

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXV

SEPTIEMBRE DE 2001

NUMERO 96

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DÍAZ-PIEDRAHITA



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Botánica (Botany)		(Josephson Junctions based on high temperature superconductors).	
- A new combination in <i>Elaphandra</i> and a new variety of <i>Eleutheranthera ruderalis</i> (Compositae: Heliantheae: Ecliptinae) from Andean South America.		<i>Pedro Prieto & Wilson Lopera</i>	381
(Una nueva combinación en <i>Elaphandra</i> y una nueva variedad de <i>Eleutheranthera ruderalis</i> [Compositae: Heliantheae: Ecliptinae] de los Andes sudamericanos).		Micología (Mycology)	
<i>John F. Pruski</i>	315	- Descubriendo ancestros de los Uredinales.	
		(Discovering the ancestors of the Uredinales).	
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)		<i>Pablo Buriticá C.</i>	395
- Las corrientes superficiales en la cuenca de Colombia observadas con boyas de deriva.		Química (Chemistry)	
(The surface currents in the Colombian basin observed with drifting buoys).		- Mineral de Magnesita colombiana en la obtención de refractarios de Espinela.	
<i>Carlos Alberto Andrade Amaya</i>	321	(Colombian Magnesite ore as a source for spinal refractories).	
- Apuntes sobre la estratigrafía y la tectónica de la cuenca inferior del Catatumbo colombiano.		<i>Marcela Pachón, Edgar Delgado, Pilar Pena & Emigdio Segura</i>	403
(Notes on the stratigraphy and tectonics of the inferior basin of the Colombian Catatumbo).		Zoología (Zoology)	
<i>Jaime Galvis, R. de la Espriella, R. Cortés & G. Ujueta</i>	337	- Los renacuajos colombianos de <i>Sphaenorhynchus</i> (Hylidae): descripciones, anotaciones sistemáticas y ecológicas.	
- Sobre los Alisios del nordeste y la existencia de una corriente en el piedemonte oriental andino.		(The tadpoles of Colombian <i>Sphaenorhynchus</i> [Hylidae]: descriptions, systematic and ecological additions).	
(On the Northeast trade winds and the existence of a current along the eastern Andean piedmont).		<i>Ángela Suárez-Mayorga & John D. Lynch</i>	411
<i>Gerardo Montoya, Joaquín Pelkowski & Jesús A. Eslava</i>	363	Notas (Notes)	
		- La corteza del Quillay (<i>Quillaja saponaria</i> Mol.), un recurso de la farmacopea internacional.	
Ecología (Ecology)		(The bark of Quillay [<i>Quillaja saponaria</i> Mol.], a resource of the international pharmacopoeia).	
- Distribución de la biomasa planctónica en la costa pacífica colombiana.		<i>Gloria Montenegro, Raúl C. Peña, & Bárbara Timmermann</i>	421
(Distribution of the planktonic biomass along the Pacific coast between november 1997 and november 1998).		- El comportamiento de algunos artrópodos colombianos y su significado evolutivo.	
<i>María Isabel Criales & Carlos E. Fernández</i>	371	(The behavior of some colombian and european arthropods and their evolutionary significance).	
		<i>Helmut Sturm</i>	429
Física (Physics)		Vida Académica (Academic Life)	435
- Junturas Josephson basadas en superconductores de alta temperatura.		Constitución de la Academia (Members of the Academy)	451

A NEW COMBINATION IN *ELAPHANDRA* AND A NEW VARIETY OF *ELEUTHERANTHERA RUDERALIS* (COMPOSITAE: HELIANTHEAE: ECLIPTINAE) FROM ANDEAN SOUTH AMERICA

by

John F. Pruski¹

Abstract

Pruski, J. F.: A new combination in *Elaphandra*, and a new variety of *Eleutheranthera ruderalis* (Compositae: Heliantheae: Ecliptinae) from Andean South America. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 25(96): 315-319, 2001. ISSN 0370-3908.

The new combination *Elaphandra patentipilis* is made for an endemic Colombian species formerly placed in *Aspilia*. A key to the species in the *Elaphandra lehmannii* group is given, and *E. quinquenervis* is taken to be endemic to Colombia. *Aspilia wedelioides* is presumed to be a synonym of *Elaphandra verbesinoides*. *Elaphandra* is taken as currently containing 14 species. *Eleutheranthera ruderalis* var. *radiata* from Venezuela is described and its relationships are discussed. *Aspilia triplinervia* is presumed to be a synonym of *Eleutheranthera tenella*.

Key words: *Elaphandra*, *Eleutheranthera*, Compositae, Asteraceae, Heliantheae, Ecliptinae, Colombia, Venezuela, Taxonomy.

Resumen

Se presenta la nueva combinación *Elaphandra patentipilis* para una especie endémica de Colombia, anteriormente ubicada dentro de *Aspilia*. Se propone una clave para las especies del grupo de *E. lehmannii*, y *E. quinquenervis* se trata como una especie endémica de Colombia. *Aspilia wedelioides* se supone como un sinónimo de *E. verbesinoides*. *Elaphandra* se trata con 14 especies. Se describe *Eleutheranthera ruderalis* var. *radiata* de Venezuela y se discuten sus relaciones. *Aspilia triplinervia* se presume un sinónimo de *Eleutheranthera tenella*.

Palabras claves: *Elaphandra*, *Eleutheranthera*, Compositae, Asteraceae, Heliantheae, Ecliptinae, Colombia, Venezuela, Taxonomía.

¹ United States National Herbarium Department of Botany, MRC-166 Smithsonian Institution Washington, DC 0560-0166, U.S.A.

Ecliptinae Lessing, a subtribe of Compositae: Heliantheae has been delimited by **Robinson** (1981), although most of its genera were more recently treated under the name Verbesininae by **Karis & Ryding** (1994), who did not subtribally place *Eclipta* L. Generic additions and adjustments of **Robinson** (1984a, 1984b, 1992, and literature cited therein), **Strother** (1991 and literature cited therein), **Pruski** (1996, 1999, and literature cited therein), and **Panero et al.** (1999) are accepted as emendations to the group as defined by **Robinson** (1981). The subtribe Verbesininae, treated as a synonym of the *Ecliptinae* by Robinson, Strother, and Pruski, was recently resurrected by **Panero et al.** (1999) and includes only *Verbesina* L. and three small Mexican and Central American genera.

Here, a new combination is made in *Elaphandra* Strother for a sterile-rayed species formerly placed in *Aspilia* Thouars, and a key to species of the group centering about *E. lehmannii* (Hieron.) Pruski is provided. Also, a new variety with radiate capitula of pantropical *Eleutheranthera ruderalis* (Sw.) Sch. Bip. is described from Venezuela.

The following innovations in *Elaphandra* and *Eleutheranthera* Poit. ex Bosc are the result of both floristic work (e.g. **Pruski**, 1997) and routine identifications for species from South America.

Elaphandra Strother, Syst. Bot. Monogr. 33: 17. 1991.

Elaphandra was described by **Strother** (1991) as unispecific, and is typified by *E. bicornis* Strother, a discoid species from Panama. Strother (in sched.) annotated several northern Andean species as congeneric with *E. bicornis*, but he did not formally transfer these species to *Elaphandra*. More recently, several South American species have been transferred to (as earlier suggested by Strother) or newly described in *Elaphandra* (**Robinson**, 1992, 1994; **Badillo**, 1994; **Pruski**, 1996). **Pruski** (1996) reduced *E. lucidula* (S.F. Blake) H. Rob. to the synonymy of *E. ulei* (Hieron.) H. Rob. and also Pruski reduced *E. sucrensii* (Aristeg.) V.M. Badillo to the synonymy of *E. verbesinoides* (DC.) H. Rob. *Elaphandra verbesinoides* also presumably includes as synonymous the once-collected *Aspilia wedelioides* (DC.) S. F. Blake from Tobago. Most of the newer additions to *Elaphandra* have radiate capitula and were formerly placed in *Aspilia*.

Elaphandra is characterized by the technical characters of opposite, eglandular leaves; by sterile ray florets (when present); by ovate, eglandular anther appendages, these commonly black though sometimes tan within or distally; by erect or laxly recurved (not strongly coiled), papillose

style branches; and by weakly paplose, rostrate (necked) cypselae, these without elaiosomes and without obvious carpodia. **Pruski** (1996) cited *Elaphandra* as containing 13 species. The transfer of *Aspilia patentipilis* S.F. Blake to *Elaphandra* proposed here increases to 14 the number of species I recognize in *Elaphandra*.

Pruski (1996) cited both *Aspilia patentipilis* and *Elaphandra quinquenervis* (S.F. Blake) H. Rob. as closely related to *E. lehmannii* and perhaps not distinct from it. However, further study of the types, type photographs, and other specimens available to me of the species of the *E. lehmannii* group (in Group I of **Robinson**, 1992) show that the two former species, although clearly closely related to *E. lehmannii*, are distinct from it. In floral features all specimens of this species group are similar, and the species can be distinguished most readily by differences in indumentum of vegetative structures.

Lectotypification of *A. lehmannii* Hieron. was deferred by **Pruski** (1996) and similarly is delayed here until type material is found and studied. Unfortunately, syntype material of *A. lehmannii* (*Lehmann 3282*) was not found at BM (fide R. Vickery), nor at K (fide D. J. Nicholas Hind and S. J. Owens), and to date I have been able to examine only a photograph (NY!, US!) of the destroyed Berlin syntype of *Lehmann 3282*. *Elaphandra lehmannii* occurs in Andean Colombia and Ecuador, and is the most widespread of the three species of this group. It was described by Hieronymus as having stems "hirto-pilosis," thus differing from the species in the group with either strigose stems or long-patent, pilose stems.

I have been fortunate to have recently examined the holotype of *Aspilia quinquenervis* (K!), which has short-strigose hairs on the stems, leaf blades, and phyllaries; petioles and peduncles strigose to hirsute; and elliptic-lanceolate outer phyllaries. By strigose stems, phyllaries, and leaf blades this species (*E. quinquenervis*), a Colombian endemic (known from Antioquia, Caldas, Cauca, Tolima, Valle, and from along the Choco-Valle border), proves to be distinct from the two other species of the *E. lehmannii* group. The third species in the *E. lehmannii* group (*Aspilia patentipilis*) is characterized by its vegetative structures with long-patent, pilose hairs, and has yet to be transferred to *Elaphandra*. The needed combination for this species in *Elaphandra* is thus provided below.

Elaphandra patentipilis (S.F. Blake) Pruski & G. Méndez, **comb. nov.** Basionym: *Aspilia patentipilis* S.F. Blake, Contr. U.S. Natl. Herb. 22: 617. 1924. *Wedelia patentipilis* (S.F. Blake) B.L. Turner, Phytologia 72: 393. 1992. Fig. 1



Figure 1. Photograph of isotype of *Aspilota patentipilis* S.F. Blake (Pennell 3229, US).

Type. Colombia, **TOLIMA:** La Trinidad, Líbano, 1100-1400 m, 21-25 Dec 1917, Pennell 3229 (holotype: NY!; isotype: US!).

Comments: The *E. lehmannii* group as circumscribed by Pruski (1996) includes two elements (*A. patentipilis* and *E. quinquenervis*), which are here removed from the provisional synonymy of *E. lehmannii*. This results in a better circumscription *E. lehmannii*, which is nevertheless still broadly defined and variable. One named element that I feel is best removed from *E. lehmannii* is the element including the type of *A. patentipilis*, namely the entity with long-patent, pilose hairs and long, elliptic-lanceolate outer phyllaries. This species is here formally transferred to *Elaphandra*. The type of *A. patentipilis* is the most extreme example of this form in that its hairs and outer phyllaries are the longest in the *E. lehmannii* group.

Monographic studies are needed to precisely define the taxonomic limits of *E. patentipilis*, which is an herb or vine and is a moderately common Colombian endemic. Plants provisionally referred here to *E. patentipilis* occur on all three Andean Cordilleras of Colombia in Antioquia, Boyacá, Cauca, Nariño, Norte de Santander, Tolima, and Valle. Several specimens seem intermediate between *E. lehmannii* and *E. patentipilis*, but I nevertheless believe it is useful to recognize the two as distinct species. *Elaphandra patentipilis* is characterized by having long-patent, pilose stems, leaves, and phyllaries; and longer, elliptic-lanceolate outer phyllaries. It is thus distinguished from *E. lehmannii*, which commonly has substrigose, hispid, or sericeous leaves and phyllaries; stems shortly pilose or hispid; and shorter, elliptic-ovate outer phyllaries.

I am happy to validate this transfer with Gina Paola Méndez R. (of the COL herbarium), who is working on Colombian members of the taxonomically difficult subtribe Ecliptinae.

Key to the species centering about *Elaphandra lehmannii*

1. Stems with short, strigose hairs; Colombia
..... *E. quinquenervis* (S.F. Blake) H. Rob.
1. Stem hairs not short-strigose.
 2. Stems, leaves and phyllaries without long-patent, pilose hairs, indumentum type various, occasionally shortly pilose or sericeous; outer phyllaries often elliptic-ovate and about as longer as or shorter than the inner phyllaries; Colombia and Ecuador
..... *E. lehmannii* (Hieron.) Pruski
 2. Stems, leaves, and phyllaries commonly with long-patent, pilose hairs, phyllaries less commonly sericeous; outer phyllaries often elliptic-lanceolate and longer than the inner phyllaries; Colombia
..... *E. patentipilis* (S.F. Blake) Pruski & G. Méndez

Eleutheranthera

Pantropical *Eleutheranthera ruderalis* is uniformly discoid throughout most of its range. However, in the Venezuelan coastal ranges plants with radiate capitula otherwise matching the typical form with discoid capitula of this species are occasionally found. The collections with radiate capitula are described here as a new variety of *E. ruderalis* as follows.

***Eleutheranthera ruderalis* (Sw.) Sch.-Bip. var. *radiata* Pruski, var. nov.**

Type. Venezuela, **DISTRITO FEDERAL:** Hacienda Chichiriviche, ca. 300 m, Jul 1958, *L. Aristeguieta* 3233 (holotype: NY!; isotype: VEN n.v.).

A var. *typica* affinis, sed capitulis radiatis diversa.

Herbae annuae vel subperennes; folia opposita petiolata; lamina elliptica vel ovata 2.7-8.4 X 0.9-4.2 cm chartacea strigosa et glandulosa; capitulescentia paucicapitulata; capitula radiata, flosculus 9-12; involucrem campanulatum; receptaculum paleaceum; flosculi radiati steriles ca. 4, limbo ca. 5 X 3 mm glandulifero; flosculi disci hermaphroditi 5-8, corolla ca. 2.8 mm longa, lobis ca. 0.3-0.4 mm longis; antherae nigrae; stylus brevixsertus, ramis lineari-lanceolatis, ca. 0.5 mm longis; achaenia nigra, obovoidea, 3-3.5 mm longa, tuberculata, epapposa.

Erect herbaceous annuals to short-lived perennials, more than 30 cm tall. *Stems* moderately branched, striate, pubescent. *Leaves* simple, opposite, petiolate; petiole (0.3) 0.7-1.8 cm long; blade elliptic to ovate, 2.7-8.4 X 0.9-4.2 cm, chartaceous, weakly serrulate, 3-veined from near base, acute at apex, decurrent at base, strigose to weakly so, the lower surface also glandular, sometimes obscurely so. *Capitulescence* axillary, in few-headed cymes in the uppermost nodes or capitula solitary; peduncles short, commonly 2-2.5 cm long. *Capitula* radiate, 9-12-flowered; involucre campanulate; phyllaries weakly imbricate, 2-3-seriate, subequal or outer series commonly longer, the outer series foliar, elliptic to pyriform, 6.5-8 X 2.6-4 mm, thinly chartaceous, hirsute, the inner ones foliar, elliptic-lanceolate, hirsutulous, usually slightly smaller than the outer series; receptacle minute, paleate, the pales lanceolate, conduplicate, ca. 5.5 mm long, apically attenuate to apiculate, pilose to glabrate. *Ray florets* sterile, ca. 4; corolla yellowish, the tube ca. 0.7 mm long, glabrous, the limb ca. 5 X 3 mm, 5-nerved, abaxially glandular. *Disk florets* bisexual, 5-8; corolla tubular-funnelform, ca. 2.8 mm long, pale yellow, shortly 5-lobed, glabrous except for lobes hispid within, the tube ca. 0.4 mm long, the throat slightly broader, ca. 2 mm long, the lobes deltoid, 0.3-0.4 mm long, strongly hispid within and marginally; anthers very weakly apically exserted, black, 1.2-1.5 mm long, the appendages broad, often weakly glandular; style weakly exserted, the style branches erect or nearly so, linear-lanceolate, ca. 0.5 mm long, attenuate at apex, strongly pilose, with weakly paired marginal stigmatic lines. *Ray ovaries* sterile, narrowly cylindrical, apically setose. *Disk cypselae* black, obovoid,

often angled, 3-3.5 mm long, tuberculate, puberulent at apex, otherwise glabrous, carpodia indistinct, elaiosomes absent; pappus absent or less commonly a ciliate ring on top of the short neck of the cypselae.

Paratype: VENEZUELA, YARACUY: Distr. San Felipe: Municipio Veroes: Fila montañosa 5 kms S de Bella Vista, 10°23'N, 68°24'W, 200-450 m, 11 Jul 1973, *G. Agostini, G. Morillo & B. Morillo* 1737 (US!, VEN n.v.).

Comments: *Eleutheranthera* had been treated traditionally as a unispecific discoid genus until Robinson (1992) transferred to it a second species with tuberculate cypselae, the radiate-headed *Gymnolomia tenella* H.B.K. With the present description of *E. ruderalis* var. *radiata*, the genus now contains three taxa, two of these with radiate capitula. The discoid and widespread pantropical *E. ruderalis* var. *ruderalis* remains the most common taxon of the genus, however. The sterile-rayed entities are each much less widespread, one is endemic to Colombia, and the other is endemic to Venezuela. *Eleutheranthera tenella* (H.B.K.) H. Rob. is regionally common in the Colombian Andes, especially near Cali, at elevations of about 950-1900 m, but occasionally this species may be found at sea level on the Pacific coast. *Eleutheranthera tenella* presumably includes *Aspilia triplinervia* (H.B.K.) S.F. Blake as synonymous, although not cited as such by Robinson (1992). The second variety of *E. ruderalis*, described here, is endemic to the northeastern-most Andes, the Venezuela coastal range near Caracas, where it flowers in July and has been collected from 200-450 m elevation.

The new variety is treated as an variety of the otherwise similar *E. ruderalis*, from which it differs most noticeably by radiate (vs. discoid) capitula. By radiate capitula, the new variety, however, resembles *E. tenella*. However, *E. tenella* is a reduced herb with small leaves, thus differing from *E. ruderalis* var. *radiata*. Moreover, *E. tenella* differs from *E. ruderalis* var. *radiata* by terminal (vs. axillary) capitula that are about 35- (vs. 9-12-) flowered, these long- (vs. short-) pedunculate and with outer phyllaries lanceolate (vs. elliptic to pyriform).

Acknowledgments

I thank Santiago Díaz, Dan Nicolson, Gina Paola Méndez R., Harold Robinson, and Gisela Sancho for reviewing an earlier draft of this paper; R. Vickery (BM), D. J. Nicholas Hind (K), and S. J. Owens (K) for searching for the type of *Aspilia lehmannii* in their respective herbaria; and Susan K. Hunter, Smithsonian Institution Botany Department Staff Photographer, for her photograph of the isotype of *Aspilia patentipilis*.

Literature cited

- Badillo, V. M.** 1994 [1995]. Enumeración de las Compuestas (Asteraceae) de Venezuela. *Revista Fac. Agron. (Maracay)* 45: 1-191.
- Karis, P. O. & O. Ryding.** 1994. Chapter 22, Tribe Heliantheae. Pp. 559-624. In: Bremer, K. *Asteraceae: Cladistics & Classification*. Timber Press, Portland, Oregon.
- Panero, J. L., R. K. Jansen & J. A. Clevinger.** 1999. Phylogenetic relationships of subtribe Ecliptinae (Asteraceae: Heliantheae) based on chloroplast DNA restriction site data. *Amer. J. Bot.* 86: 413-427.
- Pruski, J. F.** 1996. Compositae of the Guayana Highland-XI. *Tuberculo-carpus* gen. nov. and some other Ecliptinae (Heliantheae). *Novon* 6: 404-418.
- . 1997. Asteraceae. Pages 177-393. In: J. A. Steyermark et al. (eds.), *Flora of the Venezuelan Guayana*. Vol. 3. Araliaceae-Cactaceae. Missouri Botanical Garden, St. Louis.
- . 1999. Novelties in *Angelphytum* and *Oyedaea* (Compositae: Heliantheae: Ecliptinae) from South America. *Comp. Newsl.* 34: 1-8.
- Robinson, H.** 1981. A revision of the tribal and subtribal limits of the Heliantheae (Asteraceae). *Smithsonian Contr. Bot.* 51: i-iv, 1-102.
- . 1984a. Studies in the Heliantheae (Asteraceae). XXXI. Additions to the genus *Dimerostemma*. *Proc. Biol. Soc. Wash.* 97: 618-626.
- . 1984b. Studies in the Heliantheae (Asteraceae). XXXIV. Redelimitation of the genus *Angelphytum*. *Proc. Biol. Soc. Wash.* 97: 961-969.
- . 1992. New combinations in *Elaphandra* Strother (Ecliptinae-Heliantheae-Asteraceae). *Phytologia* 72: 144-151.
- . 1994. A new species of *Oblivia* and a new combination in *Elaphandra* from Ecuador (Ecliptinae-Heliantheae-Asteraceae). *Phytologia* 76: 24-26.
- Strother, J. L.** 1991. Taxonomy of *Complaya*, *Elaphandra*, *logeton*, *Jefea*, *Wamalchitamia*, *Wedelia*, *Zexmenia*, and *Zyzyxia* (Compositae-Heliantheae-Ecliptinae). *Syst. Bot. Monogr.* 33: 1-111.

LAS CORRIENTES SUPERFICIALES EN LA CUENCA DE COLOMBIA OBSERVADAS CON BOYAS DE DERIVA

por

Carlos Alberto Andrade Amaya¹

Resumen

Andrade-Amaya, C.A.: Las corrientes superficiales en la cuenca de Colombia observadas con boyas de deriva. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **25**(96): 321-335, 2001, ISSN 0370-3908.

Se describe la circulación oceánica de la superficie de la cuenca de Colombia, en especial del Caribe suroccidental, mediante el seguimiento de las trayectorias de boyas de deriva lanzadas entre 1997 y 1999 y controladas por satélite mediante el sistema Argos. La corriente superficial mostró la presencia de dos giros ciclónicos, uno generalizado en el Caribe suroccidental conocido como el Giro Panamá-Colombia y otro geográficamente restringido al Golfo de Mosquitos. El brazo sur del Giro Panamá-Colombia, conocido como la Contracorriente del mismo nombre fue más intenso que cualquier otro rasgo de circulación del Caribe. La formación del brazo norte del Giro parece depender de la intensidad del viento, con un umbral de velocidad de los vientos Alisios del Norte de 7m.s^{-1} . Cuando el viento estuvo por debajo del umbral, las boyas salieron de la Cuenca de Colombia al Mar Caimán por el Canal Chibcha, a veces con notables velocidades que en ocasiones alcanzaron los 2m.s^{-1} .

Palabras clave: Corrientes oceánicas, Mar Caribe, Cuenca de Colombia, Boyas de deriva Argos. Contracorriente Panamá-Colombia.

