con reuniones periódicas en las instalaciones de la Academia. Los temas tratados y los conferencistas se enumeran a continuación:

Septiembre 19: Don Eugenio Andrade "Aproximación física a los códigos biológicos".

Octubre 17: Don Philippe Binter "Trabajo reciente en caos y sistemas complejos en la Universidad de los Andes".

Noviembre 21: Doña Ligia Parra Esteban "Conocimiento y discurso de la comunicación en ciencia en Colombia".

Diciembre 12: Don Enrique Torres "Vigencia del argumento acerca de la importancia relativa de la contribución ambiental y genética al fenotipo, en la definición de los mecanismos de resistencia de las plantas a sus patógenos".

Marzo 20: Don Alvaro Cadena "La complejidad de los sistemas termodinámicos ... Discurso necesario?".



Posesión de los Académicos Honorarios Don **Luis Duque Gómez** y Don **Hernando Groot Liévano**, durante la sesión solemne estatutaria celebrada el 19 de agosto de 1997.



Entrega del Premio a la Obra Integral de un Científico. Recibe el galardón correspondiente a 1997 Don **Rubén Antonio Vargas Zapata**, físico y profesor de la Universidad del Valle.



Entrega del "Premio Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Academia de Ciencias del Tercer Mundo" para estimular a investigadores jóvenes. Recibe el premio correspondiente a 1997 Gladys Estella Montoya por el trabajo titulado "The evolution the *ssr* RNA genes from *Plasmodium Knowlesi*".

Abril 17: Don Eugenio Andrade "Semiótica de la evolución orgánica".

Mayo 15: Don Víctor Albis "Matematización en las ciencias sociales".

Junio 19: Doña Alicia Guerrero de Mesa "Azar y complejidad".

La Academia, en cooperación con la Universidad Nacional realizo el "Seminario en Conmemoración de los 400 años del nacimiento de Rene Descartes". Las Memorias fueron publicadas como el volumen 9 dentro de la Colección Memorias de la Academia.

Conferencias

Noviembre 26: Don Gabriel Toro presentó su trabajo "El género *Senecio* y sus Efectos Adversos" en el departamento de Biología de la Universidad Nacional.

Agosto 13: El profesor Ignacio Núñez de Castro.S.J. de la Universidad de Málaga, España, dictó la conferencia: "Del antropocentrismo al ecocentrismo. Una nueva visión de la creación" en la nueva sede de la Academia.

En colaboración con la Sociedad Colombiana de Geología se programaron varias conferencias en el auditorio de INGEOMINAS así:

Febrero 20: Don Jaime Orlando Martínez: "Evolución histórica de las islas barrera del sector central de la Costa Pacífica Colombiana".

Abril 30: Don Jaime Galvis Vergara: "Magmatismo en Colombia".

Mayo 29: Don Jaime de Porta V.: "Tafonomía y Paleontología".

Junio 24: Don Thomas van der Hammen: "Agua y medio ambiente en la Sabana de Bogotá" Foro "problema del agua en la Sabana de Bogotá".

FINANCIACION DE PROYECTOS

Se están cofinanciando los proyectos: "Prospección, detección, purificación y caracterización parcial de lectinas de labiadas de Colombia", de Don Gerardo Pérez, "Publicación de los materiales disponibles sobre sismicidad histórica de Colombia", de Don Armando Espinosa, y "Funciones Zeta locales de Igusa. Raciona-

lidad en característica positiva para ciertos tipos de polinomios", de Don Víctor Albis.

PARTICIPACION EN ACTIVIDADES NACIONALES E INTERNACIONALES

La Academia Colombiana de Ciencias continuó su afiliación a y participación en ICSU, IGBP, FELAC, COSTED-IBN y COBIOTECH. En este año se aprobó la afiliación a la International Union for Quaternary Research, INQUA.

Durante este periodo varios miembros participaron en su carácter de académicos o de representantes oficiales de la Academia en los siguientes eventos:

Don Luis Eduardo Mora Osejo pronunció el discurso de inauguración del II Congreso de Genética que se realizó en Santafé de Bogotá, el 19 de septiembre.

Don Hernando Dueñas y Don José A. Lozano participaron en el VII Congreso Colombiano de Geología, en Santafé de Bogotá

Don Luis Eduardo Mora Osejo participó en el Interacademic Panel on International Issues y en la Asamblea General de ICSU en Washington Estados Unidos, el 23 y el 28 de septiembre.

Doña Margarita Perea participó en el XII Congreso Mundial de Bananos y Plátanos, en Santo Domingo, República Dominicana, del 27 de octubre al 1 de noviembre.

Don Luis Eduardo Mora Osejo asistió a la reunión convocada por los Ministerios de Relaciones Exteriores y del Medio Ambiente para crear comités asesores en asuntos relacionados con la Convención Marco de Cambio Climático. Se crearon:

Subcomité No. 1 de Evaluación Científica y Tecnológica, en el cual representan a la Academia Don Thomas van der Hammen, Don José A. Lozano y Don Hernando Dueñas, Subcomité No. 2 de Evaluación de Impactos Sociales, Económicos y Ambientales del Cambio Climático en el País, en el cual la Corporación está representada por los académicos Don Jesús Eslava y Don Humberto Rodríguez.

La Academia es miembro de la Junta Directiva del Instituto Colombiano de Cultura Hispánica, la representa Don Santiago Díaz. También es miembro del Consejo Directivo de la Red de Formación Ambiental, la representa Don José A. Lozano.

Don Luis Eduardo Mora Osejo y Don José A. Lozano participaron en una reunión organizada por Colciencias sobre evaluación ética de los Proyectos Expedición Humana y Gran Expedición Humana.