Abstract

The surface circulation of the Colombian Basin, specially the Southwestern Caribbean Sea is described using Argos system satellite track drifting buoys, launched between 1997 and 1999. Surface currents showed the presence of two gyres, one generalized gyre known as the Panama-Colombia Gyre and a smaller one localized in the Gulf of Mosquitos. The southern branch of the gyre known as the Panama-Colombia Countercurrent showed the greatest energy of the Caribbean. The formation of the northern branch of the Gyre seems to depend on a threshold of 7m.s^{-1} of the Northern Trade Winds speed. When the wind speed was below the threshold, the drifters left the Colombian Basin to the Cayman Sea through Chibcha Channel with speeds that reached 2m.s^{-1} .

Key words: Oceanic currents, Caribbean Sea, Colombian Basin, Drifting buoys, Panama-Colombia countercurrent.

¹ Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Cartagena, Colombia.

1. Introducción

El mar Caribe es una mar semi-cerrado rodeado por las masas continentales de Sur y Centroamérica y separadas del Océano Atlántico por el Arco de las Islas Antillas. El mar Caribe tiene tres partes principales, la Cuenca de Venezuela en el Oriente, el Mar Caimán en la parte occidental y la Cuenca de Colombia en la parte central y suroccidental del Caribe, delimitada por las costas de Colombia, Panamá, Costa Rica, Nicaragua y el Este de Honduras (Figura 1). La variabilidad de la circulación en la Cuenca de Colombia es entendida en su generalidad, y a escala regional, pero poco se conoce en escalas estacionales, de media escala o interanuales. Importantes asuntos de carácter social asociados con los sistemas marinos costeros, pesquerías, transporte de petróleo y desarrollo industrial y sus correspondientes contaminantes de los países vecinos, necesitan un mejor entendimiento de los sistemas marinos en la región por parte de la comunidad científica (Moors & Maul, 1998).

La meteorología del Caribe puede ser explicada en términos del viento y la precipitación y de su variabilidad espacial y temporal. En los trópicos, la temperatura ambiente no cambia significativamente a lo largo del año, como ocurre en las estaciones subtropicales, sin embargo, algunos rasgos de la presión atmosférica como la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) -una cinta continua de baja presión alrededor del Ecuador terrestre-, ejerce un control importante sobre los regímenes de viento y precipitación.

El clima en la cuenca de Colombia es modulado por la posición geográfica de la ZCIT y por la llegada del Sistema del Monzón Americano (el movimiento zonal de la estación lluviosa a lo largo del año) en los trópicos. La estacionalidad de la posición de la ZCIT corresponde a la estación seca (de vientos) de diciembre-abril y estación lluviosa entre agosto y octubre (Pujos *et al.*, 1986; Etter *et al.* 1987). El resto del año es de transición entre estas dos estaciones (Figura 2).

Las corrientes oceánicas superficiales en la Cuenca de Colombia están dominadas por la Corriente del Caribe que fluye hacia el noroeste hacia el Mar Caimán (Figura 3). Pero el Caribe Suroccidental es una cuenca semicerrada y la circulación superficial allí es más compleja, aparentemente dominada por una circulación ciclónica -en el sentido contrario a las manecillas del reloj en el Hemisferio Norte- (Moors & Gao, 1996). Sin embargo, el flujo dentro del Caribe Suroccidental es desconocido, en particular la importancia e intensidad de la contracorriente costera de Panamá-Colombia no ha sido aun estimada así como tampoco su extensión hacia el Este.

Hasta 1997, las boyas de deriva localizadas desde satélites fueron utilizadas en números modestos en el Caribe Suroccidental (*e.g.* Molinari *et al.*, 1992). En tiempos recientes, el interés por conocer la circulación de esta zona ha ido aumentando y se han implementado otros experimentos como el Programa norteamericano de asociados para estudiar el océano (US National Ocean Partnership Program), en celebración del Año Mundial del Océano (YOTO, por sus siglas en inglés). Para ese experimento, utilizado en parte en este análisis tres grupos de ocho boyas cada uno se lanzaron al mar en enero, junio y diciembre de 1998, entre Cartagena y la isla de San Andrés, por parte de la Armada de Colombia (Leaman & Wilson, 1999).

Otro grupo de boyas utilizado en este análisis fue lanzado en la Boca de la Ciénaga Grande de Santa Marta, la laguna costera más grande del Caribe, como parte de un proyecto conjunto entre la Universidad de Miami y el Instituto de Investigaciones Marinas (INVEMAR), con el fin de entender la dispersión de larvas y huevos de peces y la interconexión con otros sitios de desove (Criales *et al.*, 1999).

2. Metodología

Los datos oceanográficos utilizados en el presente estudio fueron datos de posición tomados de boyas seguidas desde satélites en órbita. Los patrones de circulación en la superficie del mar fueron inferidos por el desplazamiento secuencial de las boyas llevadas por la corriente superficial cuya posición fue determinada utilizando el sistema Argos. Tres boyas superficiales B2560, B2561 y B2562 fueron lanzadas específicamente para este estudio, dos de ellas mas cerca de la costa colombiana en agosto y una en la parte occidental de la Cuenca de Colombia al Sur de la isla de San Andrés en noviembre de 1997 (Andrade, 2000).

Otras dos boyas de deriva M14532 y M14535 del programa del INVEMAR - Universidad de Miami, fueron lanzadas en julio y agosto de 1998 respectivamente en la Boca de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Estos datos fueron complementados con la información de la Boya 13 del programa YOTO, tomados de la Internet en www.globe.gsfc.nasa.gov.

Los datos de posición en intervalos irregulares como se reciben del sistema Argos fueron interpolados a intervalos uniformes de seis horas utilizando el algoritmo 'Cubic Spline' y sus velocidades y energía cinética fueron estimadas en esos intervalos. El seguimiento del recorrido de las boyas fue utilizado para observar el comportamiento de la circulación superficial y relacio-

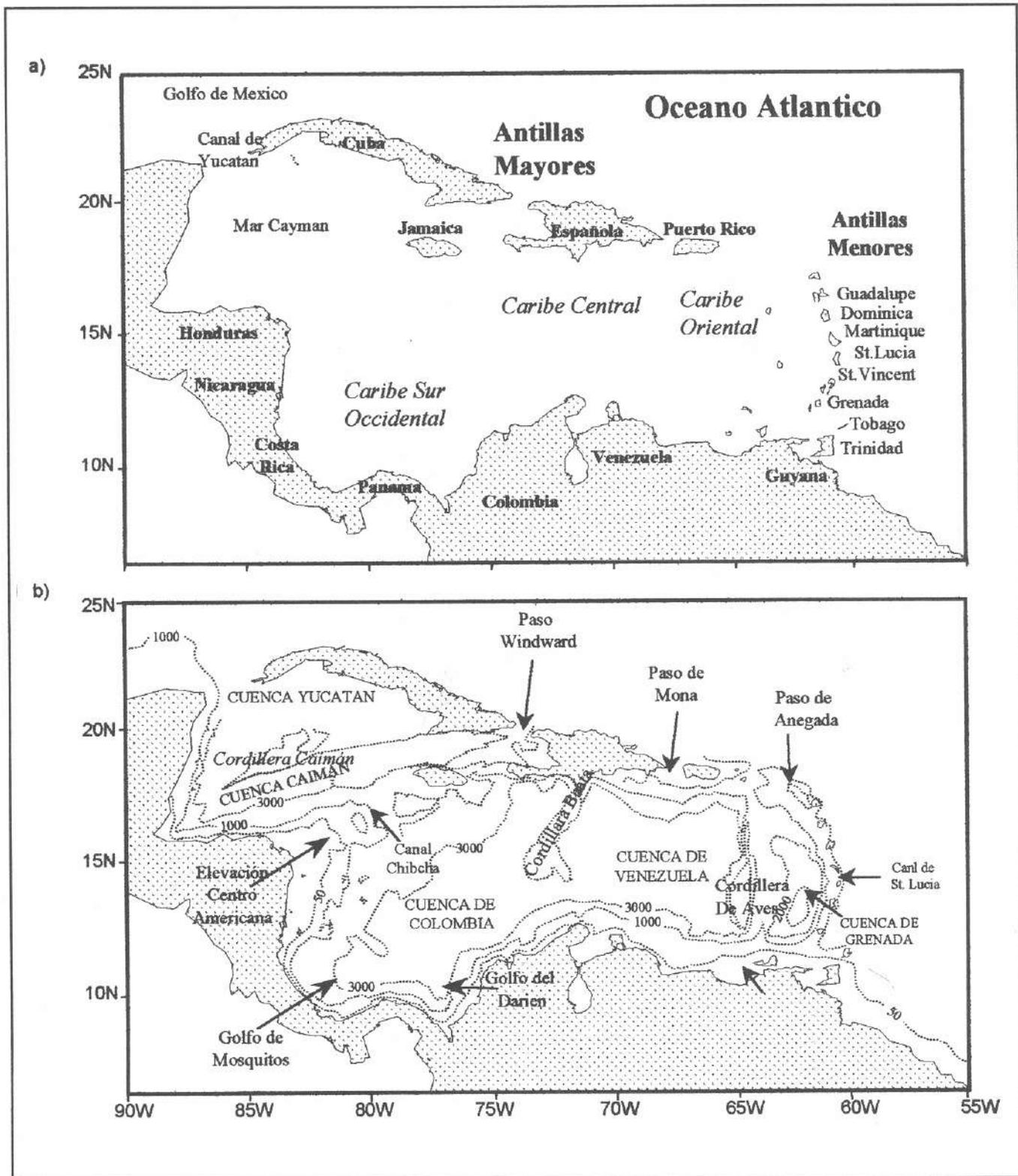


Figura 1. Area de estudio con las principales características geológicas y geográficas. En el panel b) se indican las isobatas, las áreas sombreadas son cordilleras con profundidades menores de 1000 m.

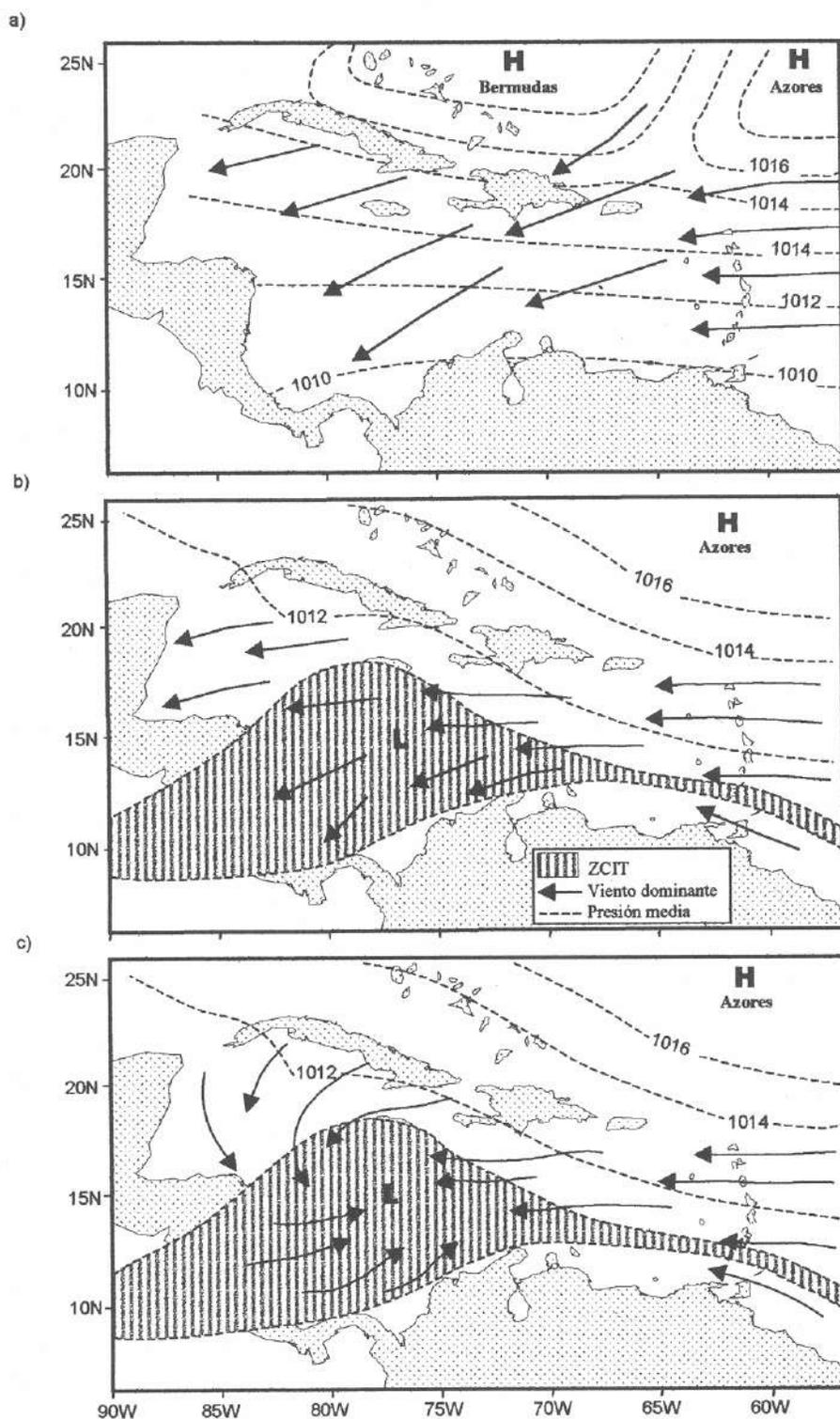


Figura 2 Posición de la Zona de convergencia Inter-tropical para a) estación de vientos b) época de transición y c) estación de lluvias (adaptada de Pujos *et al.*, 1986).

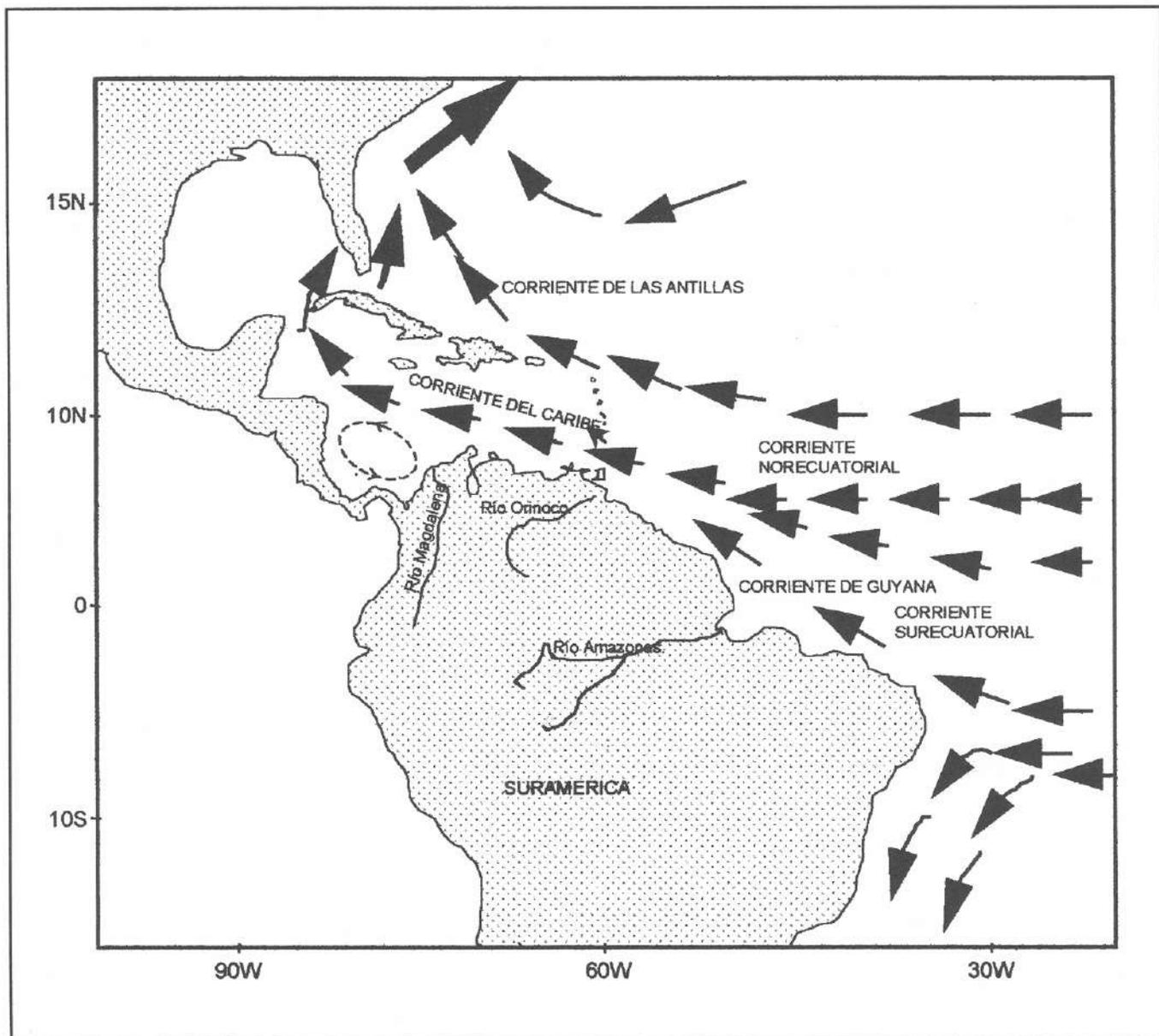


Figura 3. Corrientes superficiales en la región tropical del Atlántico Occidental.

narlo con los patrones de corrientes conocidos. La temperatura superficial fue registrada cuando estuvo disponible y correlacionada con los datos de posición para examinar si la temperatura superficial respondía a características dinámicas de la corriente o a la estacionalidad climática.

Se calcularon campos 'eurelianos' de la corriente superficial, interpolando todas las velocidades de las boyas

disponibles durante lapsos de tiempo en una grilla de un grado de longitud por un grado de latitud, para lo cual se utilizó el método de interpolación '*Inverso a la Distancia*' a cada centro del cuadrado de la grilla más cercano. Dicha interpolación se hizo para cada una de las tres estaciones tropicales entre agosto de 1997 y junio de 1999, mediante un programa escrito en MATLAB. Los resultados fueron graficados usando el programa SURFER para WINDOWS.

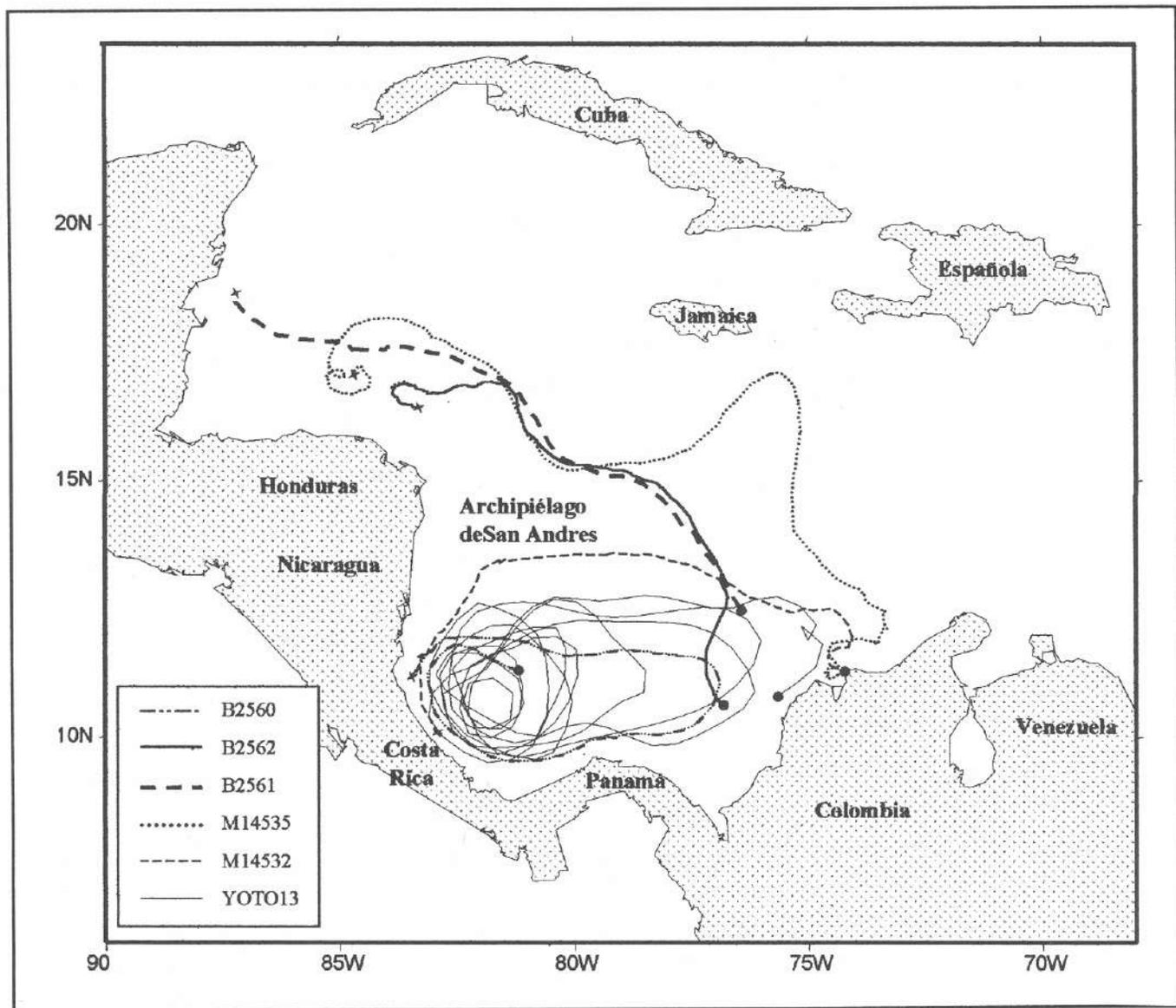


Figura 4. Trayectorias de las boyas utilizadas en el presente estudio. Tres fueron lanzadas en el Caribe Suroccidental en agosto de 1997, otras dos fueron lanzadas frente a Santa Marta (Colombia) en octubre de 1998 y un año de la deriva de la boya YOTO13 (junio 1998 a junio 1999) que fue lanzada frente a Cartagena para el experimento del Año de los Océanos.

3. Seguimiento de las boyas

Una vez lanzada en agosto de 1997, la boya B2562 derivó hacia el Noreste con velocidades de $0.25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en el primer día (Figura 4). La boya luego giró hacia el norte y al noroeste con velocidades de $0.45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. En la medida que la boya se aproximó a la Elevación Centroamericana, giró al oeste y aceleró a velocidades de $1.55\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Posteriormente la boya derivó hacia afuera del Caribe a través del Canal Chibcha, justo al Sur del Banco Serranilla (Figura 4).

La Boya B2561 fue lanzada dos días después, 200 km mas al Norte. La trayectoria de esta boya fue muy similar a la de B2562, derivando casi sobre la misma ruta a $0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, pasando también a través del Canal Chibcha con velocidad máxima de $2.15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 4).

La circulación superficial cambió drásticamente a la llegada de la estación de vientos como se pudo observar en la trayectoria de la boya B2560 que fue lanzada al sur del Archipiélago de San Andrés el 16 de noviembre de

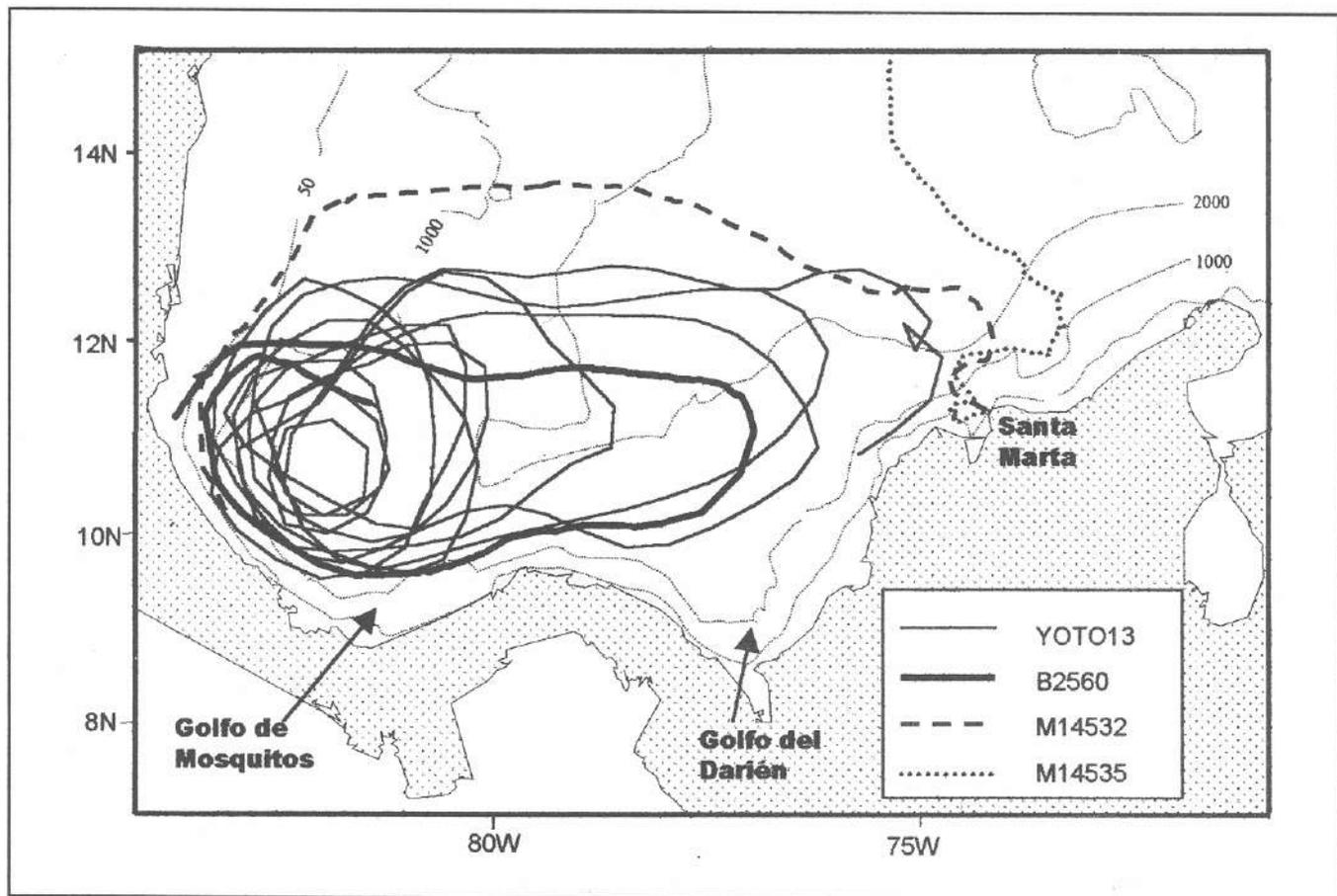


Figura 5. Las trayectorias de las boyas en el Caribe Suroccidental describieron dos patrones de circulación, un ciclón en el Golfo de Mosquitos y un ciclón más grande conocido como el Giro de Panamá-Colombia. En el extremo oriental del Giro Panamá-Colombia varía ampliamente como puede ser observado por el punto de giro hacia el Oeste.

1997. Esta derivó al Noroeste con una velocidad diaria promedio de $0.98\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura.5). Un día después giró hacia el Sur siguiendo una trayectoria paralela a la costa de Costa Rica con una velocidad media de $0.92\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en el Golfo de Mosquitos, siguiendo la llamada Contracorriente de Panamá-Colombia mientras viajó a 60 km de la costa. En noviembre 26 la trayectoria se mantuvo hacia el Este atravesando el Golfo del Darién a $1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La llegada de la estación de vientos ($>15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) encontró a B2560 mucho antes de llegar a la costa colombiana. Ella giró abruptamente hacia el Oeste en noviembre 30 y derivó a lo largo de Lat. 11°N por dos días a $1.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ cerrando un giro ciclónico en 19 días. La boya giró hacia el Sur de nuevo en una trayectoria cercana a la costa de Nicaragua con una velocidad alrededor de $0.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Finalmente, se encalló luego de tres semanas de operación en la costa de Costa Rica el 12 de diciembre de 1997.

La deriva de M14535 empezó seis meses más tarde en la costa de Santa Marta (Colombia) el 2 de julio de 1998 (Figura 5). Siguió una trayectoria Norte hacia fuera de la costa colombiana y dos días después giró al Oeste. Luego de dejar la influencia de la Contracorriente de Panamá-Colombia, aceleró a unos $0.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en un patrón similar al seguido por B2560 pero más lento hasta su llegada a la costa centroamericana donde encalló el 25 de octubre de 1998. Esta boya tomó un mes en recorrer el brazo norte del Giro Panamá-Colombia.

La boya M14532 fue lanzada el 10 de agosto de 1998 (ver Figura 4). Esta boya estuvo 10 días interactuando con el lado norte de la circulación ciclónica que ocurre en el Golfo de Salamanca (Andrade & Duarte, 1992) hasta que fue aparentemente "empujada" costa afuera por los chorros de viento katabático producidos en la Sierra Nevada (Blanco, 1988). La Contracorriente de Panamá-Colombia captu-

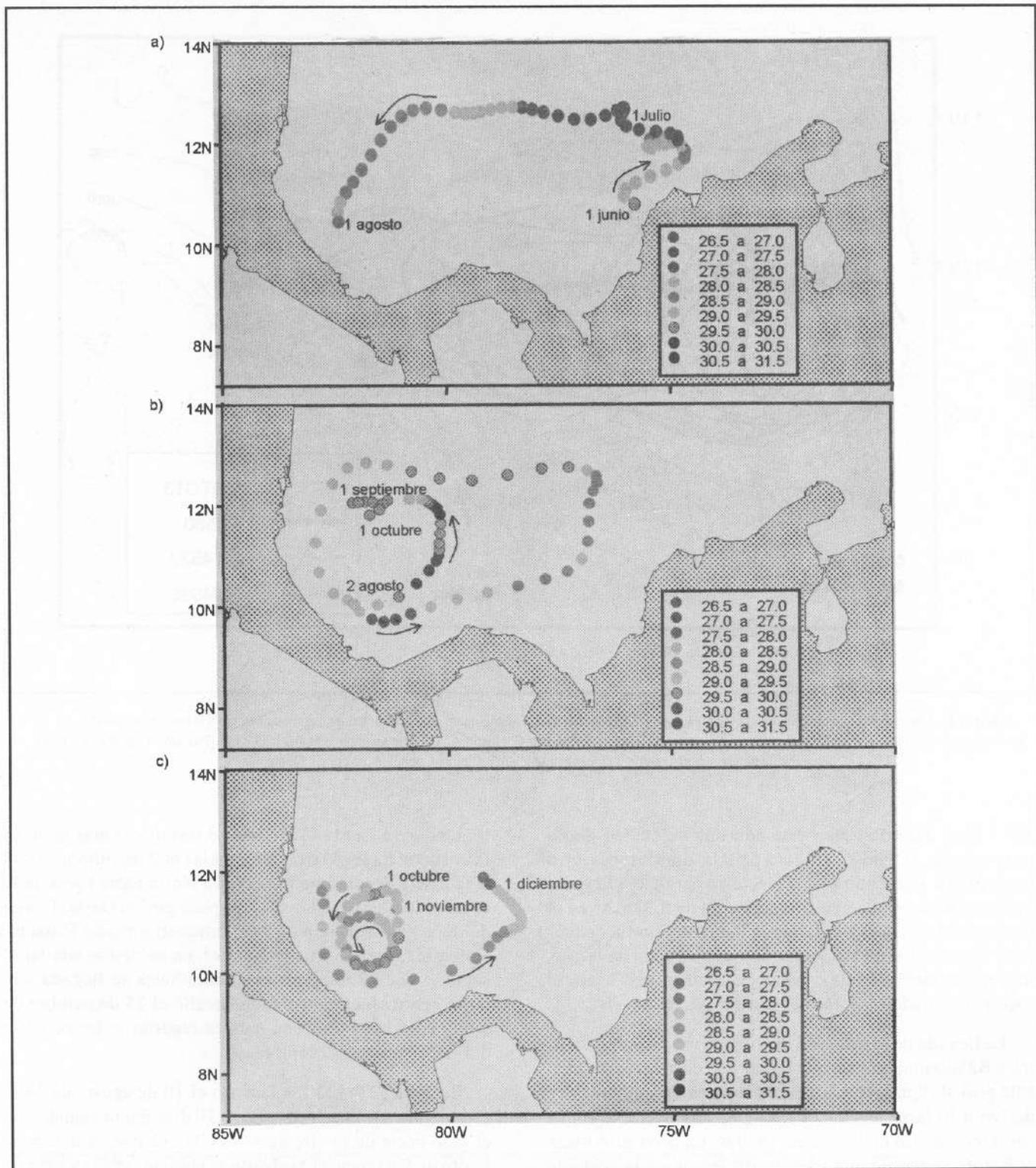


Figura 6. Trayectoria de la boya YOTO13 del programa del año de los océanos a) junio y julio, b) agosto-septiembre y c) octubre-noviembre de 1998. Los puntos son posiciones diarias y el color representa la temperatura superficial media del mar. La trayectoria muestra dos celdas ciclónicas en la región; un giro grande en todo el Caribe Suroccidental y otro más pequeño en el Golfo de Mosquitos.

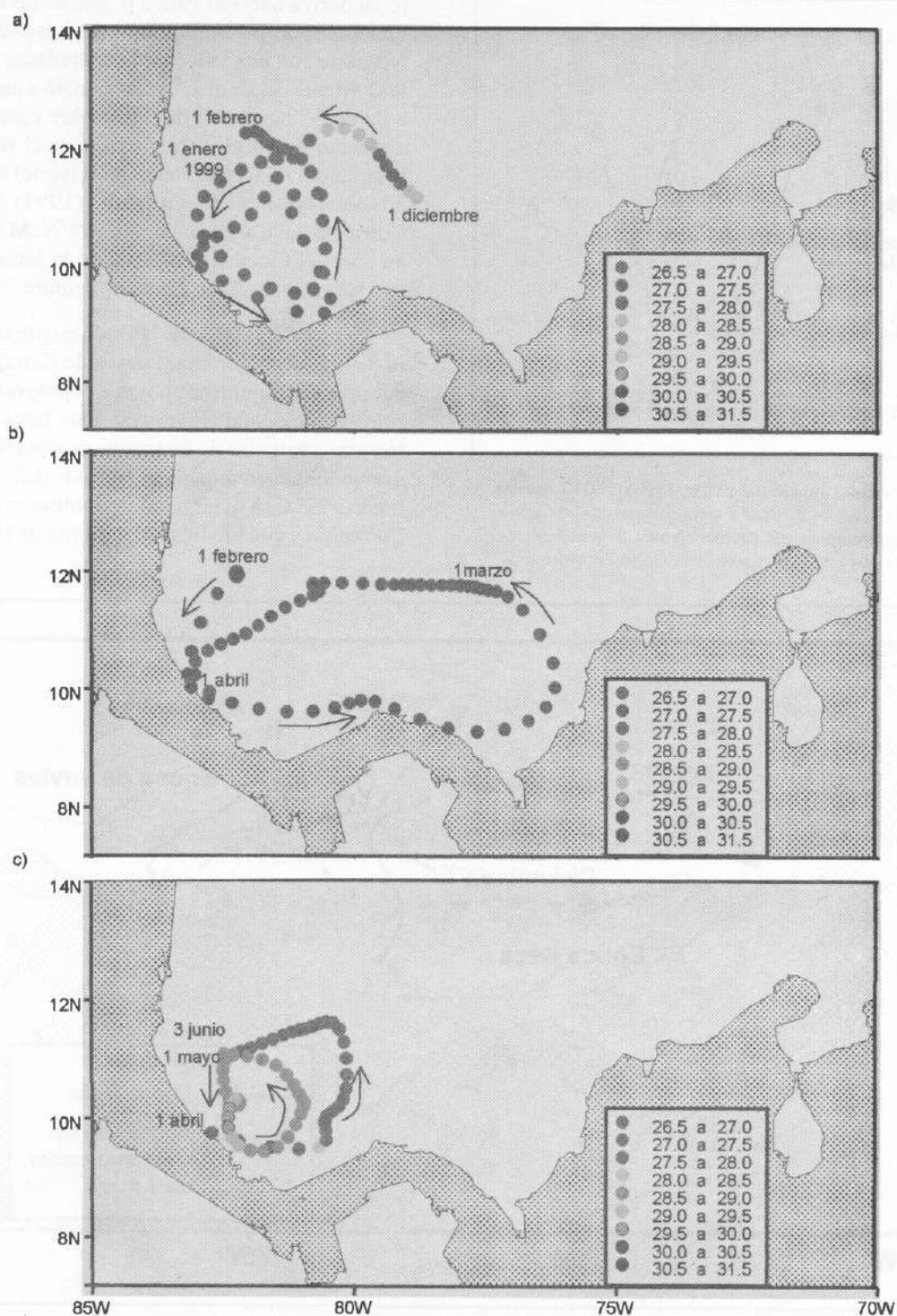


Figura 7. Trayectoria de la boya YOTO13 para a) diciembre 1998 – enero 1999, b) febrero-marzo y c) abril y mayo 1999. La circulación muestra los mismos rasgos que los meses previos pero toma distintos lapsos de tiempo para cubrir las mismas distancias. Esta boya muestra la persistencia de los dos ciclones a lo largo del año. Los cambios de temperatura parecen mas estacionales; sin embargo, la temperatura en el centro del ciclón en el Golfo de Mosquitos es siempre menor.

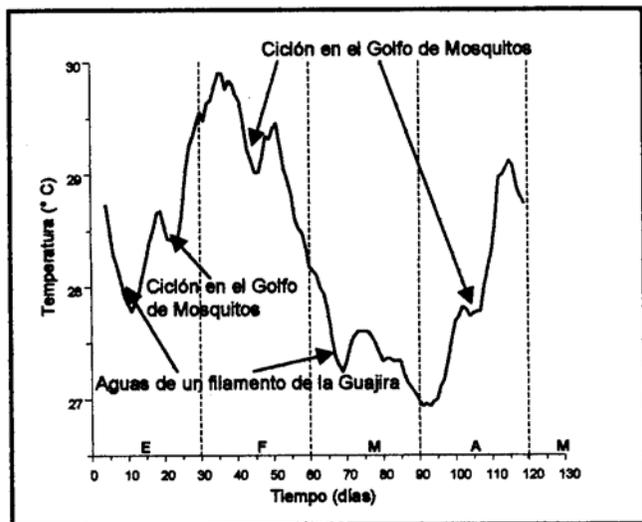


Figura 8. Temperatura superficial del mar de YOTO13 durante cuatro meses de viaje en el Caribe suroccidental. La variación estacional es interrumpida por decrecimientos de alrededor de 0.5°C cuando la boya estuvo cruzando el Golfo de Mosquitos.

ró su deriva hacia el Este a $0.35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ cerca de la costa colombiana por una semana más. La boya luego giró hacia el Noroeste con una velocidad de alrededor de $0.45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ con la Corriente del Caribe. Luego cambió a una dirección Norte a $0.60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ hasta el 7 de septiembre cuando giró al Oeste alrededor de un giro anticlónico (en el sentido de las manecillas del reloj en el Hemisferio Norte) como los registrados en Nystuen & Andrade (1993) viajando con la Corriente del Caribe al norte de 14°N . M14532 derivó luego hacia el Canal Chibcha, como lo hicieron las otras boyas para llegar allí el 21 de septiembre.

La boya YOTO13 fue lanzada en junio 1° de 1998 afuera de la costa colombiana cerca de Cartagena, como parte del primer conjunto de boyas del programa YOTO en Caribe suroccidental (Figura 6). Esta boya también proveía lecturas continuas de temperatura superficial del mar. Ella derivó lentamente hacia el Norte ($\sim 0.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) en aguas cálidas ($>29^{\circ}\text{C}$) a lo largo de la Contracorriente de Panamá-Colombia y cuando llegó al dominio de los vientos fuertes

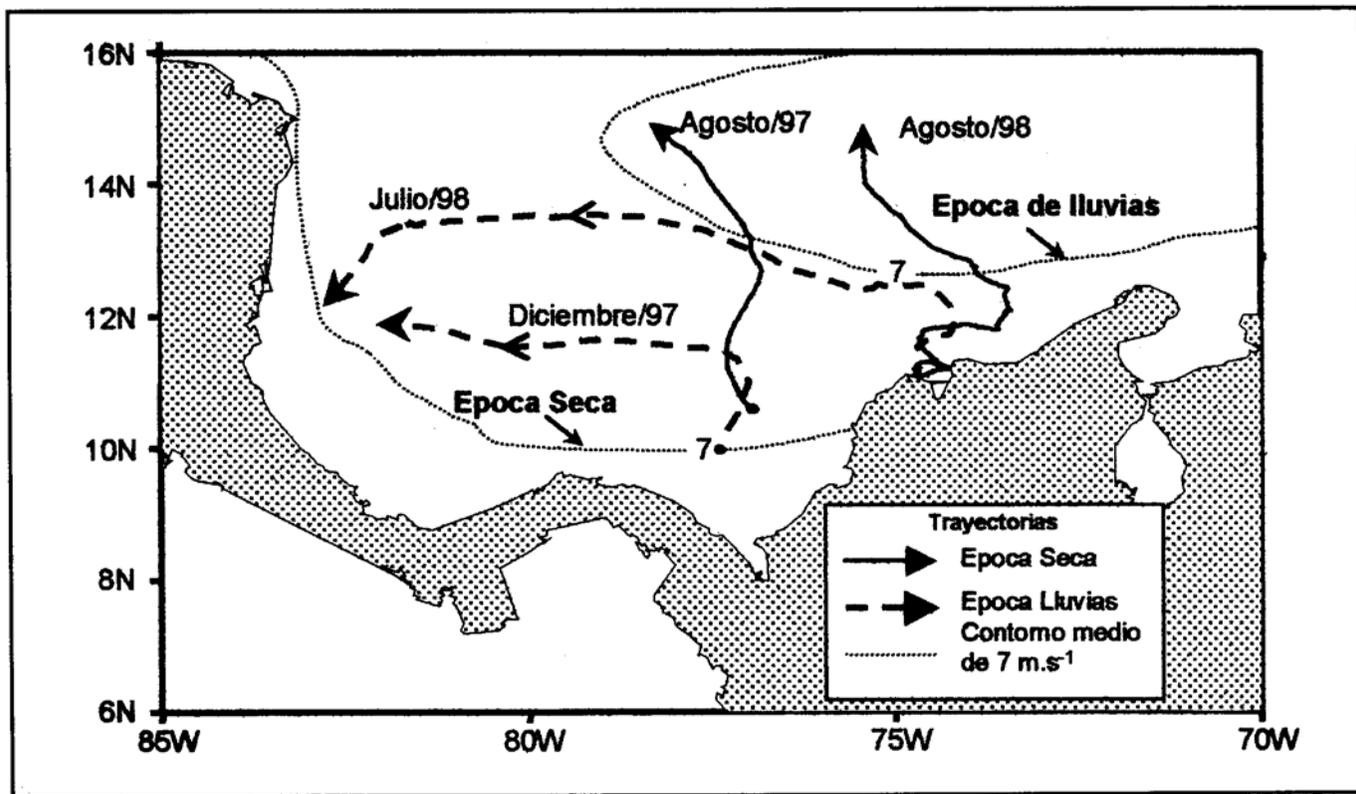


Figura 9. La circulación superficial en el Caribe suroccidental tiene una dependencia importante en los cambios de la velocidad del viento que ocurren en el centro del Caribe como puede observarse en la deriva de las boyas. Dos ejemplos de pares de trayectorias empezando en el mismo lugar, tomaron diferentes rutas, relacionadas con la velocidad del viento. El contorno de $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ de velocidad del viento (líneas punteadas) está señalado para las estaciones seca y de lluvias. Cuando los Alisios del norte se intensifican en la estación seca (diciembre) o en el Veranillo (julio) a la circulación superficial cierra el brazo norte del Giro Panamá-Colombia (trayectorias punteadas). Cuando el viento se relaja a menos de $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en la estación de lluvias, el giro ciclónico se retira de la parte Este y las aguas superficiales se mueven hacia el Norte y Noroeste (trayectorias continuas).

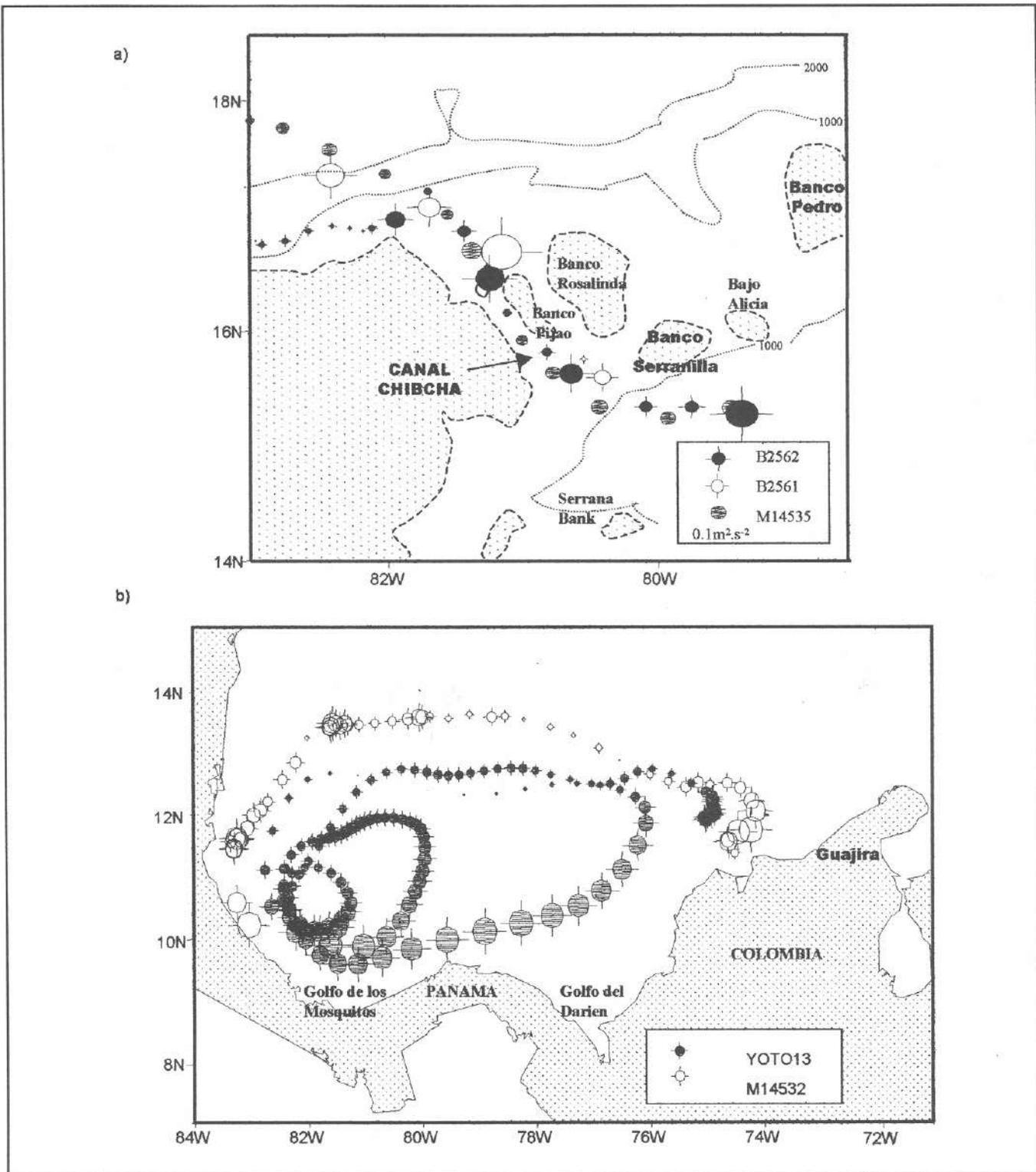


Figura 10. Posición diaria de las boyas en a) la salida al Mar Caimán y b) en el Caribe Suroccidental. El tamaño de los círculos es proporcional al promedio diario de la energía cinética. Las boyas aceleraron justo después de entrar al Canal Chibcha. El brazo Sur –La Contracorriente Panamá-Colombia– fue siempre más intensa que en cualquier otra parte.