Don Hernando Groot Liévano participó en la Reunión de Expertos en Ciencia y Tecnología de los países no alineados, realizada en Cartagena de Indias del 17 al 19 de abril.

Don José A. Lozano actuó como coordinador del Taller sobre Cambio Global dentro del Segundo Simposio Latinoamericano de ICASE (International Council of Association for Science Education) en Mar del Plata, Argentina entre el 22 y el 26 de abril y como conferencista invitado del curso Internacional del Manejo Integrado de la Zona Costera en Santa Marta el 18 de abril.

Don Gonzalo Correal participó en el 49 Congreso de Americanistas que se realizó en Quito, entre el 5 y el 12 de julio.

CONCEPTOS

Por solicitud del Ministerio del Medio Ambiente la Academia, con base en los informes preparados por la Comisión Permanente de Parques Naturales constituida por Doña Paulina Muñoz, Don Jorge Hernández y Don Alberto Cadena, emitió concepto sobre las siguientes propuestas:

Propuesta para la ampliación del Parque Nacional Natural Corales del Rosario.

Propuesta para la recategorización y redelimitación del parque Nacional Natural Isla de Salamanca.

PREMIOS

Con el objetivo de premiar la consagración de una vida a la investigación científica y de promover las vocaciones de jóvenes científicos, se convocó a concurso nacional para los premios de la Academia.

En Sesión Solemne, realizada el 21 de agosto se entregó el Premio a la Obra Integral de un Científico, correspondiente al año de 1996, conferido a Don Gonzalo Correal Urrego, y el Premio Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Academia de Ciencias del Tercer Mundo (ACCEFYN-TWAS) para motivar a jóvenes investigadores, en el área de matemáticas, otorgado a Félix Humberto Soriano Méndez por su trabajo presentado en los artículos: "Complex and distributional weights for sieved ultraspherical polynomials" y "On the distributional orthogonality of the general Pollaczewk polynomials".

En 1997 la Academia convocó nuevamente a concurso para los mismos premios.

La Academia entregó premios para los cuatro ganadores de Medallas de Oro, los seis ganadores de medalla de Plata y para los diez ganadores de Medalla de Bronce de las Olimpiadas de Química organizadas por la Universidad Nacional.

BIBLIOTECA LUIS LOPEZ DE MESA

La Academia mantiene su biblioteca "Luis López de Mesa" cuyos volúmenes se incrementan principalmente a través del canje que recibe por las publicaciones propias. La Biblioteca cuenta con 610 títulos de publicaciones periódicas de las cuales 156 están activas.

Además la Academia continúa suscrita a doce títulos de revistas.

En este año se adquirieron 120 nuevos libros, la mitad por donación o canje.

Actualmente se tiene sistematizado el canje en un 100% y el registro de libros en un 30%. Este registro se actualiza a medida que los nuevos títulos van llegando a la Biblioteca.

PUBLICACIONES

La Academia publicó y distribuyó los números 78, 79 y 80 de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Esta se envía a 432 instituciones, 339 de ellas fuera del país.

La Revista y la Gaceta ya están en versión electrónica. En el sitio de la Academia hay una página para los servicios de la Biblioteca sin contar todavía con módulo de búsqueda. Se han creado páginas para los institutos, los grupos de trabajo y proyectos de investigación, incluyendo el grupo de Neurociencias del Hospital Militar.

La Presidencia nombró responsable de las publicaciones electrónicas al Académico de Número Don Víctor Albis.

La Academia publicó y distribuyó los siguientes libros en tres de sus cuatro colecciones así:

Colección Jorge Alvarez Lleras, de monografías científicas

"Insectos de Colombia. Estudios Escogidos" editado por Gonzalo Andrade, Germán Amat y Fernando Fernández.

Colección Enrique Pérez Arbeláez, sobre historia de la Ciencia.

Reedición "La Botánica en Colombia, hechos notables en su desarrollo" de Santiago Díaz Piedrahita.

Luis María Murillo Quinche. Obra selecta. Editada por Santiago Díaz y María Teresa Murillo.

Colección Memorias

Memorias del primer Coloquio "Ciencia, Tecnología y Cultura", editado por Olga Restrepo y Jorge Charum.

Memorias Tercera Escuela de Verano en Geometría Diferencial, Ecuaciones Diferenciales Parciales y Análisis Numérico, editado por José Escobar y Jaime Lesmes.

Memorias del Seminario de Ciencia Teórica, editado por Alvaro Cadena y Eugenio Andrade.

Memorias del Seminario en Conmemoración de los 400 años del Nacimiento de Rene Descartes, editado por Don Víctor Albis, Jorge Charum, Clara Helena Sánchez y Gonzalo Serrano.

La Academia donó cien ejemplares de la publicación "Cartas de Caldas" a la Comisión de Honor de la Sociedad Bolivariana de Colombia para distribuirlos en Bibliotecas a nivel nacional.

La Academia financió la elaboración de las artes finales del libro "Colombia Diversidad Biotica II, editado por Orlando Rangel.

Con financiación de "B.P. Exploration Company (Colombia), la Academia Colombiana de Ciencias publicará 3.000 ejemplares del Libro: Ciencia para entender el mundo del mañana: Cambio Global" para distribución en Colombia y Latinoamérica.

SEDE DE LA ACADEMIA

Como culminación del esfuerzo realizado por las diferentes Juntas Directivas y muy especialmente por su presidente, Don Luis Eduardo Mora Osejo, se inauguró el 3 de julio de 1997 la sede propia de la Academia.

También ya firmó el Señor Presidente, la promesa de compraventa de la casa contigua, que alojará la Biblioteca "Luis López de Mesa", una vez que se hagan las modificaciones necesarias.