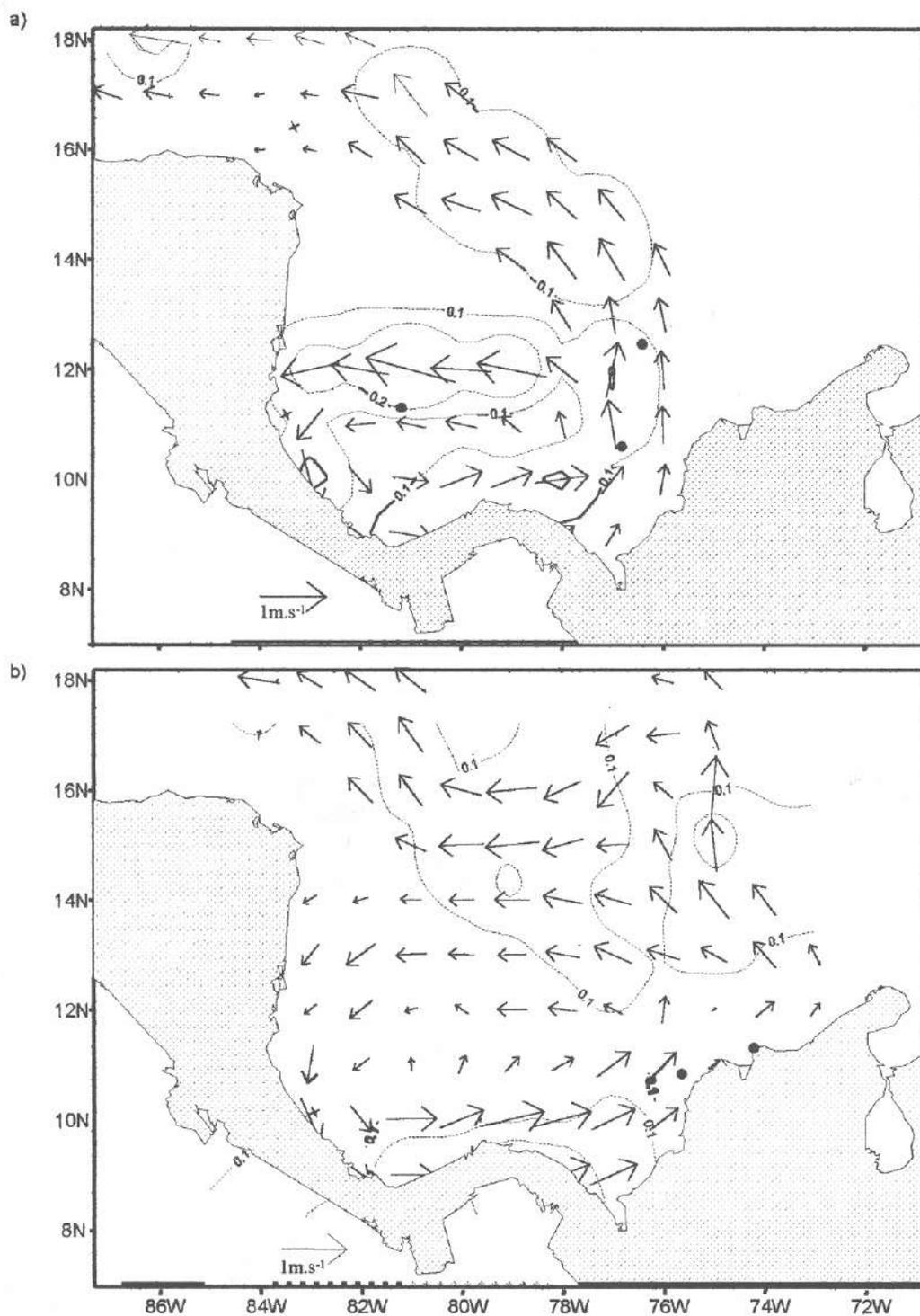


Figura 11. Las corrientes superficiales en el Caribe Suroccidental deducidas de las trayectorias de las boyas durante a) agosto-diciembre 1997 y b) julio-noviembre 1998. Ambos grupos cubren las respectivas estaciones de lluvias. En 1997 las mayores velocidades en el brazo norte del Giro Panamá-Colombia son debidas al comienzo en la estación de vientos en diciembre. La velocidad del Giro nunca fue menor de 0.5 m.s^{-1} . Los campos de velocidad en superficie muestran el Giro entregando aguas hacia el Norte y Noroeste. Los contornos son energía cinética en m^2s^{-2} .

del Caribe Central cerca de 13° N giró hacia el Oeste con aguas más frías (<28° C) del afloramiento de la Guajira dirigiéndose hacia el Caribe Suroccidental al finalizar junio. YOTO13 tomó todo el mes de julio 1998 viajando de la costa colombiana al Golfo de Mosquitos en la costa Costarricense (Figura 6a).

Esta boya aceleró a velocidades mayores de 1.1m.s⁻¹ mientras viajó hacia el Este con la Contracorriente de Panamá-Colombia, regresando de nuevo a lo largo de 13° N y completando un giro completo en cerca de un mes durante agosto 1998. En lugar de dar la vuelta completa de nuevo, YOTO13 hizo un giro ciclónico completo en el Golfo de Mosquitos por primera vez en septiembre 1998 describiendo una espiral hacia el centro de este ciclón, haciendo dos vueltas durante octubre 1998 (Figura 6b). Esta boya dejó el ciclón para seguir una trayectoria más amplia durante noviembre 1998 (Figura 6c), sin embargo un poco más corto que los giros previos, durante un mes.

Durante diciembre 1998 y enero de 1999, YOTO13 giró alrededor del Golfo de Mosquitos dos veces (Figura 7a), mientras la temperatura superficial disminuyó debido a la estación climática. En febrero 1999, YOTO13 viajó al Sur y dejó el Golfo de Mosquitos con la Contracorriente a velocidades cercanas a 1m.s⁻¹ y mientras giró de nuevo hacia el Oeste a lo largo de 12° N, bajó su velocidad tomando todo marzo 1999 para llegar de nuevo al Golfo de Mosquitos (Figura 7 b). YOTO13 rotó de nuevo alrededor del ciclón en el Golfo de Mosquitos durante abril y mayo 1999 (Figura 7c) haciendo una espiral hacia el centro, a razón de una vuelta por mes.

La temperatura superficial del mar en el Caribe suroccidental mostró una señal estacional bien definida de alrededor de 4°C (Figura 8). Las aguas superficiales fueron de 26.5° C al final de la estación de vientos (el invierno boreal) y cerca de 30°C en la estación de lluvias, en el verano boreal. Durante el monzón, la temperatura superficial aumenta en el área debido a la disminución de la velocidad de los vientos. Sin embargo las temperaturas superficiales de las boyas también mostraron fuentes de aguas más frías en el Norte de la costa colombiana y en el Sur del Golfo de Mosquitos, a pesar de la señal estacional, debido a que las aguas afloradas en la costa de la Guajira son arrastradas al Oeste en el ramal norte del Giro Panamá-Colombia y aguas más frías (al menos un grado) fueron detectadas en el centro del ciclón en el Golfo de Mosquitos.

4. La deriva alrededor del Giro Panamá-Colombia

Las boyas B2560, M14535 y YOTO13 mostraron, en forma evidente, que la circulación alrededor del Caribe

Suroccidental es ciclónica y que existe un ciclón en el Golfo de Mosquitos. Sin embargo, tomaron diferentes lapsos de tiempo para hacer una rotación completa. B2560 hizo una vuelta completa en 19 días mientras que YOTO13 tomó casi dos meses para hacerlo en febrero-marzo 1998. La deriva de YOTO13 fue la más impresionante ya que giró, alrededor del Golfo de Mosquitos seis veces y del Giro Panamá-Colombia en cuatro ocasiones.

Hay varios aspectos comunes en el comportamiento del conjunto de boyas, en términos de su rotación alrededor del Caribe Suroccidental, y de su forma de dejarlo. Debido a la amplia variabilidad de la escala de tiempo en la rotación alrededor del Giro Panamá-Colombia y a su 'preferencia' espacial para girar alrededor, ya sea de ciclones más o menos grandes, el tiempo de residencia del agua superficial en el Caribe Suroccidental puede variar entre un mes y un año.

Las boyas de deriva viajaron muy cerca de la costa de Panamá y giraron al Sureste cerca de San Blas, pero viajaron lejos de la costa colombiana. Esta característica muestra que la Contracorriente es un flujo muy estrecho cerca de las costas centroamericanas y más ancho afuera de la costa colombiana.

El punto de giro hacia el Oeste frente a las costas colombianas varió muy ampliamente (ver Figura 5). Las boyas derivaron dentro del Golfo del Darién con el flujo Este y giraron ciclónicamente antes de 76° W (solo una alcanzó a llegar más allá de 74° W) viajando al Oeste entre 14° N y 12° N, ya fuese cerrando la celda o girando al Noroeste hacia su salida en la Elevación Centroamericana.

Cuando B2561 y B2562 viajaron al Norte dejando la influencia del Giro de Panamá-Colombia, el viento era del Este-Sureste y tenía velocidades cercanas a 5m.s⁻¹. Cuando B2560 llegó a la misma área, el viento era del Este pero con velocidades alrededor de 10m.s⁻¹. Entonces, existe un umbral entre esas dos velocidades del viento que parece modular la corriente superficial cerrando el Giro. En una primera aproximación, el umbral es de alrededor de 7m.s⁻¹ en los Vientos Alisios del Norte, ya sea para cerrar el Giro o para dejar escapar, al sistema de la Corriente del Caribe, las aguas superficiales (Figura 9).

El análisis diario de la energía cinética promedio muestra que la Corriente del Caribe siempre acelera al cruzar el Canal Chibcha (Figura 10a) y en el brazo sur del Giro, la Contracorriente de Panamá-Colombia.(Figura 10b).

5. Campos Estacionales Eurlianos

La interpolación estacional de las trayectorias de las derivas de las boyas fue hecha mediante el promedio de

todas las velocidades de las boyas dentro de una grilla, de un grado de latitud por un grado de longitud, durante la estación de lluvias de 1997 y durante las estaciones de vientos y de lluvias de 1998, para obtener una visión 'eureliana' de los mismos mecanismos atrás descritos.

Durante la estación de lluvias de 1997 (Figura 11a) el Giro de Panamá-Colombia fue aumentado debido a la intensificación del viento pero también aparece 'abierto' en su extremo Este, 'despidiendo' agua superficial del Giro hacia el Norte. La máxima energía cinética ocurrió a lo largo de 13°N cuando el viento en el Caribe Central se intensifica. Durante la estación de lluvias de 1998 (Figura 11b) el Giro estuvo 'abierto' en su parte Este, permitiendo que la circulación hacia el Norte evacuará agua del Giro. Las máximas velocidades se presentaron frente a las costas de Panamá, donde la Contracorriente tuvo siempre máxima intensidad.

Durante la estación de vientos de 1998-11999 (Figura 12) el Giro de Panamá-Colombia estuvo 'cerrado' por la

intensificación de los Vientos Alisios que van al Oeste. La energía cinética máxima en la superficie del mar estuvo relacionada con el estrés ejercido por aquellos vientos en la parte Norte del Giro. El Giro se apartó de la costa colombiana y se restringió al Golfo de Mosquitos hasta el norte de Panamá.

6. Conclusiones

Las observaciones lagranianas, hechas con boyas de deriva entre 1997 y 1999, mostraron la persistencia del llamado Giro Panamá-Colombia a lo largo del periodo de observación. Las velocidades medias de la Contracorriente de Panamá-Colombia estuvieron próximas a $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ notablemente intensas si se comparan con la circulación general del Caribe, que normalmente es de la mitad.

También se encontró un remolino que domina el Golfo de Mosquitos de manera persistente a través de los dos años de observación. Esta celda ciclónica fue una característica permanente, independiente de la estación

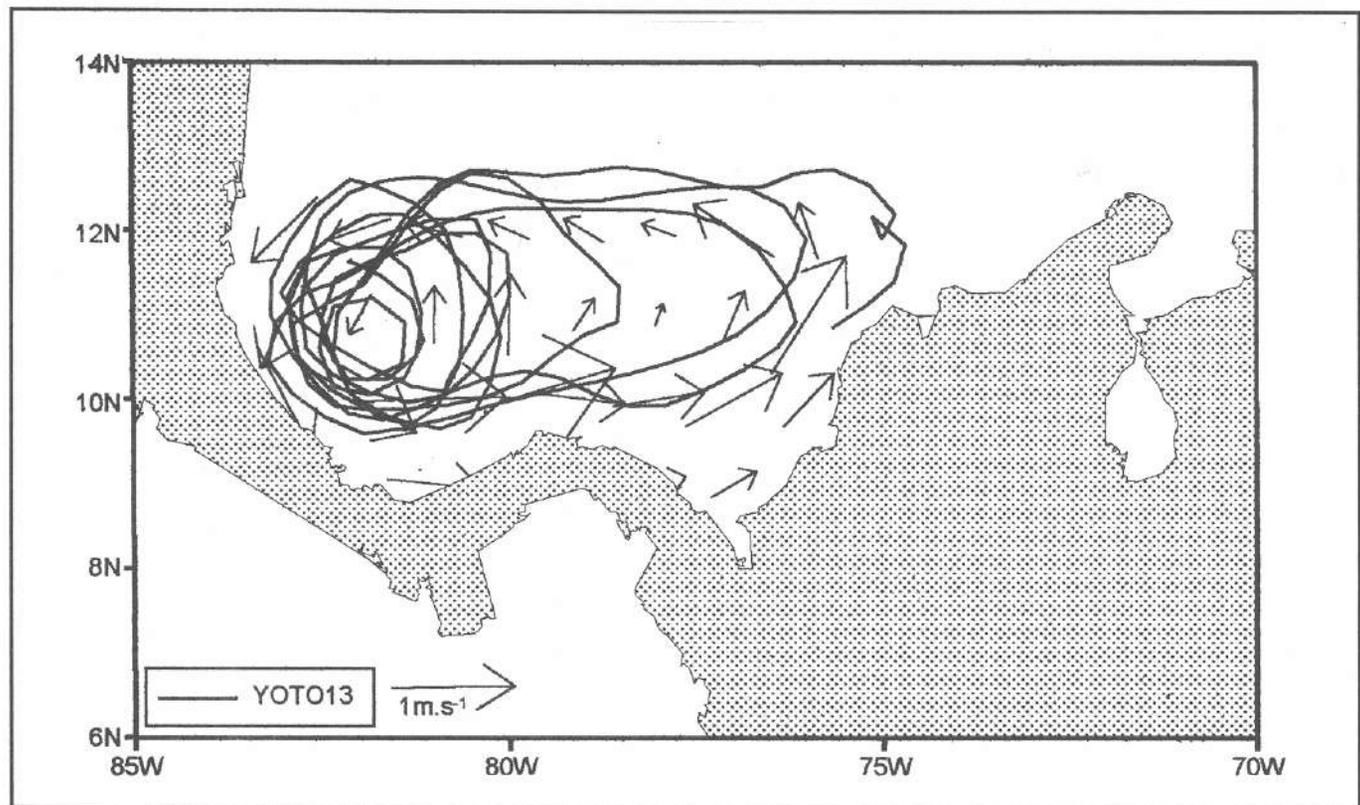


Figura 12. Las corrientes superficiales durante la estación de vientos de 1998/1999 (diciembre-marzo) como fueron deducidas de la trayectoria de la boya YOTO13. Las velocidades máximas en el Giro Panamá-Colombia fueron alrededor de $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en el brazo Sur - La Contracorriente Panamá-Colombia.

climática. Las aguas dejaron el ciclón siguiendo la Contracorriente a lo largo de la costa centroamericana y recircularon o dejaron el Giro de Panamá-Colombia derivando hacia el Norte de acuerdo con el estrés del viento en superficie frente a las costas colombianas.

Los fuertes vientos del Caribe Central juegan un papel importante en el comportamiento de la circulación superficial en Caribe Suroccidental, como lo describieron las derivas de los grupos de boyas estudiados. Hay un umbral en la velocidad del viento superficial de cerca de $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en el centro del Caribe (cerca de 14°N), necesario para obtener suficiente estrés en la circulación superficial y construir el brazo norte del Giro Panamá-Colombia. Las aguas dejaron el Giro y 'escaparon' hacia el Norte o el Noroeste frente a las costas de Colombia cuando bajó la velocidad del viento.

Todas las boyas lanzadas en la Cuenca de Colombia que no encallaron, aceleraron hacia el Noroeste y salieron hacia el Mar Caimán confirmando estimaciones previas sobre la circulación superficial en esa área (Parr, 1936). El eje de la Corriente del Caribe cruza el Canal Chibcha a pesar de que existen pasos más profundos en la Elevación Centroamericana.

Reconocimientos

El presente trabajo fue hecho con los auspicios del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología 'Francisco José de Caldas' (COLCIENCIAS) y del Concejo Británico durante el proceso de doctorado del autor en la Universidad de Gales. La Armada Nacional proveyó los buques para el lanzamiento de las boyas y el trabajo se realizó en las instalaciones del CIOH en Cartagena. La Dra. Maria. Criales contribuyó con los datos de las boyas de deriva del proyecto del INVEMAR- U. de Miami. Mis agradecimientos son para el Dr. Eric Desmond Barton por su asesoría en el presente trabajo y a Jakeline Benavides MSc. por su colaboración en la preparación del texto y las figuras.

7. Bibliografía

- Andrade, C.A.. 2000. The circulation and mesoscale variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea. [La circulación y variabilidad de media escala de la Cuenca de Colombia en el Mar Caribe], Tesis doctoral, Universidad de Gales, 228 pp.
- _____ & A. Duarte, 1992. Estudio oceanográfico y de suelos en el Golfo de Salamanca, Rep. Técnico *ECOPETROL- Colombia*, 175 pp.
- Blanco, J.A., 1988. Las variaciones ambientales estacionales en las aguas costeras y su importancia para la pesca en la región de Santa Marta, Caribe Colombiano, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, 50 pp.
- Criales, M. M., T. Lee, C. Yeung, E. Williams, C. Andrade, A. López & F. Amaya, 1999. Onshore larval transport in the Santa Marta Region, Colombian Caribbean with a general description of the SW Caribbean circulation through Argos buoys and altimetry data [Transporte costero de larvas en la región de Santa Marta, Caribe Colombiano con una descripción general de la circulación del Caribe Suroccidental a través de boyas Argos y datos de altimetría] *Primera Reunión Científica Bianual de la Iniciativa para el Mar Intra-americano. noviembre 9-11* (abstract).
- Etter, P.C., P.J. Lamb & D.H. Portis, 1987. Heat and freshwater budgets of the Caribbean sea with revised estimates for the Central Americas Seas, *J. Phys. Oceanogr.*, 17(8), 1232-1248.
- Leaman, K.D. & W.D. Wilson, 1999. Physical Variability of Surface Currents in the Panama-Colombia Gyre: Nature, causes and comparisons with a high resolution numerical-model. [La variabilidad física de las corrientes superficiales en el Giro Panamá-Colombia, naturaleza, causas y comparación con modelos numéricos de alta resolución]. *Primera Reunión Científica Bianual de la Iniciativa para el Mar Intra-americano. noviembre 9-11* (abstract).
- Molinari, R., M. Spillane, I. Books, D. Atwood & C. Duckett, 1981. Surface currents in the Caribbean sea as deduced from Lagrangian observations: *J. Geophys. Res.*, 86, 6537-6542.
- Mooers, C.N.K. & G.A. Maul, 1998. Intra-Americas Sea Circulation [La circulación del Mar Intra-americano], en: *The Sea*, editores. K. H. Brink and A. R. Robinson, 1062 pp., Wiley, New York.
- _____ & L. Gao, 1996. Numerical simulation of the Intra-Americas Sea, Part I. [Simulación numérica del Mar Intra-americano; Parte 1] *Trans. Amer. Geophys. Union.* 76, OS 118, suppl. (solo abstract).
- Nystuen, J.A. & C.A. Andrade, 1993. Tracking mesoscale ocean features in the Caribbean Sea using GEOSAT altimetry, [Siguiendo rasgos oceánicos de media escala en el Caribe utilizando el altímetro de Geosat] *J. Geophys. Res.*, (98), 8389-8394.
- Parr, A.E., 1936. A contribution to the Hydrography of the Caribbean and Cayman Seas, based upon the observations made by the Research Ship 'Atlantis', 1933-1934. [Una contribución a la hidrografía del Mar Caribe y Mar Caimán basada en observaciones hechas por el Buque Oceanográfico "Atlantis", 1933-1934], *Bull. Bingham Oceanogr. Collect.*, 5(4).
- Pujos, M., J. L. Pagliardini, R. Steer, G. Vernet & O. Weber, 1986. Influencia de la contra-corriente norte colombiana para la circulación de las aguas en la plataforma continental su acción sobre la dispersión de los efluentes en suspensión del río Magdalena, *Bol. Cient. CIOH*, 6, 3-15.

APUNTES SOBRE LA ESTRATIGRAFÍA Y LA TECTÓNICA DE LA CUENCA INFERIOR DEL CATATUMBO COLOMBIANO

por

Jaime Galvis Vergara¹, Ricardo de la Espriella², Ricardo Cortés Delvalle³ & Guillermo Ujueta⁴

Resumen

Galvis Vergara J., R. de la Espriella, R. Cortés Delvalle, & G. Ujueta. Apuntes sobre la estratigrafía y la tectónica de la cuenca inferior del Catatumbo Colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **25**(96): 337-361, 2001. ISSN 0370-3908.

Adicionalmente al conocimiento tradicional de la geología de esta región, se observa que existen dos secuencias sedimentarias diferentes en la cuenca inferior del Catatumbo Colombiano, depositadas en diferentes ambientes, puestas en contacto por una gran falla direccional SW-NE, conocida como Falla Río de Oro o Falla San Lucas. Los sedimentos del bloque Oriental de la falla son parte de la cuenca sedimentaria de Tibú y Cúcuta. Los sedimentos del bloque Occidental presentan afinidad con los del valle del río Cesar, en la zona de La Jagua, y con los de la región de Machiques al noroeste del Estado de Zulia en Venezuela.

Además de la anterior, hay una gran falla direccional N-S, denominada Falla Catatumbo, la cual parece ser cogenética con la de Río de Oro y otras fallas locales. Las formas de las estructuras que se observan en esta región son típicas de áreas donde domina una tectónica transcurrente.

Palabras clave: Estratigrafía, Tectónica, Río Catatumbo, Colombia.

Abstract

In addition to the traditional knowledge of the geology of the Colombian Lower Catatumbo Region, the present paper indicates the presence of different stratigraphic sequences at each side of the transcurrent SW-NE Río de Oro (or San Lucas) fault. The sediments of the Eastern block are part of the Tibú-Cúcuta basin, while the sediments of the Western block are similar to those present in the La Jagua area (Cesar Valley basin) and in the Machiques region (NW Zulia District) in Venezuela.

There is another large N-S directional fault, the Catatumbo Fault, which is apparently cogenetic with the Río de Oro Fault and other local faults. The shape of the regional structures is typical of areas where transcurrent tectonism is predominant.

Key words: Stratigraphy, Tectonics, Catatumbo river, Colombia.

1 Transversal 19 No. 61-33, Bogotá D.C., Colombia.
 2 Carrera 13 A No. 90-21 Of. 403, Apartado Aéreo 92094, Bogotá D.C., Colombia. E-mail: ricardo@cachivaches.com
 3 Carrera 13 A No. 90-21 Of. 403, Bogotá D.C., Colombia. E-mail: consultasoc@colomsat.net.co
 4 Diagonal 130 No. 9B-28 Apto. 202, Bogotá D.C., Colombia.

Introducción

El conocimiento geológico es un acopio progresivo y evolutivo de datos e ideas, tendiente a tratar de acercarse a la verdad, que en forma absoluta nunca se alcanza. En la zona del Catatumbo (Ver figura 1) se han hecho estudios desde los años 20's, con los cuales se han ido descubriendo aspectos favorables a la acumulación de hidrocarburos. Esas ideas han producido descubrimientos muy notables. En el presente estudio se ha hecho un esfuerzo para revisar algunos conceptos sobre la geología de la cuenca inferior del Catatumbo Colombiano, desde puntos de vista adicionales.

La bibliografía disponible es extensa e iterativa. De ella, los mapas e informes consultados se citan en el capítulo final. Adicionalmente se revisaron numerosos registros de pozos y líneas sísmicas, lo cual, añadido a una revisión de evidencias observables en el terreno y a una interpretación fotogeológica de toda el área constituyen las bases del presente artículo.

Geomorfología

La región objeto del estudio presenta cinco paisajes geomorfológicos: Llanura del Lago Maracaibo, Serranías

de Tibú y San Lucas, Paisaje de Mesetas, Valle Catatumbo-Caño Tomás y Vertiente de la Cordillera.

Llanura del Lago Maracaibo

Comprende la zona Oriental del área, desde el piedemonte de las Serranías de Tibú y San Lucas, hasta el territorio de Venezuela.

Presenta tres morfologías fácilmente diferenciables:

- **Llanura**, cubierta de arenas eólicas de drenaje dendrítico y ocasionalmente angular. Es una red hidrográfica relativamente poco densa y se presenta al extremo oriental, hacia la zona de Vetas de Oriente, al pie de la Serranía de Tibú y al Sur llegando a Caño La Raya, donde afloran arcillas y localmente se presentan lagunas y pantanos. También se observa en la región de Tresbocas, al Este de Tibú y en el curso inferior del río Sardinata.
- **Zona de Colinas** de arena eólica levantada, la que alcanza alturas superiores a 100 metros y presenta una topografía muy accidentada por la rápida erosión de las arenas, lo que produce profundas cárcavas, zanjones y cañadas.

Este tipo de morfología se presenta entre los ríos Vetas y Catatumbo, principalmente al Este de la carretera La Gabarra-Tibú y en el sector comprendido entre el río Vetas y el caño La Raya, donde se encuentra el Alto del Mirador.

- Las **planicies aluviales** de los ríos de Oro y Catatumbo, hacia el sector Nordeste, y más al Sur las de los ríos Nuevo Presidente, Tibú y Sardinata. Allí se presenta una llanura de inundación, con meandros abandonados y complejos orillares. Predominan depósitos aluviales de granulometría fina y algunas terrazas bajas.

Serranía de Tibú - San Lucas

Comprende una cuchilla de dirección N-S de poca altura, asimétrica, que presenta cinco sectores bien definidos:

- La parte Sur, desde la población de Las Mercedes hasta el caserío de Pacelli, presenta las cotas más altas y es un sector donde más que una cuchilla, parece una meseta inclinada hacia el Este, cortada por profundos cañones de los ríos Danta, Nuevo Presidente y Tibú.
- Desde la localidad de Pacelli hasta la cabecera de la Quebrada Pedregosa, se presenta una serranía baja y continua, en un solo cordón, la cual conforma el di-

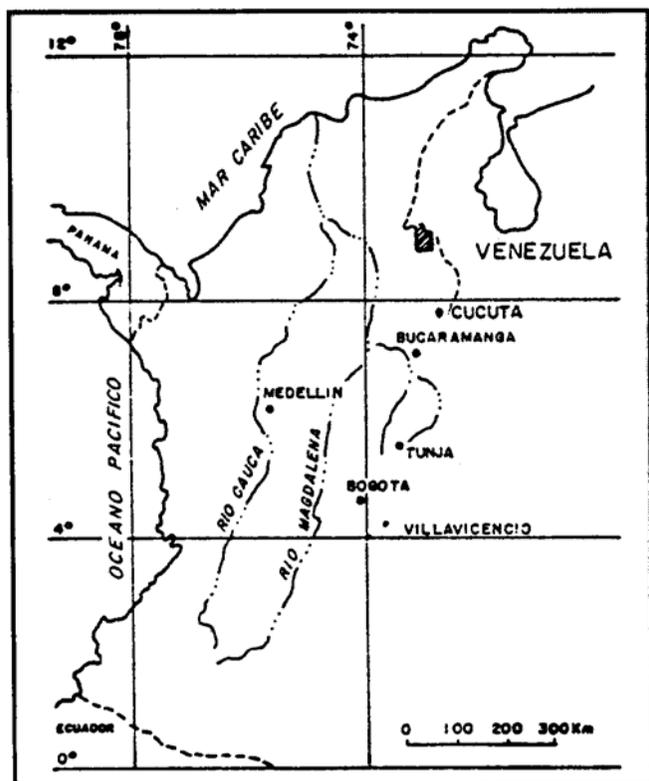


Figura 1. Mapa de localización.

vorcio de aguas entre el río Catatumbo y los ríos Vetas y Socuavo; es notablemente asimétrica, con un flanco oriental suavemente inclinado y una vertiente occidental abrupta a escarpada.

- En el sector comprendido entre la quebrada Pedregosa y los nacimientos del caño Esmeralda, la Serranía pierde continuidad morfológica, reduciéndose a lomas aisladas y erráticas. En todo ese sector no constituye el divorcio de aguas. Las corrientes que afluyen al río Vetas, tales como caño Negro y caño Arenas, tienen sus cabeceras un tanto más hacia el Occidente del término promedio que se evidencia en los tramos adyacentes de la Serranía.
- El sector entre el nacimiento de caño Esmeralda y un cañón estrecho al Sur del ascenso de la carretera entre Puerto Barco y El 40. En la parte comprendida en esos límites, la serranía presenta dos cordones, como se puede observar en la finca La Esperanza, al Oeste de La Gabarra. En este sector el río Catatumbo cruza la serranía, formando un cañón estrecho.
- La serranía de San Lucas propiamente dicha, comprendida desde proximidades de El Cuarenta hasta el Río de Oro. Presenta un notable cambio de dirección hacia el noreste. La vertiente oriental se hace bastante empinada y alta; la occidental presenta menor altura y pendiente más suave.

Paisaje de Mesetas

Esta unidad geomorfológica se presenta al Occidente de la Serranía Tibú-San Lucas. Comprende mesas estructurales ligeramente inclinadas, dando un paisaje que es común al sur, en la región al oriente de las fallas de Catatumbo y Las Mercedes, y se puede dividir en tres áreas fácilmente diferenciables:

- Un **Area Sur**, donde se presentan formas mesetarias entre las Fallas de Las Mercedes y Catatumbo al Oeste y el río Sardinata al Este. Dichas mesetas se presentan cortadas por cañones que pueden superar los 500 m de profundidad.
- Un **Area Central**, limitada por la serranía de Tibú al Este y el valle del Catatumbo al Norte. Esta subzona comprende una mesa estructural que buza suavemente hacia el Oriente y forma un pronunciado escarpe en su borde occidental.
- Un **Area Norte**, limitada al Este por la serranía de San Lucas, al Oeste por el valle de los caños San

Miguel y Tomás, y al Sur por el Cañón del río Catatumbo. Este paisaje continúa hacia el Norte, en territorio de Venezuela. Básicamente comprende un semi-círculo de mesetas, cuyo centro hacia donde buzan se halla al Norte, en territorio de Venezuela. Las mesetas allí forman una especie de cubeta cuyos bordes hacia el Sur, Oeste y aún Este, son escarpes de altura variable.

Valle Las Mercedes - Río Catatumbo - Caño Tomás

Este paisaje comprende una llanura alargada en sentido Norte-Sur, cuya anchura máxima es de aproximadamente 6 kilómetros. Limita al Oriente con el paisaje de Mesetas, hasta las bocas de la quebrada Pedregosa; de allí hacia el Sur, con el paisaje de Serranía de Tibú-San Lucas. Al Occidente limita con la vertiente de la Cordillera.

Esta morfología no presenta diferencias que permitan subdividirla. Básicamente comprende una depresión de origen tectónico-litológico, por la que se encauzó el río Catatumbo, el río Orú y parte de los ríos Tibú, Nuevo Presidente y Danta.

La morfología de las vertientes de Caño Tomás tiene características dignas de mención. En primer lugar, es notable la altura topográfica de algunas terrazas. Al Sur de Caño Martillo se observan restos de terrazas, cuya base se encuentra por encima de la cota 100 m.s.n.m., esto es, más de 50 metros sobre el lecho del Catatumbo. Es interesante además anotar que se observan terrazas afectadas por fallamiento en varios sitios de esta planicie.

Otro aspecto importante es la presencia de potentes terrazas en el Valle de Caño Tomás, cuya continuidad con las de Caño San Miguel y las del Río Catatumbo sugiere que este último tuvo un curso hacia el Norte, confluyendo con el Río de Oro, donde hoy lo hace Caño Tomás. Por lo tanto, el actual lecho del Río Catatumbo, de las bocas de Caño Castillo hacia el Nordeste, es originado por una captura posterior.

Hacia el borde Occidental de este valle, es espectacular la presencia de sedimentos aluviales recientes en el valle Catatumbo-San Miguel-Tomás. Actualmente está dispuesto como residuos en forma de terrazas. Al observarlas en conjunto, estas terrazas sugieren la existencia de abanicos aluviales, cuyos ápices y fuentes de aporte se derivaron del Occidente y/o vertiente de la cordillera. Es decir, que las terrazas aluviales corresponden a remanentes de los citados abanicos, como puede observarse en las imágenes de satélite, y aún deducirse de los planos topográficos de escala 1: 25.000.

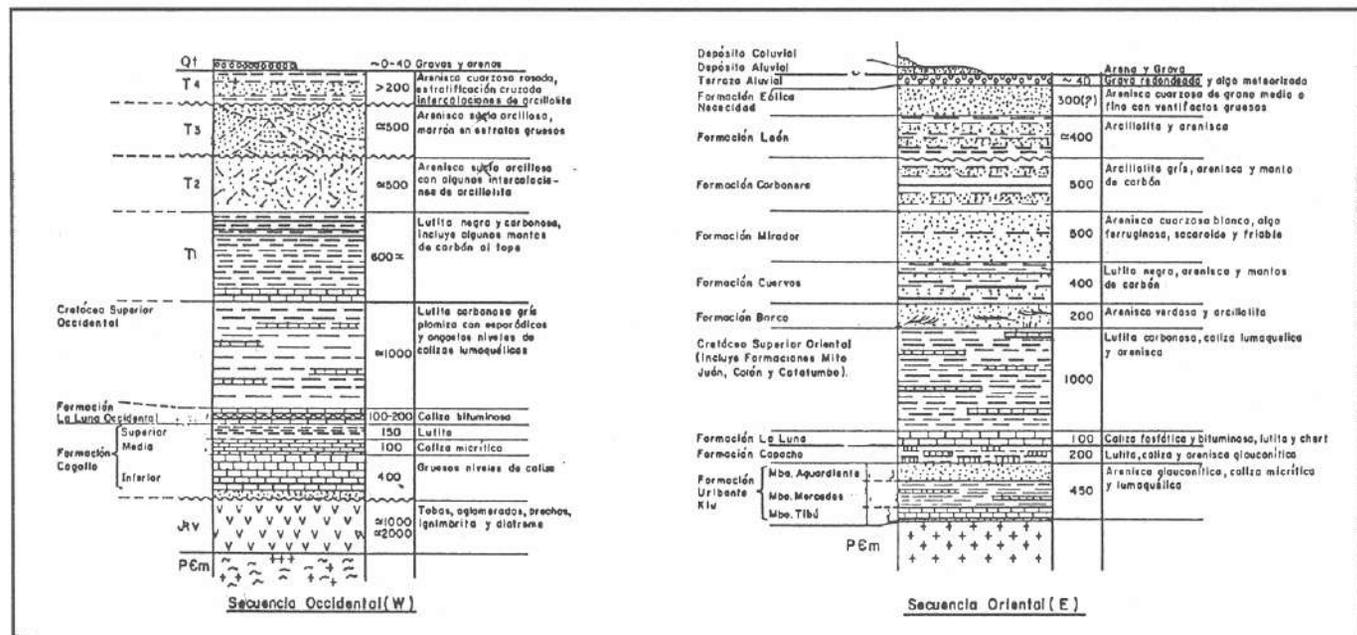


Figura 3. Columnas estratigráficas generalizadas.

rior del Catatumbo y en la Sierra de Banderas, al Sur. Generalmente el contacto granito-neis es gradacional.

El Precámbrico comprende además esquistos y filitas de composición aluminica y cuarzoza. Se trata en general de metapelitas y meta-areniscas con un bajo grado de metamorfismo. Estas unidades se observan en el curso superior de los caños Brandy, Castillo, Las Micas y Martillo, en el río Catatumbo aguas arriba de su confluencia con el río Tarra y al Oeste de Caño Tomás, donde predominan las meta-areniscas. Hay también amplias exposiciones de esquistos en la vía que conduce de Las Mercedes a Sardinata, al Sur de la Falla Las Mercedes. Entre los cerros que forman las metamorfitas en mención, cabe destacar el cerro de Las Tres Tetas hacia la cabecera de Caño Castillo. No puede descartarse la posibilidad que parte de estas unidades sean más jóvenes.

Paleozoico

Hay algunas áreas dentro de la Cuenca Hidrográfica del río Catatumbo, donde se presentan exposiciones de rocas de edad Paleozoica, pero se encuentran muy distantes de la zona objeto del presente estudio. Son sectores próximos a la divisoria de aguas entre los ríos Magdalena y Catatumbo, por lo cual no tiene objeto su descripción en este artículo.

Mesozoico

En la cuenca del Catatumbo hay amplias exposiciones de unidades geológicas del Mesozoico. Pueden diferenciarse en ellas las vulcanitas, plutonitas y sedimentos rojos del Mesozoico Inferior y los sedimentos marinos del Cretáceo.

Mesozoico Inferior

Las unidades litológicas que comprende el Mesozoico temprano constituyen las rocas más recientes del basamento petrolífero en toda el área del Catatumbo. Probablemente en el área de interés solo se encuentra representado el Jurásico, ya que los sedimentos del Triásico, típicos de la Formación Bocas y conocidos en áreas vecinas de la Serranía de Perijá y en el Valle del Magdalena, no han sido observados en la Cuenca Hidrográfica del Catatumbo.

El Jurásico se encuentra ampliamente representado por extensas exposiciones de vulcanitas alcalinas, equivalentes a la Formación La Quinta y localizada en las cabeceras de Caño Tomás y del Río de Oro, al Oeste de su confluencia, y en amplias zonas de las cuencas hidrográficas de los ríos Catatumbo y Tarra. Dichas vulcanitas comprenden riolitas, riodacitas, traquitas, y traquiandesitas, en una am-

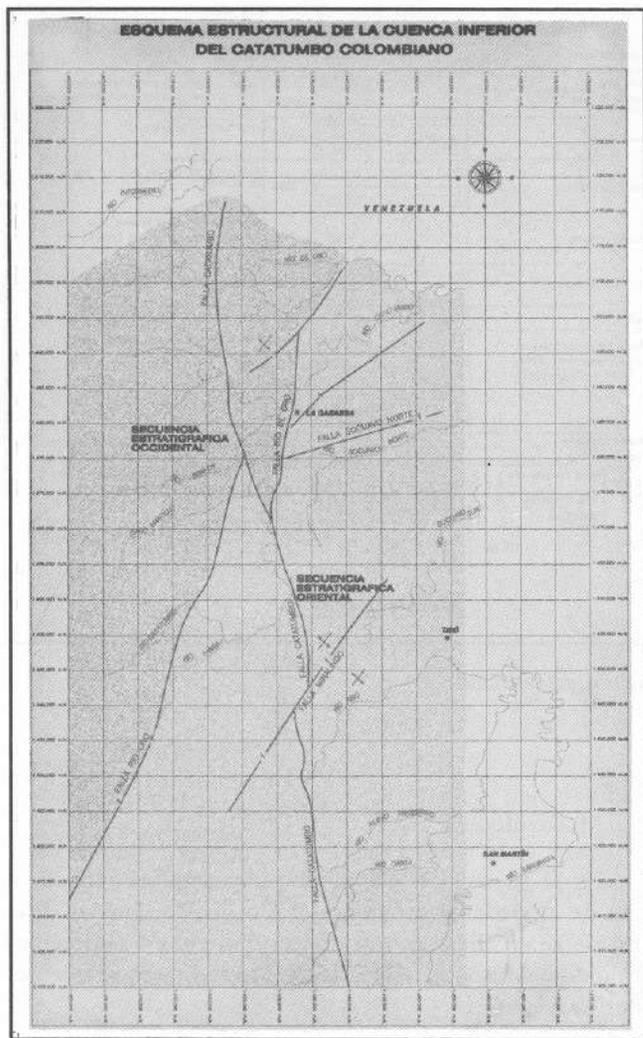


Figura 4.

plia variedad de texturas, tales como aglomerados, brechas volcánicas, tobas, ignimbritas, lapilli, lavas, etc. Los eventos volcánicos del Jurásico originaron extensos diatremas en la región comprendida entre las localidades de Hacarí, San Calixto y Convención.

Además de rocas efusivas, el magmatismo Jurásico produjo plutonitas emplazadas a manera de "stocks" expuestos en áreas reducidas, tales como el granito de Caño Castillo al Oeste del Valle del Catatumbo, y otros en la zona de la cordillera. Estas intrusiones son de poca extensión y producen depresiones topográficas, a diferencia de las amplias zonas de exposición de granitos migmatíticos Precámbricos localizados hacia el flanco occidental de la Cuenca en mención.

Además de las unidades mencionadas, el Jurásico también incluye espesos depósitos de sedimentos rojos, tales como conglomerados, areniscas y pelitas, los cuales cubren extensas zonas en las vertientes de los ríos Catatumbo y de Oro, y cuyas exposiciones más próximas se encuentran al Oeste del caserío de Pacelli al Sur de Orú y a lo largo de la Quebrada La Tiradera al Sureste del Valle del Catatumbo. Las unidades litológicas del Jurásico se pueden identificar además en los guijarros de las terrazas de los ríos Catatumbo y de Oro, donde se presentan con profusión.

Cretáceo

La secuencia litológica del Cretáceo, en la Cuenca Hidrográfica del Catatumbo, se inicia cronológicamente con la Formación Rionegro, la cual solo se menciona muy brevemente ya que no se observó en el área objeto del presente estudio. Comprende areniscas arcóscicas y lentes de conglomerados líticos. Es interesante anotar que esta formación se presenta al Norte del área del Catatumbo, en la región de Machiques, y al occidente en la cuenca del río Cesar. Hasta el momento no se ha observado en el área estudiada, pero dado que se compone de sedimentos fluviales de espesor muy variable, no es descartable que pueda presentarse.

Los sedimentos del Cretáceo de origen marino, se mencionarán diferenciando una secuencia occidental al oeste de la Falla de Río de Oro y otra secuencia Oriental al sureste de la misma.

La secuencia Cretácea Oriental se inicia con una arenisca conglomerática basal de pocos metros de espesor, arcóscica, cuyo grano gradualmente se hace fino y sobre la cual reposa una espesa secuencia de calizas fosilíferas, densas, de color gris azulado, con algunas intercalaciones de shale margoso y limolita calcárea. Se observaron amplios afloramientos en el Cañón del río Catatumbo, a lo largo de la carretera que conduce del caserío de Orú al municipio de El Tarra. En el sitio mencionado, la secuencia calcárea tiene más de 100 metros de espesor.

La unidad descrita se conoce en la literatura geológica como Formación Tibú, o como Miembro Tibú de la Formación Uriabante. **Notestein** et al. (1944) la describe así:

"The Tibú member has at its base a sandstone 5 to 12 meters thick representing the initial Uriabante deposit. It is coarse-grained and contains small pebbles of quartz and a few of the orthoclase in the lower part, the pebbles rarely attaining 2 centimeters in diameter. It becomes fine-grained and calcareous at the top. Cores of the basal sandstone from Tres Bocas No. 2-A are somewhat carbonaceous. Overlying the basal sandstone is 95 to

160 meters of gray densely crystalline fossiliferous limestone, containing some shale and fine-grained sandstone in its lower half. The upper 50 meters of this member is practically all limestone, and its top is sharply limited by a change to shale. This sharp contact has appeared in all well sections. The thickness of the Tibú member ranges from 107 to 117 meters in wells, but in Quebrada Santa Elena it appears to be 166 meters thick. The entire Uribante formation is thicker in that section and shows more limestone than in the well sections. The Tibú member crops out in the headwaters of the Río Tibú, from which it takes its name. It first attained importance when found to be productive of oil on the Tibú anticline".

Sobre ésta reposa una secuencia de shales negros, micáceos, algunos margosos, con intercalaciones de caliza, arenisca y limolita glauconítica. Esta unidad se encuentra expuesta en la carretera Orú-El Tarra y en la quebrada Las Indias, aguas arriba del caserío de Pacelli. El espesor de estos sedimentos no se puede calcular con las observaciones realizadas. Su composición y características coinciden con la Formación o Miembro Mercedes, y su presencia es prácticamente continua desde Pacelli hasta la población de Las Mercedes, en cuya vecindad se encuentra la localidad tipo.

Según **Notestein** et al. (op. cit.), el Mercedes puede describirse así:

"The Mercedes member is composed of interbedded limestones, shales, and sandstones with beds commonly ranging from 3 to 20 meters in thickness. The limestones are similar to those in the Tibú member but are in part arenaceous. The shales are generally black, micaceous, and carbonaceous, but some beds are dark gray, and some are very calcareous. Shales compose a large part of the lower third of the member. The sandstones, which are subordinate in amount, are gray, fine to medium grained, commonly glauconitic, and in part very calcareous. They are nearly twice as abundant in the upper half of the member as in the lower half. The top of the Mercedes member is drawn where limestones and shales become predominant over sandstone, but no sharp break exists below the overlying Aguardiente member. The thickness of the Mercedes member ranges from 149 to 201 meters in well sections and is about 160 meters in Quebrada Santa Elena. The member is named from the Mercedes Valley, along the west side of which it is exposed".

Sobre la Formación Mercedes reposa una espesa secuencia arenosa que corresponde a la Formación Aguardiente o Miembro Aguardiente de la Formación Uribante, que **Notestein** et al. (op. cit.) describe así:

"The Aguardiente member is composed almost entirely of extremely hard and calcareous gray or light-green fine- to coarse-grained cross-bedded glauconitic sandstones. As known from wells the upper 10 meters is relatively free from glauconite, but this mineral is common throughout the remainder of the member. Interbedded with the more glauconitic sandstones are gray, only slightly glauconitic sandstones with micaceous-carbonaceous partings. Some thin laminae and beds of black micaceous-carbonaceous shale are present, and a few thin beds of limestone occur in the lower part. Locally the sandstones are so calcareous as to approximate arenaceous limestones. The thickness of the Aguardiente member ranges from 148 to 160 meters in well sections and Quebrada Santa Elena. The member is named from the Filo del Aguardiente".

La Formación o Miembro Aguardiente se compone casi en su totalidad de arenisca glauconítica de color gris-verdoso o gris-azuloso, que meteoriza dando colores ocre, bermellón o café rojizo. Presenta algunos niveles ligeramente calcáreos, y su granulometría varía de tamaño medio a fino. El espesor en el Cañón del Catatumbo, en la zona de Filo Gringo (Oeste de Orú), puede calcularse en alrededor de 160 metros.

Se pudo observar ampliamente entre el sitio denominado La Laja y las vertientes de Caño Martillo al Oeste del Valle del Catatumbo, especialmente en Caño Picho (ver Fotografía 1) y algunos afluentes menores, formando extensos planos monoclinales que buzanan suavemente hacia el Oriente. También se localizó entre Orú y El Tarra, en ambos flancos de una estructura positiva de carácter regional que allí cabecea.

Las unidades del Cretáceo marino al Oriente de la Falla de Río de Oro, antes descritas, comprenden lo que se conoce en la Cuenca Cúcuta-Tibú, como Formación o Grupo Uribante. Al comparar con los sedimentos inferiores de la secuencia Cretácea al Oeste de la falla, expuestos a lo largo de Caño Martillo, y de ahí hacia el Norte, se observan grandes diferencias: en la base se halla un conglomerado arcósico de muy poco espesor, sobre el cual reposa una espesa secuencia calcárea. Comprende calizas grises a café muy claro, notablemente esparíticas en la parte inferior, calizas negras carbonáceas con intercalaciones de margas y calizas arenáceas, algunas glauconíticas, con láminas de limolita. En las margas se observan concreciones cubiertas de limonita, generalmente ovoides, con longitudes hasta de 10 cm. Además se observan costras limoníticas con diseños reticulares, que podrían ser restos de organismos fósiles. Entre las calizas hay niveles de arenisca de poco espesor; solamente se observó

un nivel mayor de 1 metro. Se presentan buenas exposiciones de toda esta secuencia calcárea en Caño Martillo (ver fotografía 2) y a lo largo de un camino que sigue el curso de Caño Castillo.

Aunque es difícil hacer un estimativo del espesor total de la secuencia calcárea mencionada, puede considerarse que puede estar entre 300 y 400 metros. Al compararla con la Formación Tibú de la secuencia oriental, se presenta un espesor total de sedimentos calcáreos del doble por lo menos. No se presentan shales en una columna comparable a los de la Formación Mercedes, y más notable aún es la ausencia, en Caño Martillo y de allí hacia el Norte, de la potente secuencia de areniscas del Aguardiente. En Caño Martillo, sobre la secuencia calcárea, se presentan escasos 4 a 5 metros de arenisca cuarzosa blanca; y en Caño Castillo no se presenta ningún nivel arenáceo digno de mención.

Es notable, al observar hacia el Occidente del Río Catatumbo, la morfología en forma de planchas enormes que presentan las calizas antes mencionadas, cortadas por los cañones de los Caños Martillo, Brandy y Castillo, al Noroeste de la Falla de Río de Oro. Al Sureste de dicha falla los relieves dominantes los producen las areniscas del Aguardiente, tal como se observa en la zona de la confluencia de los ríos Tarra y Catatumbo.

La espesa secuencia calcárea que se menciona, presenta afinidades con la Formación Cogollo del Cesar y con la sección tipo del Cogollo, en el río homónimo al Norte de Machiques en Venezuela.

Miller (1960) describe el Cogollo en el Cesar así:

“La simple división del grupo Cogollo en superior e inferior servirá mejor para los fines de una descripción comprensiva y breve del grupo. El término “Cogollo inferior” se refiere a las gruesas capas de caliza y a las calizas arenosas basales o areniscas calcáreas de la parte inferior de la formación Apón. Su edad oscila entre el Barremiense y el Aptiense. El término “Cogollo superior” incluye el resto de la sección del grupo Cogollo y tiene una edad que alcanza desde el Aptiense hasta parte o todo el Cenomaniense. Los conjuntos faunísticos, especialmente las amonitas, han suministrado la edad de las unidades.

La masa resistente, sólida, de la formación Cogollo inferior forma una fila estructural que constituye un detalle característico en las cercanías de la Sierra y dentro de ella. Esta fila forma un margen prominente a lo largo del lado oriental y en partes del lado occidental de la Sierra. El Cogollo inferior forma también filar y cuevas

en los drenajes de los ríos Guasare y Socuy en la parte septentrional de la Sierra y se presenta como una cubierta en la mayor parte de las tierras altas de Maraca. Se presenta también en las mesas altas en el interior de la Sierra. Son pequeños los cambios en litofacies y espesor de la formación Cogollo inferior dentro de la Sierra y partes adyacentes de la Cuenca de Maracaibo y el valle del Cesar.

El Cogollo superior, por otra parte, cambia substancialmente a través de la Sierra, tanto en espesor como en litología. Está formado predominantemente por calizas grises en la plataforma de Maracaibo; hacia el suroeste cambia dentro de la Sierra y a través de ella, con un aumento de caliza de tipo pelágico de color oscuro y de lutita negra. También aumenta rápidamente de espesor al occidente de la plataforma hacia el eje de una cuenca que se encuentra en la parte occidental de la Sierra al borde del valle del Cesar, llamada artesa de Perijá. Hay adelgazamiento, por lo tanto, desde esta artesa hacia el occidente a través del valle del Cesar”.

Sutton (1946) describe esta Formación en el Río Cogollo en el Perijá venezolano, así:

“The name Cogollo formation, was first introduced into the geologic literature of Venezuela by Garner ... and was soon generally adopted by most geologists to designate a predominantly limestone deposit lying beneath the bituminous shales and limestones of the La Luna, and above the basal sandstones of the Cretaceous. In its type exposure along the Río Cogollo and in the general zone along the east side of the Perijá Range, the Cogollo is now known to include rocks which range in age from probable Barremian through Aptian and Albian to Cenomanian. The name has been a convenient one for reconnaissance mapping and its long established use in Venezuelan geology demands its retention. In this paper it will be used as a group term.

The resistant limestones of the Cogollo group, which weather light gray in color, form prominent, easily recognized scarps along the mountain front and, in some of the streams cutting them, form high, vertical or overhanging walls. The shales, being less resistant, have generally weathered out or are so covered with soil or talus that a casual inspection of the section gives the erroneous impression that the entire group is practically solid limestone.”

Al continuar la secuencia estratigráfica, al Oriente de la Falla de Río de Oro, se presentan sedimentos muy pobremente expuestos, observados en Caño Picho, y entre

este caño y el paraje denominado La Laja, que comprenden shales y shales margosos muy laminares de color negro o gris oscuro, y con niveles de caliza de pocos centímetros de espesor. No se observaron otras exposiciones dignas de mención de estos sedimentos en el área, los que parecen corresponder a la Formación Capacho, ya que en el sector mencionado se hallaron por debajo de la Formación La Luna.

Para denominar en el presente informe estos shales y shales margosos, se ha escogido utilizar el término Formación Capacho, porque lo observado en el terreno coincide con la descripción de Sievers en Sutton (Op. cit.), de esta formación:

"Structural complications hinder an accurate description of the entire Capacho formation at the type locality. In the Río de Oro in northern Táchira, however, a complete section is exposed between the overlying La Luna and underlying Aguardiente formations. At this point the formation can be divided roughly into a lower and upper member. The lower member has a thickness of about 242 meters (794 feet) and is composed largely of massive, dark gray to black hard shale with a few beds, up to one meter thick, of dark gray, hard, crystalline, fossiliferous limestone and rare beds of dark greenish gray, hard, fine grained, calcareous sandstone. The calcareous sandstones are generally more pronounced in the basal part of the formation and some observers may wish to include them with the underlying Aguardiente formation. The upper member is about 120 meters (394 feet) thick and is composed of massive to thickly bedded, gray, hard, crystalline, fossiliferous limestone with a few thin beds of hard black shale."

No se utiliza el término Formación Cogollo, porque la localidad tipo original de Garner, como se mencionaba anteriormente, no corresponde a los shales aquí observados.

Sin tener en cuenta su diferencia litológica con la localidad tipo del Cogollo como la describió Garner (en Sutton, Op. cit.), Notestein et al (Op. cit.) denominaron Formación Cogollo la secuencia pelítica antes mencionada, así:

"On and adjacent to the Concession the Cogollo formation is composed principally of dark-gray to black fissile shales with interbedded gray to dark-gray fossiliferous limestones and a very minor amount of gray argillaceous siltstones. In the Petrolea area, where 32 wells have penetrated the entire thickness of the Cogollo, the formation is divided into the Lower Cogollo, Middle Cogollo, and Guayacán members, but such

detailed subdivision is not applicable throughout the Concession.

The Lower Cogollo consists of black very calcareous organic and bituminous foraminiferal thin-bedded shale and dark-gray foraminiferal limestone. Some macrofossils are present. The member comprises approximately one-fifth of the entire formation and is distinguishable in all sections. The upper contact of the member is transitional and is drawn at the top of the first limestone below the thick shales of the Middle Cogollo.

The Middle Cogollo member consists of dark-grey to black noncalcareous shale and a few beds of gray argillaceous fossiliferous limestone and, locally a few beds of siltstone and silty shale. The member is well developed in the Petrolea area, where it comprises approximately three-fifths of the formation, but the top of the member is not distinguishable elsewhere owing to the poor development of limestones in the Guayacán member. The top of the middle member is sharply drawn in Petrolea wells at the base of a 3- to 7-meter bed of limestone forming the base of the overlying Guayacán member.

The Guayacán member, named from Quebrada Guayacán in a branch of which it crops out on the Petrolea South Dome, consists of brownish-gray abundantly fossiliferous fairly thick, massive limestones with interbedded dark-gray to black non-calcareous in part silty and micaceous shales and a very small amount of gray argillaceous siltstone. In the Petrolea area nearly half the member is composed of limestone, but elsewhere the uppermost part of the Cogollo is predominantly shale."

Es interesante anotar que lo descrito originalmente por Garner coincide con los sedimentos que se observan en la secuencia al Occidente de la falla Río de Oro, y la sección por él definida se encuentra al Occidente de la prolongación Norte de dicha falla.

Sobre la formación antes referida, se encuentra una secuencia de calizas negras (ver fotografía 3), olorosas a petróleo, con abundantes escamas de peces, shales negros bituminosos con concreciones discoidales, chert negro, shale silíceo muy laminado y fosforita oolítica en un banco que pasa de 2 metros de espesor (ver fotografía 4). Este conjunto litológico se observó en un tramo del río Catatumbo, especialmente en la desembocadura y el curso del caño La Agricultura, y todo el sector de la desembocadura del caño Danta y del río Frío. El suave buzamiento que presenta la secuencia estratigráfica en

mención y el hecho que las quebradas y caños corren sobre los planos de estratificación, hace difícil tomar una idea del espesor total.

Allí se encuentra muy típicamente representada la Formación La Luna, tal como se presenta en la región de Sardinata y otras localidades del Catatumbo Colombiano, que **Notestein et al** (Op. cit.) describe así:

"On the Concession the La Luna consists of hard dark-gray abundantly foraminiferal limestones and hard black highly calcareous platy bituminous shales. Bands and nodules of black chert are present in very minor amount, more numerous in the upper part. Outcrop sections suggest more chert in the upper part of the La Luna than displayed by well sections. Concretionary masses of dense gray limestone, ranging from a few centimeters to 75 centimeters in size, are characteristic of the formation".

Al observar la secuencia estratigráfica Occidental, en ninguna sección se observó una sucesión litológica que se asemeje a la Formación Capacho.

Se presenta una caliza bituminosa en estratos delgados, alternando con shale negro con concreciones, y un chert gris en capas delgadas. La caliza presenta abundantes vetillas de calcita y es rica en fósiles, especialmente escamas de peces.

Estos sedimentos se observaron en el Río de Oro, aguas arriba de la desembocadura de Caño Tomás, en el curso inferior de éste, y a lo largo del camino que conduce del río Catatumbo, paralelamente a Caño Martillo, hacia las cabeceras de dicho caño. Allí se observan esas unidades muy tectonizadas por la Falla de Río de Oro.

Comparando lo antes referido con los sedimentos coetáneos al Este de la Falla de Río de Oro, cabe destacar la casi desaparición de los shales de la Formación Capacho al Occidente, y algunas diferencias en la litología de la Formación La Luna. En ésta los cherts se presentan grises, y aparentemente con menos bitumen, desaparecen los fosfatos, y algunos niveles de caliza presentan aspecto lumaquético (ver fotografía 5); además, La Luna al Oeste de la falla tiene un espesor de más del doble que al Este. A continuación de lo anteriormente descrito, en el bloque oriental aparece una secuencia de sedimentos predominantemente pelíticos, pobremente expuesta (ver fotografía 6).

Según **Notestein et al.** (op. cit.), estas tres Formaciones del Cretáceo Superior pueden definirse así, comenzando con la Formación Colón:

"The formation is composed of gray to dark-grey slightly calcareous fissile moderately foraminiferal shale. Thin nodules and lenses of brown clay-ironstone are locally developed. At the base, immediately above the La Luna, there is a 2- to 5-meter zone of sandy glauconite, reworked Foraminifera, abundant fish remains, and round rods and pellets which may be coprolites. Immediately above this thin glauconitic zone an interval of highly pyritic shale is commonly 3 to 5 meters thick. Purely on a basis of Foraminifera an upper and a lower division of the Colón are recognized. The formation contains a very few thin beds of limestone on the Río de Oro anticline, and limestone beds are known in the formation in western Venezuela. However, the Colón is normally free from limestone within the Concession".

La Formación Mito Juan:

"The formation consists dominantly of greenish-gray shales, silty shales, and some sandy shales; silt and sand increase upward, and some thin beds of siltstone and very fine-grained sandstone have been found near the top. Thin lenses and smaller nodular masses of brown clay-ironstone are common. In the lowermost part there are some gray and dark-gray shales like the Colón shales, but commonly they are noncalcareous whereas the Colón is typically very slightly calcareous. In the upper part of the shale sequence there are some more or less well-developed thin beds of glauconitic sandy fossiliferous ferruginous limestone. Small Foraminifera are not uncommon but are much rarer than in the Colón shale, and arenaceous forms predominate. Although the Mito Juan shales differ somewhat in lithology from the Colón, particularly in the predominance of greenish tinges and light grays, it is scarcely practicable to map them in the field on this basis.

Thin limestone beds are fairly numerous in the upper 200 meters of the Mito Juan on the Río de Oro anticline; they are best known from two wells which drilled the entire formation on this structure".

Y la Formación Catatumbo:

"The Catatumbo formation is named from the Río Catatumbo, along which the formation crops out for some distance between Barranca Bermeja and Puerto Salado. However, the exposures along the river are not satisfactory as a type section, and the section logged in Oro No. 3, located 10 kilometers northeast of the type locality, is used instead. A considerable part of the Catatumbo was cored in this well, and the formation was also cored and drilled twice in Oro No. 2, a major reverse fault causing repetition of the entire Catatumbo formation.

The formation is predominantly composed of dark-gray shales and claystones, commonly somewhat carbonaceous and containing small nodules and thin lenses of brown clay-ironstone. In the Río de Oro area there is a considerable amount of interbedded and interlaminated gray and dark-gray argillaceous very fine- to fine-grained sandstone, the beds ranging from 0.5 to 10 meters in thickness. Micaceous-carbonaceous laminae are common. Further south, sandstones are much less common, and some well sections contain practically none. The percentage of claystones, characteristically containing more or less abundant siderite spherules normally less than 1 millimeter in diameter, decreases from northwest to southeast, and the claystones are replaced by silty and sandy dark-gray shales. The formation commonly contains a few thin beds of coal, particularly in its lower part. Sandy sediments of the lower-most portion contain glauconite and rarely a few thin beds of nonglauconitic limestone. The associated shales are sparsely fossiliferous, containing arenaceous Foraminifera, ostracods, and some large fossils”.

En la secuencia Occidental, observada aguas arriba del caño San Miguel, y en algunas exposiciones en la margen oriental del caño Tomás, se presentan shales de color gris-azuloso.

En el Caño San Miguel los shales presentan intercalaciones de limolita gris-parduzca, de 20-80 cm. de espesor. También se presentan lentes de limolita cubiertos de óxido férrico. Sobre el shale se observa una lumaquela con ostreas, de 80 cm de espesor. Calizas similares se observan en la ribera del río Catatumbo, aguas arriba de la desembocadura del caño San Miguel (ver fotografía 7).

En caño Tomás se presentan arcillas gris-oscurs, alternando con lentes de areniscas amarillentas de 2-10 cm de espesor; las arcillas presentan nódulos ferruginosos y se observó un molde de bivalvo; al ascender en la columna, las arcillas se tornan fosilíferas y presentan materia carbonosa en suturas.

No se observaron lumaquelas en el sector de caño Tomás. Hacia el tope de la secuencia pelítica se presentan varios mantos de carbón con espesores superiores a 1 metro. Los sedimentos descritos presentan algunas analogías con la Formación Molino de la Cuenca Cesar-Ranchería, pero tal vez más con la parte inferior de lo que Miller (1960) denomina Grupo La Jagua:

“En el sector que rodea a La Jagua en el valle del Cesar se encuentran rocas del Cretáceo superior, del Paleoceno

y posiblemente del Eoceno, que han sido reunidas en una unidad llamada grupo La Jagua. La parte inferior de esta sucesión está constituida por las calizas con Ostrea del tipo Guasare, que se encuentran en contacto normal con las lutitas de Colón-Mito Juan en la quebrada San Antonio a 10 kilómetros al oeste de La Jagua. Existen mejores afloramientos de sedimentos del tipo Guasare aguas arriba en la quebrada Salsipuedes, alrededor de 2 kilómetros al sur de la población de La Jagua, y cerca del cruce de la carretera con el río Tucucito al norte de La Jagua. Sobre las calizas en el río Tucucito se encuentran lutitas y limos grises glauconíticos, localmente carbonosos y con foraminíferos. Estos sedimentos, con un total de aproximadamente 600 metros de espesor, han sido todos incluidos en la formación Guasare debido a la afinidad de su facies sedimentaria con el Guasare de la Cuenca de Maracaibo. Se admite que los foraminíferos que contiene esta sucesión indican edad cretácica extrema superior, algo más antigua que el material típico de Guasare”.

En resumen, la parte superior del Cretáceo en ambas secuencias comprende sedimentos arcillosos en su mayoría, cuyas exposiciones son pobres, y donde no se observan niveles guías claramente diferenciables. Posiblemente el estudio bioestratigráfico permita hacer claridad sobre las edades de los sedimentos expuestos y sus respectivas relaciones ambientales.

Terciario

El contraste entre las secuencias litológicas del Terciario Inferior al Oriente y Occidente de la Falla de Río de Oro es muy pronunciado. Las diferencias son demasiado marcadas en distancias mínimas para poder considerar un simple cambio de facies.

En primer lugar puede hacerse referencia a la secuencia oriental. La unidad geológica, cronológicamente más antigua, es la Formación Barco, que **Notestein** et al. (op. cit.) describe así:

“The formation consists of a series of interbedded sandstones, shales, and claystones. It is topographically important, forming prominent strike ridges. The sandstones occur in beds ranging in thickness from 0.3 to 20 meters, are in large part gray argillaceous very fine- to medium-grained well-sorted, cross-bedded and cross-laminated, and locally contain abundant micaceous-carbonaceous partings and numerous shale laminae. Some siltstones and rarely coarse-grained sandstones have been noted. A distinct type of sandstone, which is everywhere found in the Barco formation and forms a fair proportion of the sandstone content, is the so-called “sparkling sandstone.” Sandstones of this type

are more common in the middle and lower parts of the formation and are relatively clean fine- to medium-grained sandstones in which secondary growth of the sand grains has formed myriads of crystal faces. These faces sparkle in the sun, hence the name.

Interbedded with the sandstones are shales and claystones, commonly gray or dark-gray, in part silty, micaceous, and carbonaceous, and locally rich in minute siderite spherules. Brown clay-ironstone in the form of thin lenticular masses and small nodules is common. Some coal, in one or more thin beds, is generally present in the upper part of the formation. The shales and claystones normally form about one-third to half the total thickness of the formation. Locally they may form about three-fourths of the thickness, and in three wells which drilled the Barco on the Tibú anticline shales and claystones form four-fifths to eight-ninths of the formation. However, these extreme cases are not at all typical."

Las areniscas de la Formación Barco (ver fotografía 8) son duras, de color gris claro, grano fino a medio, en paquetes bien definidos. Son muy cuarzosas, un poco micáceas y presentan un cemento fanático que les da un brillo chispeante. Contienen intercalaciones de un shale micáceo color gris. Existen buenas exposiciones al Este de la población de Las Mercedes y en la estructura de Petrólea.

Sobre la secuencia de areniscas mencionada, se encuentran shales grises azulosos, con aspecto escamoso y con planos de clivaje cubiertos de limonita. Presenta algunas intercalaciones de areniscas de grano fino en estratos delgados y mantos de carbón.

Estos sedimentos se observaron en proximidades del caserío de Río de Oro, en la Serranía de Tibú al Este de la desembocadura del Caño Ceibita en el Catatumbo, en plena divisoria de aguas entre este río y el Vetás, al Oriente de la Quebrada Pedregosa, en la carretera entre Tibú y Orú, al Este del caserío de Pacelli y al sureste de Las Mercedes (ver fotografía 9), donde se encuentran intercalados mantos de carbón de aproximadamente un metro de espesor.

Los sedimentos descritos constituyen la Formación Los Cuervos, siendo indiscutible su similitud con la localidad tipo, de acuerdo a Notestein et al (op. cit.):

"The formation is composed mainly of claystones and shales, with coal beds in its lower part and some sandstone beds throughout. The lower 75 meters consists of dark-gray carbonaceous shales and claystones interbedded with micaceous-carbonaceous siltstones, fine-grained sandstones, and coals. Rarely thin

limestones showing cone-in-cone structure have been noted. The coal beds are commonly 8 to 10 in number and range in thickness from 0.1 to 2.5 meters. The usual thickness is 0.5 to 1 meter. The coals are lignitic to bituminous; the fixed carbon ratio in 22 samples ranges from 49.0 to 58.4 and averages 54.5. They constitute the major coal resource of the region.

Above the coal series the Los Cuervos is made up of gray and greenish-gray in part silty and commonly sideritic claystones, the siderite occurring as spherules generally less than 1 millimeter in diameter. There are some greenish-gray argillaceous sandstones, commonly in beds less than 6 meters thick. In the lower part of the claystone sequence there is considerable shale, generally dark gray and carbonaceous, and the claystones are only slightly mottled. However, the overlying claystones, which compose the bulk of the division, are characterized by locally abundant red, yellow and purple mottling. The thin but hard sandstones of the Los Cuervos at many places form strike ridges".

Cronológicamente a continuación, se sitúa una secuencia arenosa, que buza hacia el Oriente y en gran parte forma la divisoria de aguas de los ríos Vetás y Socuavo con el Catatumbo, conocida como Serranía de Tibú. También hay buenas exposiciones en la carretera Tibú-Orú, entre las fallas de Mirolindo y Catatumbo y en las grandes mesetas que se encuentran al Este de Las Mercedes. Comprende areniscas rosadas hacia la base, blancas en la parte media y superior, grano medio a grueso, textura sacaroide; a veces presentan pirita, que al oxidarse produce tonos amarillentos y rojizos en planos de estratificación y de clivaje (ver fotografía 10). Algunos niveles presentan guijarros redondeados de 1-2 cm de diámetro esparcidos dentro de la arenisca.

Los sedimentos de esta formación son friables por lo cual es raro encontrar cantos rodados de ellos en las quebradas; las areniscas tienden a disgregarse con el transporte. Las características enunciadas coinciden precisamente con las descripciones de la Formación Mirador en numerosas localidades y lo observado en sitios tales como Cerro Tasajero.

En varios lugares, los manantiales en las areniscas del Mirador presentan abundante nata de óxido férrico, formando manchas ferruginosas en la roca y suelo adyacente.

Notestein et al (op. cit.) describe así la Formación Mirador:

"The Mirador formation is predominantly composed of sandstones. These are pale buff to white, characteristically

clean, massive, moderately hard to friable, fine- to coarse-grained, and in part conglomeratic. It contains some thin beds of gray and brownish-gray micaceous shale. An interval of shale and sandy shale with a little sandstone commonly occurs 40 to 75 meters below the top of the formation and ranges from 10 to 70 meters in thickness. The sandstones in the lower part of the formation tend to be more thinly bedded and less clean than the bulk of the formation. The Mirador is topographically prominent, forming escarpments, ridges, cliffs, and prominent dip slopes”.

Por último, es interesante anotar la presencia de huecos tubulares, en las areniscas del Mirador, próximas al nivel del agua del Catatumbo en vecindades de La Gabarra; estas cavidades se presentan recubiertas de goethita.

A continuación cabe hacer muy breve referencia a la Formación Carbonera. Se encuentra ampliamente expuesta al Occidente de Tibú, hasta la Falla de Mirolindo, a lo largo de la carretera que une la mencionada población con Orú. En la parte Norte del Piedemonte Oriental de la Serranía de Tibú, esta formación se encuentra cubierta por los extensos depósitos de arena eólica que se encuentran en esa zona.

Se compone de areniscas micáceas de grano fino, color gris “sal y pimienta” y areniscas glauconíticas (ver fotografía 11) alternando con arcillolitas grises con conchas de bivalvos. Hay delgados niveles de calizas fosilíferas, compuestas casi exclusivamente de conchas de bivalvos. En la base y cerca del tope, hay mantos de carbones ligníticos. Al tope presenta limolitas finamente estratificadas con lechos negros carbonáceos (ver fotografía 12).

Notestein et al. (op. cit.) describe la Formación Carbonera así:

“In the Río de Oro area distinction between the Mirador and the overlying Carbonera formation is very difficult, and the top of the Mirador could not be drawn with certainty. That area is characterized by more sandstones in the section above definite Mirador and also a thickening of the combined Mirador-Carbonera formations.

The formation consists of a thick series of claystones and various amounts of associated sandstones; some lignitic coals occur in its upper and lower parts. The claystones, normally the major constituent, are mostly gray with some greenish-gray and brown intervals. Red and yellow mottling is common, and siderite, both in small spherules and irregular masses a few centimeters

in size, is fairly abundant. There are some dark-gray micaceous in part silty shales, particularly in the top and bottom 50 to 100 meters.

The sandstones are generally in beds 5 to 10 meters thick but range up to 30 meters in thickness, and beds less than a meter thick are not uncommon. They are gray and greenish-gray, and most range from fine- to coarse-grained, but there is also a considerable amount of very fine-grained micaceous sandstone. Well sections show about 25 meters of sandstone 125 to 185 meters below the top of the formation, and sandstones are particularly well developed in the lower 125 to 250 meters of the formation. However, the bottom 10 to 75 meters consists mainly of shales. The sandstones are characteristically more argillaceous than those of the Mirador.

Some thin beds of lignitic and cannel coals and carbonaceous shales occur in the top and bottom 100 meters of the formation; analyses of 10 coal samples show fixed carbon ratios ranging from 30.2 to 46.6 and averaging 39.7. Scarce thin limestones have also been found in the same intervals. Approximately 100 meters below the top of the formation on the Tibú anticline, remains of a few small mollusks were found in a highly carbonaceous shale about 5 meters above a 2-meter interval of glauconitic very argillaceous siltstone. Cuttings from Socuavó No. 2 showed some glauconitic sandstone about 60 meters above the base of the formation. On the Tibú and Socuavó anticlines the extreme top of the formation is glauconitic. The glauconite indicates stages of marine to brackish-water invasion”.

Llegando a este nivel, es importante adelantar la descripción de la secuencia Occidental del Terciario Inferior, con el fin de comparar litologías.

Tomando la base de la Secuencia Occidental en el valle de caño Tomás y partiendo de lo descrito en referencia al Cretáceo, la sucesión se inicia con shales grises oscuros (ver fotografía 13) con restos vegetales y suturas carbonosas.

Estos shales, con delgadas intercalaciones de areniscas y limolitas amarillentas de 10-20 cm de espesor, tienen un espesor total mayor de 200 metros. Hacia el tope de la secuencia, en la divisoria de aguas entre caño Tomás y caño Eusebio, afloran mantos de carbón con espesores mayores de 1 metro (ver fotografía 14), y la secuencia se torna gradualmente arenosa: al principio se presenta arenisca gris con restos de asfalto, y al continuar ascendiendo estratigráficamente se presentan areniscas glauconíticas de color gris oscuro que meteorizan toman-

do color café rojizo; son areniscas muy arcillosas, que se erosionan con facilidad.

Al continuar la secuencia, en las vertientes de caño Eusebio, a lo largo de Caño Laja, y en el Río de Oro se observan areniscas color café amarillento, con estratificación cruzada muy notoria. Estos sedimentos son muy blandos, por lo cual los caños y quebradas labran lechos muy accidentados llenos de canales y marmitas de gigante (pot holes). Se presentan intercalaciones de unas arcillolitas masivas color gris-celeste y fractura concoide, en espesores de 2 o más metros. La secuencia continúa con predominancia arenosa hasta caño Eusebio, y de ahí hacia el Norte (subiendo estratigráficamente) se presentan limolitas grises y sobre éstas areniscas masivas, con pequeños lentes de arcillolita celeste, formando un escarpe con más de 30 metros de altura.

Sobre lo anterior reposan limolitas **bandedas** de materia carbonosa y con bitumen en forma de suturas, mantos de lignito de pocos centímetros, y arcillolitas gris-claro-azuloso, que forman una pequeña repisa topográfica y presentan rumbos y buzamientos diferentes a las areniscas infrayacentes: parece haber una ligera discordancia, que también se observó en el caño San Miguel. Estas areniscas amarillentas continúan encontrándose en niveles estratigráficamente superiores, a lo largo de las quebradas que corren hacia el Río de Oro, tal como se observa en la quebrada Las Perdices, donde presentan estratificación cruzada y ondulatoria (ver fotografía 15), y presentan el mismo color amarillo-rojizo y escasa litificación al ascender más en la columna estratigráfica hasta llegar al Río de Oro. Generalmente el grano se presenta de tamaño medio, y el componente principal es cuarzo; en menor proporción se encuentra chert, que tiende a darle un aspecto "sal y pimienta" a la roca.

A continuación se presentan areniscas arcillosas amarillo-rojizas, con estratificación cruzada, convoluta y ondulatoria, grano medio, muy friables, con intercalaciones de limolita y mantos muy delgados de lignitos. La sucesión de areniscas continúa en territorio venezolano, formando escarpes muy notables en la margen norte del Río de Oro.

Al sintetizar lo descrito, se puede sintetizar como una espesa secuencia predominantemente arcillosa en la base, una zona de transición con numerosos mantos de carbón y al tope una secuencia predominantemente arenosa (con un espesor que pasa ampliamente de 400 metros), en la que se alcanza a insinuar una ligera discordancia. Esto presenta notable similitud con la secuencia litológica descrita por Miller (Op. Cit.) en La Jagua (Cesar), antes citado.

Allí Miller describe la parte superior de lo que denomina Formación La Jagua como una espesa secuencia de lutitas, con algunos calcáreos hacia la base y mantos de carbón en la parte superior, a la que sobreyace la Formación Santa Cruz compuesta de areniscas pardo-anaranjadas con intercalaciones de lutitas y lechos de lignito:

"Situadas estratigráficamente encima de Guasare, pero no consideradas como en sucesión continua, se encuentra una sección predominantemente de areniscas que aflora en las colinas y riscos al este de La Jagua. Se las denomina formación Santa Cruz, refiriéndose a la quebrada Santa Cruz que recoge las aguas de estas colinas. La mayoría de los geólogos las consideran como del Eoceno, pero no están de acuerdo al tratar de precisar su edad. Se las incluye, tentativamente, en el Paleoceno o el Eoceno inferior y podrían ser equivalentes a las formaciones Marcelina y Los Cuervos de la Cuenca de Maracaibo.

La formación Santa Cruz consiste en areniscas pardo-anaranjadas a amarillentas o grises y lechos menores intercalados de lutitas, lutitas ligníticas y lignito. El espesor total de la sección es de unos 550 ó 600 metros. En los 400 metros inferiores la granulometría de las areniscas varía de mediana a fina y muchos de los lechos de arenisca son de carácter macizo, teniendo varios metros de espesor. Se encuentran localmente lechos delgados y estratificación cruzada. Esta parte de la sección forma los riscos que dan al oeste en la quebrada Sororia. En las areniscas de los riscos y cerca del tope se encuentran moldes de gasterópodos. En un sinclinal situado estratigráficamente por encima de los riscos se encuentran los 150 a 200 metros superiores de la sección, constituidos por lutitas, limolitas y areniscas de grano fino y en capas delgadas. Estructuras del tipo "cono-entre-cono" se encuentran presentes en las lutitas de esta sección.

La relación genética entre el Guasare del valle del Cesar y el Guasare del valle de Ranchería y de la parte noroccidental de la Cuenca de Maracaibo es clara. Es razonable creer que la sucesión Santa Cruz, suprayacente, puede estar relacionada a las fases finales de sedimentación del Cretáceo-Paleoceno y así la parte superior de las formaciones Marcelina, Los Cuervos y Santa Cruz marca el tope del "Ciclo de sedimentación cretácica-paleocénica". En la Cuenca de Maracaibo este nivel estratigráfico marca la base de posteriores sedimentos transgresivos del Eoceno. A través del arco El Totumo-Inciarte se presenta una pronunciada superficie de discordancia y truncamiento de las rocas de Marcelina, Guasare, Cretáceo y del pre-Cretáceo. Este truncamien-

to, que se encuentra por debajo de la formación La Sierra de edad Eoceno medio a superior y por encima del Paleoceno, es visible en afloramientos y en subsuelo hacia el sur hasta el río Yasa, a lo menos”.

Al establecer una comparación general de las dos secuencias del Terciario Inferior, en forma resumida se presenta una secuencia oriental compuesta sucesivamente de arenas, pelitas con carbón, arenas y una secuencia arenosopelítica con carbón, que corresponden respectivamente a las formaciones Barco, Los Cuervos, Mirador y Carbonera. La secuencia Occidental, por contraste, presenta pelitas con carbón (Ver fotografía 14), arenas, una suave discordancia y arenas muy similares a las anteriores. Si se considera que las dos secuencias se presentan en distancias que en algunos sitios no pasan de 5 kilómetros, es necesario pensar que no se trata de un simple cambio de facies y hay razones suficientes para creer en dos ambientes de sedimentación diferentes, allí puestos en contacto por tectónica de tipo transcurrente.

La sedimentación Terciaria posterior a las dos secuencias estratigráficas mencionadas, se presenta muy pobremente expuesta en el área de este estudio: sobre la secuencia oriental se observan algunos niveles de arcillas y limolitas rojizas al norte del batallón de La Gabarra, completamente horizontales, en una extensión reducida, y en remanentes de muy poca extensión en sitios como El 40. La relación entre los sedimentos del Terciario Inferior y los sedimentos continentales denominados Formaciones León y Guayabo, se observa mucho mejor en inmediaciones del río Socuavo (ver fotografía 16), donde se aprecia claramente una discordancia angular entre la Formación Carbonera y los sedimentos conocidos como Formación León, que **Notestein** et al. (op. cit.) describe así:

“The León is composed almost entirely of gray and greenish-gray tough shales. There are rare thin beds of gray and buff sandstone with carbonaceous laminae, and the shales tend to become silty toward both the base and the top. In the Tibú-Socuavó area a thin series of buff sandstones and interbedded shales occurs near the middle of the formation. This series of sandstones is only locally developed and attains a maximum thickness of 28 meters. It has been called the Machete sandstone member”.

Tanto esta última formación como la Formación Guayabo, son unidades muy pobremente definidas y parecen ser muy variables en su litología, debido a su origen fluvial. **Notestein** et al. (op. cit.) describe la Formación Guayabo así:

“Very little study of the Guayabo sediments has been made on the Concession, and subdivision of them has not been attempted. They consist in general of buff and light-gray friable sandstones, siltstones, and sandy shales; there are some light-gray, light-green, and mottled claystones. Lignitic coals are present in the lower Guayabo in Venezuela but have not been found in outcrops on the Concession. A thin lignitic coal and carbonaceous shale was found, however, in some core holes drilled near the Río Socuavó del Norte, and the coal is in either the lower part of the Guayabo or top part of the León shale. The most complete section measured on the Concession is that in Quebrada León. From the base up it shows (1) 186 meters of buff and gray sandy shales and friable sandstones, (2) 181 meters of light-gray, light-green, and Fausto-type mottled claystones and sandy claystone, with some gray and buff sandstone, and (3) 436 meters of buff and gray friable sandstones and locally mottled claystones”.

Tanto la Formación León como la Formación Guayabo son fácilmente distinguibles del Terciario Inferior por ser sedimentos oxidados de colores rojizos o verdes, y por presentar arcillas caoliníticas.

Al Occidente de la Falla de Río de Oro no hay exposiciones de los sedimentos del Terciario Tardío.

Cuaternario

Al Oriente de la Serranía de Tibú, reposando sobre las unidades descritas anteriormente, se encuentran arenas eólicas en extensiones muy grandes, las cuales difieren de lo que **Notestein** et al. (op. cit.) denominaron Formación Necesidad, y que describen así:

“The Necesidad formation is named from Playa Necesidad located on the Río de Oro a short distance above its confluence with the Río Catatumbo. So far as known, the name was first applied by H. F. Nash in 1919. No type section has been or can be measured as the formation is poorly exposed and its top is not known.

At Playa Necesidad the formation consists of bright-colored red and blue clays, interbedded with coarse-grained sandstones which grade into conglomerates with pebbles up to 2 centimeters in diameter. Southeast of the Río Catatumbo the Necesidad formation as mapped consists of a thick series of fine- to coarse-grained massive cross-bedded friable buff to yellow sandstones and interbedded claystones. These beds may not be the equivalent of those at Playa Necesidad. They may even belong to the upper Guayabo”.

Las mencionadas arenas eólicas forman masas sin estratificación (ver fotografía 17); escasamente se insinúa estratificación cruzada a recta a gran escala, excepto localmente, donde ocasionalmente se observa estratificación cruzada y gradada a pequeña escala. Presentan ventifactos angulares con superficies muy pulidas (ver fotografía 18). Al tope de las arenas se presenta un paleosuelo delgado y algunas gravas fluviales.

Amplias zonas cubiertas de arenas eólicas han sido levantadas, produciéndose cárcavas de erosión muy profundas y dando lugar a una superficie topográficamente muy accidentada. Estos sedimentos eólicos alcanzan a formar serranías con más de 100 metros de altura entre el río Vetas y el río Catatumbo al Oriente de la carretera Tibú-La Gabarra.

Por último cabe mencionar las terrazas y aluviones de los ríos Catatumbo, de Oro y algunos afluentes. A lo largo del río Catatumbo se observan terrazas, cubriendo sedimentos del Cretáceo Superior en amplias zonas. En algunas de estas terrazas, es notable el levantamiento que han sufrido: al Sur del caño Martillo se observaron restos de terrazas a más de 100 metros sobre el nivel del mar, lo que significa más de 50 metros sobre la llanura de inundación del río Catatumbo.

La distribución de las terrazas del Catatumbo se prolonga al Norte a lo largo de caño Tomás, lo que parece indicar que el drenaje original del Catatumbo discurría en esa dirección. Sobre las arenas eólicas al Oriente de la Serranía de Tibú, también se encuentran restos de gravas fluviales levantadas. Es interesante además mencionar lechos de cenizas volcánicas de decenas de centímetros de espesor, que se observan en los suelos de sectores tales como en el caño La Guadua.

Tectónica

Los eventos tectónicos identificables en el presente estudio, tuvieron lugar posteriormente a la regresión del Mar Cretáceo. A partir del fin del Mesozoico, se pueden identificar tres episodios de tectonismo, los cuales se refieren a continuación:

- Intensa actividad tectónica cizallante la cual produjo fallas NS y NE-SW, las cuales son aun determinantes en las direcciones del relieve y los drenajes.
- El levantamiento andino, en el cual, por un levantamiento en forma de bloques originó las cordilleras de Perijá y Mérida.
- Un nuevo episodio de tectónica cizallante que originó la Falla del Bramón y otras con dirección NW-SE,

las cuales causaron la dislocación de la Cordillera de Mérida respecto a la Cordillera Oriental de Colombia. Esto afectó la parte sur de la Cuenca del Catatumbo.

La tectónica direccional N-S y NE-SW

Este evento produjo los fallamientos mas determinantes en el marco geológico actual de la cuenca del Catatumbo y es claro que ambos sistemas están genéticamente relacionados.

Entre las fallas mas importantes del sistema NE-SW cabe mencionar las fallas de Río de Oro y de Mirolindo. La falla NS mas importante es la Falla del Catatumbo (por algunos autores denominada la Flexión del Catatumbo). Es importante enfatizar que los dos sistemas parecen ser interactivos hasta el punto que la falla de Río de Oro se presenta seccionada y desplazada por la Falla del Catatumbo y ésta a su vez se observa desplazada por la Falla de Mirolindo (ver figuras 2 y 4).

La Falla de Río de Oro es especialmente interesante debido a que pone en contacto secuencias litológicas del Cretáceo y el Terciario, notablemente diferentes, tal como se expuso en lo referente a estratigrafía; parece presentar continuidad al Sureste hasta el valle de La Playa en la región de Ocaña. Su expresión morfológica es muy marcada a lo largo de la Serranía de San Lucas, donde parece formar una estructura en flor.

La Falla de Catatumbo (ver fotografía 19) es la que presenta una mayor expresión morfológica en la zona, dando lugar a un valle que se extiende sin interrupción desde la población de Las Mercedes al sur, hasta la desembocadura del caño Tomás en el Río de Oro. No es muy claro el contraste estratigráfico en sus dos flancos, ya que al Oeste de este fallamiento no hay exposiciones de sedimentos Terciarios y las del Cretáceo son muy fragmentadas y erosionadas. En buena parte del trazo, al Oeste, está expuesto el basamento.

La Falla de Mirolindo (ver fotografía 20) se cruza por la carretera Tibú-Orú, en el sitio así denominado. En esa zona pone en contacto la Formación Carbonera al SE con las areniscas de la Formación Mirador al NW. Entre los caseríos de Orú y Pacelli parece desplazar el trazo de la Falla del Catatumbo.

Además de las descritas, hay otras fallas menores con rumbos NE-SW como la del Caracol al SE de la población de La Gabarra, la que encauza al Río Nuevo o Presidente, al NE de la población de Las Mercedes, o la que encauza al caño Eusebio al Oeste de Puerto Barco, paralela a la de Río de Oro.

Hay otras fallas NS paralelas a la del Catatumbo al Oriente de ésta, su trazo no es tan evidente en superficie, tales como la que cruza al Este de Tibú y la que sirve de límite Occidental al Campo de Petrólea y coactivas con las fallas direccionales NE-SW. Tal vez uno de los mejores ejemplos de esto se puede observar al NE de Cúcuta (fuera del área en mención), en el Cerro Tasajero limitado al Oriente y Sureste por sendas fallas con esos rumbos.

Las fallas N-S y NE-SW son determinantes en la forma de plegamiento que se observa en la Cuenca del Catatumbo. Se trata de estructuras originadas en los fallamientos transcurrentes, por lo cual no se presentan anticlinales ni sinclinales, en las formas clásicas, sino estructuras positivas en forma de abanico limitadas por dos fallas formando un ángulo obtuso y estructuras negativas que asemejan un cabeceo de sinclinal limitadas por dos fallas formando entre sí un ángulo agudo.

Los mejores ejemplos del tipo de estructuras positivas antes referido se observan entre la Falla del Catatumbo y la Falla de Mirolindo al W de la población de Tibú, donde se encuentra en superficie un pliegue con esa forma y un área mayor de 15 Km² y entre la Falla de Río de Oro y la Falla de El Caracol donde se insinúa morfológicamente una estructura similar, la cual se define claramente en las líneas sísmicas de esa zona.

Entre las estructuras negativas, el llamado "sinclinal" de Río de Oro entre las fallas de El Catatumbo y Río de Oro constituye un magnífico ejemplo. Hay otra estructura de forma similar al nordeste de Tibú entre las fallas de El Catatumbo y Mirolindo.

El Levantamiento Andino

Es un evento posterior a los fallamientos direccionales mencionados, y parece ser una emergencia en forma de bloques. Parece que en parte ha tenido lugar una reactivación de las fallas direccionales con movimiento vertical, entre ellas la del Catatumbo, pero también se encuentran fallas normales nuevas, las cuales producen bloques basculados muy característicos en sectores al Oeste de caño Tomás, en las zonas del río San Miguel y alto Sardinata.

En parte se presentan mesetas seccionadas por profundos cañones, de esto hay una extensión al Oriente y Sureste de la población de Las Mercedes, entre ésta y el caserío de San Martín de Loba.

Fallas direccionales SE-NW

Por último cabe mencionar un evento que originó fallas direccionales con rumbo SE-NW, de movimiento

sinistral. Estos fallamientos son muy notables al sur de la cuenca del Catatumbo, especialmente en Cúcuta en cuyas vecindades cruza la Falla del Bramón y otras mas al sur, en la región de Pamplona. Dentro del área objeto del presente artículo, hay una gran falla con esa dirección, la Falla de Las Mercedes, la cual al Sur de la población de ese nombre pone en contacto sedimentos del Terciario Inferior al NE con esquistos al SW.

Historia y evolución geológica

La historia geológica de la cuenca del Catatumbo se inicia en el Proterozoico, como lo indica la presencia de rocas típicas de la corteza siálica en el substrato.

De acuerdo a lo expresado en lo referente a estratigrafía y tectónica, hay dos áreas con una evolución geológica contrastante. Es difícil localizar las diferencias evolutivas de las dos regiones durante el Paleozoico, ya que es muy fragmentario el conocimiento de las unidades litológicas de esa Era en esta parte de la Cordillera Oriental, y en la zona estudiada no se presentan exposiciones de rocas de la Era Primaria. Aún el Mesozoico Inferior es poco conocido, aunque se presenta expuesto en amplias zonas.

Sin embargo se puede afirmar que durante el Mesozoico Inferior hubo una intensa actividad tectónica de tipo distensivo, con intensa actividad magmática en el área al Oeste de la Falla de Río de Oro. Episodios de "rifting" causaron la depositación de espesas masas de sedimentos detríticos oxidados y el vulcanismo fue intenso, como lo atestiguan los extensos diatremas y los depósitos de rocas piroclásticas.

En la región al Oriente de la Falla de Río de Oro, parecen haberse presentado condiciones de erosión e inactividad magmática; aparentemente este territorio no fue afectado directamente por la apertura de canales de "rifting" y sus efectos. En cierto modo, puede afirmarse que la región al Oriente de la Falla de Río de Oro presenta afinidad litológica al Macizo de Santander, y la que se halla al Occidente se asemeja litológicamente a la Sierra de Perijá.

El "rifting" del Mesozoico Inferior, tuvo su culminación con la probable formación de lagos salinos intermitentemente comunicados con el océano, que produjeron depósitos evaporíticos durante el Cretáceo Inferior. Este fenómeno, que tuvo lugar en gran parte de lo que hoy es la Cordillera Oriental, parece no haber alcanzado las dos áreas que pone en contacto la Falla de Río de Oro.

Durante el Aptiano tuvo lugar una transgresión que llevó el mar a ocupar lo que hoy comprende la Cuenca de

Maracaibo, los Valles de los ríos Cesar y Ranchería, y grandes extensiones del Valle del Magdalena. La forma real de toda la cuenca ocupada por esa transgresión, no se puede visualizar hoy día, dado que los fallamientos transcurrentes la han desfigurado.

Con la transgresión se estableció un mar muy somero, de aguas claras, formándose espesos depósitos calcáreos, buena parte de los cuales corresponden a coquinas de moluscos. Esto ocurrió en las áreas Oriental y Occidental, pero las condiciones antes mencionadas continuaron al Occidente de la Falla de Río de Oro por un lapso muy amplio, hasta el Cenomaniano.

Al Oriente de la Falla de Río de Oro, las condiciones cambiaron antes del Albiano profundizándose la cuenca, por lo cual se depositaron las arcillas de la Formación o Miembro Mercedes. Posteriormente las condiciones fueron las de un mar de muy poca profundidad y un aporte de sedimentos muy lento, lo que permitió la cristalización de glauconita en grandes cantidades en las arenas de lo que hoy es la Arenisca de Aguardiente. Esto tuvo lugar aparentemente hasta el Albiano. Luego la cuenca se profundizó, estableciéndose un medio reductor donde se depositaron arcillas pelágicas con abundante materia orgánica, y con algunas depositaciones de carbonato representadas en la Formación Capacho. Durante el Cenomaniano, la cuenca se profundizó y se establecieron surgencias, durante las cuales se depositaron calizas pelágicas con abundante material sapropélico, sedimentos silíceos y fosforita.

En la cuenca presente al occidente de la Falla de Río de Oro, las condiciones permanecieron estables hasta el Cenomaniano, ambiente de aguas claras, poco profundas y sin aporte detrítico; en el Cenomaniano se profundizó la cuenca y se presentaron surgencias, produciéndose la depositación de calizas con abundante fauna pelágica y cherts; aparentemente no hubo depositación de fosforita. Este tipo de ambiente fue común a las dos cuencas en mención, y a la mayor parte de las áreas que ocupó el mar Cretáceo en el Oriente Andino, durante el período comprendido entre el Cenomaniano y el Coniaciano. Del Coniaciano hasta el fin del Cretáceo, las dos áreas tuvieron una evolución bastante similar y unas condiciones de aguas progresivamente más someras, debido a una regresión, las que culminaron en condiciones de ambiente litoral.

Al iniciarse la Era Terciaria, las condiciones litorales fueron diferentes para las dos áreas. Al Oriente de la Falla de Río de Oro, parece que se presentaron condiciones en las cuales potentes barras litorales de lo que es Formación Barco, al retroceder la línea de costa, fueron traslapadas por planicies intermareales con manglares, depositándose lo que se deno-

mina Formación Cuervos, que está compuesta principalmente de lodolitas con mantos de carbón. Un breve movimiento transgresivo produjo la formación de nuevas barras litorales (Formación Mirador) sobre las antiguas planicies intermareales de Los Cuervos, y posteriormente se presenta la culminación de la regresión con nuevas llanuras intermareales representadas en la Formación Carbonera, que fosilizan a las barras litorales de la Formación Mirador.

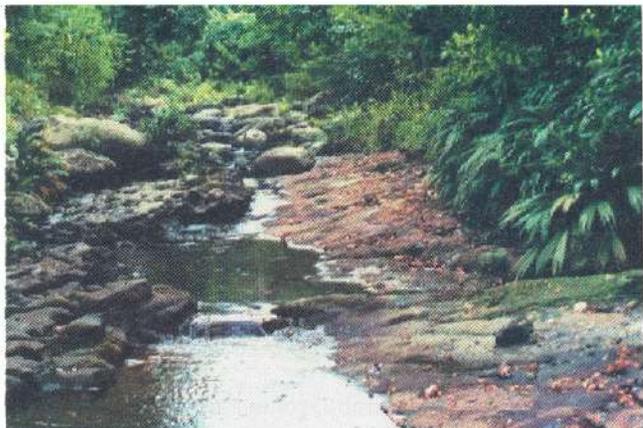
A continuación se presentó un plegamiento suave que formó estructuras muy amplias, y la retirada definitiva del mar. Esto parece haber ocurrido durante el Eoceno Tardío. Posteriormente, ya en condiciones continentales, comenzaron a depositarse sedimentos fluviales, que actualmente se denominan Formación León.

La evolución de la región occidental es diferente. Con la retirada del océano, se presentan condiciones de ambiente litoral; pero a diferencia de aquel de la región oriental, no se inicia la formación de grandes barras de arena litorales y se presentan condiciones lagunares con sedimentación arcillosa en un litoral cuya barrera ante el oleaje parece haber sido barreras calcáreas de lo que se denomina Formación Guasare. En todo caso, se presentan unas condiciones de energía mucho menor que en la región oriental.

Por lo tanto, la sedimentación es predominantemente pelítica con vegetación de manglares, lo que dió lugar a la formación de numerosos mantos de carbón. Posteriormente, posiblemente por rompimiento de barreras, la sedimentación se hace arenosa, pero con una rata lenta de depositación como lo evidencia la presencia de glauconita y la abundante arcilla en los sedimentos detríticos. Parece un área litoral resguardada de la acción de corrientes. En tiempo aún no determinado, hubo un ligero solevantamiento, que produjo un diastema, o más aún una ligera discordancia, al reanudarse la sedimentación que continuó siendo lenta, como lo muestra la estratificación en paquetes muy delgados. Además continuaron las condiciones intermareales, con presencia de lentes de arcilla en las areniscas.

En ambas zonas es evidente una laterización, la cual posiblemente tuvo lugar durante el Eoceno Superior, como se ha definido en gran parte del país.

Con los datos disponibles, es imposible indicar si el plegamiento y su correspondiente levantamiento, y el retiro definitivo del mar, son coetáneos con los de la región oriental. Aunque no se presentan sedimentos continentales en la región occidental dentro del área de estudio, es indudable que existieron y fueron erosionados, ya que más al Norte, en Venezuela, están descritos y denominados formaciones El Fausto y Los Ranchos.



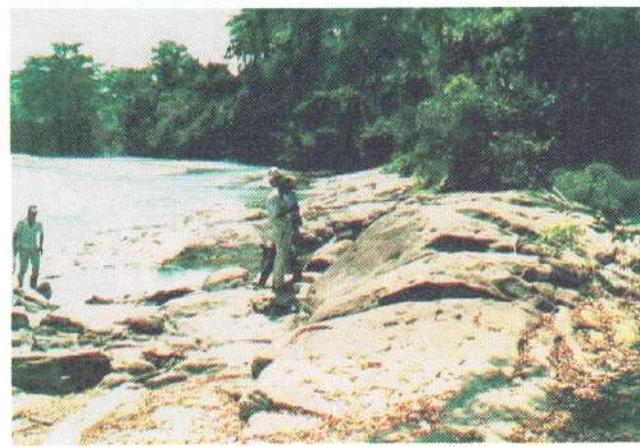
Fotografía 1



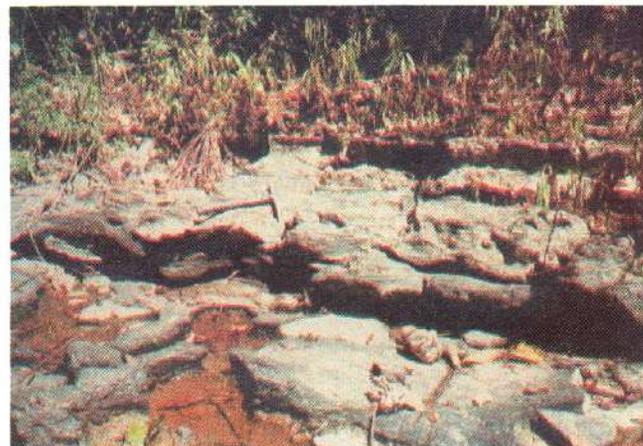
Fotografía 2



Fotografía 3



Fotografía 4



Fotografía 5

Posteriormente al establecimiento de un ambiente definitivamente continental, comenzó un evento de actividad tectónica transcurrente con rumbos N-S y SW-NE, que generó las grandes fallas de rumbo descritas en lo referente a la tectónica. Este episodio puso en contacto las dos áreas de sedimentación que se han mencionado. Aparentemente los fallamientos trascurrentes se iniciaron durante el Oligoceno.

Más tarde, hacia el final del Mioceno o tal vez durante el Plioceno, se inició el levantamiento andino, el cual no está relacionado con la tectónica transcurrente, es posterior y presenta rasgos típicos de una tectónica de bloques.

Hacia el sur de la cuenca del Catatumbo, posteriormente al levantamiento andino, comenzó un nuevo evento de tectónica transcurrente, con dirección NW, el cual



Fotografía 6

dio lugar a los fallamientos de El Bramón, Las Mercedes y otros que produjeron la dislocación de los Andes Colombo-Venezolanos desplazando la Cordillera de Mérida respecto a la Cordillera Oriental de Colombia.

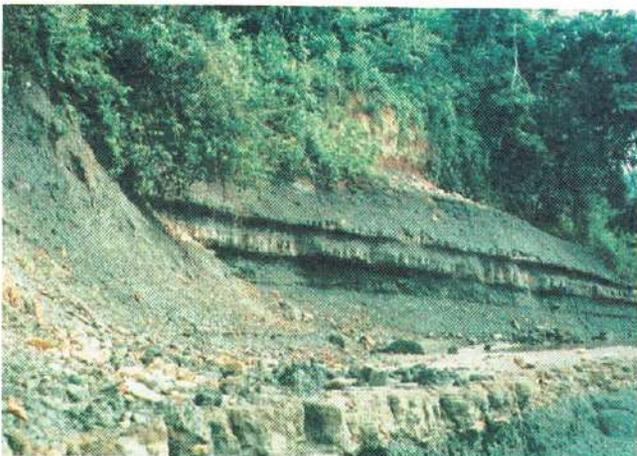
Más tarde, durante el Pleistoceno y parte del Holoceno, tuvieron lugar las glaciaciones, y el enfriamiento climático produjo la desertización de amplias zonas del territorio, lo cual a su vez causó el depósito de arenas eólicas en una gran extensión entre la Serranía de Tibú y el Lago de Maracaibo.

Geología del petróleo

La cuenca del Catatumbo, como parte de la cuenca del Lago de Maracaibo, es muy importante en el marco de la exploración de hidrocarburos en Colombia. Presenta un panorama muy atractivo en cuanto a presencia de rocas generadoras, rocas almacenadoras, niveles de rocas sello y estructuras adecuadas para entrapamiento.

El tema de la roca generadora ha sido ampliamente tratado y el conocimiento de las áreas productoras vecinas en Venezuela hace innecesario referirse adicionalmente a ese aspecto.

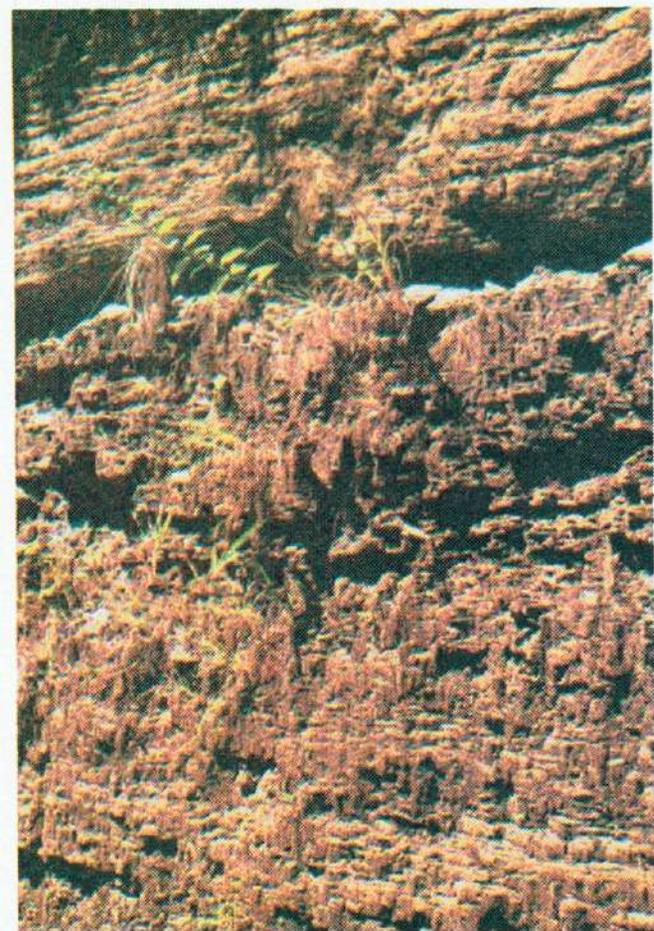
Con respecto a las rocas almacenadoras, cabe hacer algunas anotaciones adicionales. Las calizas localizadas al oeste de la Falla Río de Oro, antes consideradas como parte del Grupo Uribante, que fueron productoras en la Serranía de San Lucas, en el flanco Occidental, aparentemente presentan porosidad secundaria por fracturamiento debido a la Falla Río de Oro y a ello se debe su entrapamiento.



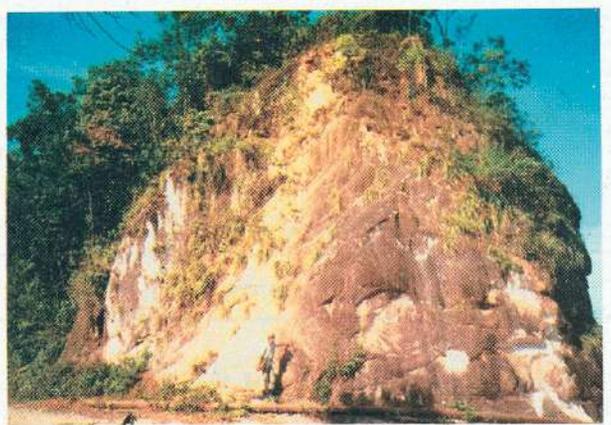
Fotografía 7



Fotografía 8



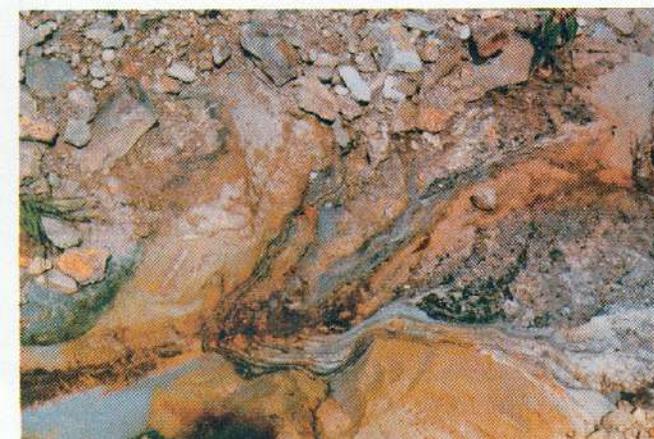
Fotografía 9



Fotografía 10



Fotografía 11



Fotografía 12



Fotografía 13

CONVENCIONES

Qal

Depósitos Aluviales. Aluviones, terrazas (gravas redondeadas y arenas) y algunas acumulaciones coluviales (arenas y gravas).

Qe

Depósitos Eólicos. Arenas cuarzosas de grano fino con ventifactos. Espesor variable <300 (?) m.

SECUENCIA OCCIDENTAL

Tsw

Terciario Superior Occidental. Sedimentos continentales (~500 m de arenisca sucia arcillosa, marrón, en estratos gruesos, superpuesta por >200 m de arenisca cuarzosa rosada con estratificación cruzada e intercalaciones de arcillolita) discordantes sobre el Terciario Inferior Occidental (Tiw).

Tiw

Terciario Inferior Occidental. Sedimentos transicionales entre marinos y continentales (~600 m) con predominancia de lutitas negras carbonosas superpuestas por ~500 m de areniscas sucias arcillosas con algunas intercalaciones de arcillolitas y mantos de carbón de notable espesor.

Kw

Cretáceo Occidental. Corresponde a una sucesión de sedimentos marinos discordantes sobre rocas de edad Pre-Cretácea. En la base se presenta la Formación Cogollo (~400 m de gruesos niveles de caliza, ~100 m de caliza micrítica y ~150 m de lutita), superpuesta por la Formación La Luna Occidental (~100-200 m de caliza bituminosa) y ~1000 m de Cretáceo Superior (lutita carbonosa gris plomizo con esporádicos niveles angostos de calizas lumaquéticas).

Pre-Kw

Pre-Cretáceo Occidental. El basamento en este bloque comprende rocas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico inferior, intruidas en algunos sitios por stocks, reposando sobre un Pre-Cámbrico migmatítico.

SECUENCIA ORIENTAL

Tse

Terciario Superior Oriental. Formaciones León y Guayabo. Sedimentos continentales (~400 m de arcillolita y arenisca) discordantes sobre el Terciario Inferior Oriental (Tie).

Tie

Terciario Inferior Oriental. Reposo sobre el Cretáceo Oriental (Ke) y consta de sedimentos transicionales entre marinos y continentales que incluyen la Formación Barco (~200 m de arenisca blanca, cuarzosa, con ligera recristalización del cuarzo), la Formación Cuervos (~400 m de lutita negra con intercalaciones de arenisca y mantos de carbón), la Formación Mirador (~500 m de arenisca cuarzosa blanca, algo ferruginosa, sacaroides, friable) y la Formación Carbonera (~500 m de arcillolitas grises, areniscas a veces glauconíticas y algunos mantos de carbón).

Ke

Cretáceo Oriental. Sedimentos marinos discordantes sobre el Pre-Cretáceo. En la base se presenta la Formación Uribante (~450 m de arenisca glauconítica y calizas micríticas y lumaquéticas; subdividido en Miembros Tibú, Mercedes y Aguardiente), superpuesta por la Formación Capacho (~200 m de lutita, caliza y arenisca glauconítica), la Formación La Luna (~100 m de caliza fosfática y bituminosa, lutita y chert) y ~1000 m de Cretáceo Superior (Formaciones Mito Juan, Colón y Catatumbo, que constan de lutitas carbonosas, calizas lumaquéticas y areniscas).

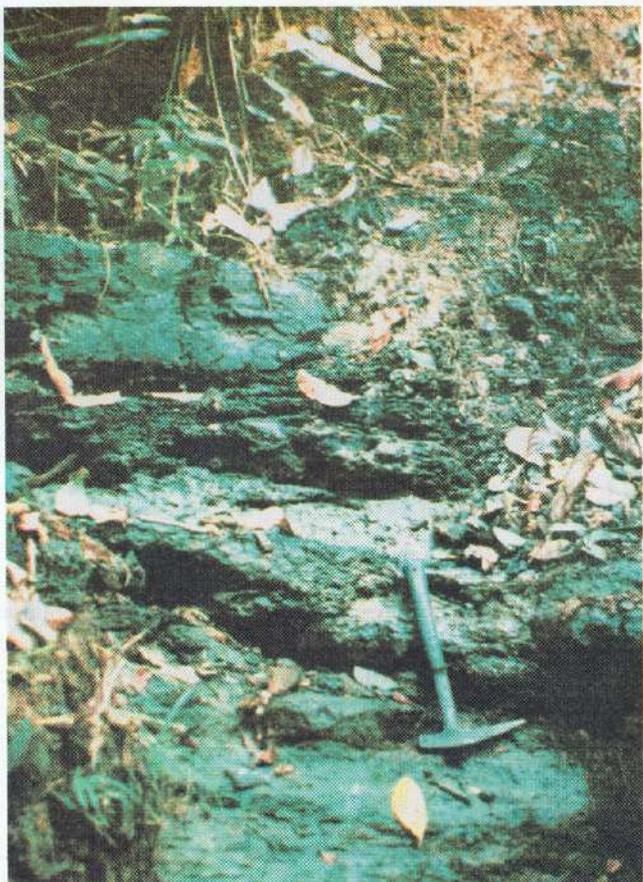
Pre-Ke

Pre-Cretáceo Oriental. Comprende esquistos, neises, granitos y migmatitas de edad Pre-Cámbrica.

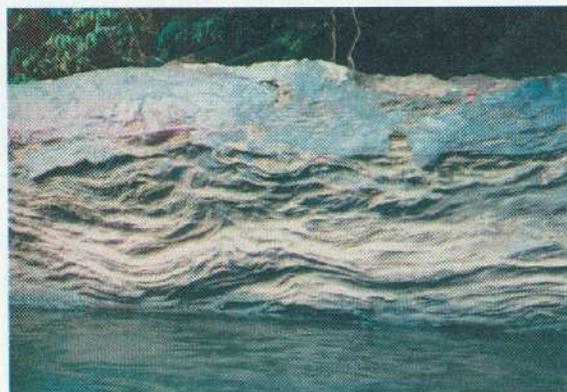
En la secuencia litológica del oriente de la Falla Río de Oro, los niveles almacenadores son numerosos y ejemplos de ellos pueden resumirse así:

- Las areniscas de la Formación Aguardiente son productoras en los campos de Tibú y Socuavo.
- La Formación Capacho, o Cogollo, es productora en el campo Petrólea.

- Algunas areniscas de la Formación Mito Juan fueron productoras en el Campo Sardinata.
- Algunas areniscas de la Formación Catatumbo producen en los campos de Tibú y Sardinata.
- La Formación Barco fue productora en los campos de Socuavo, Tibú, Sardinata y Petrólea.
- La Formación Mirador presenta producción en el Campo Zulia.



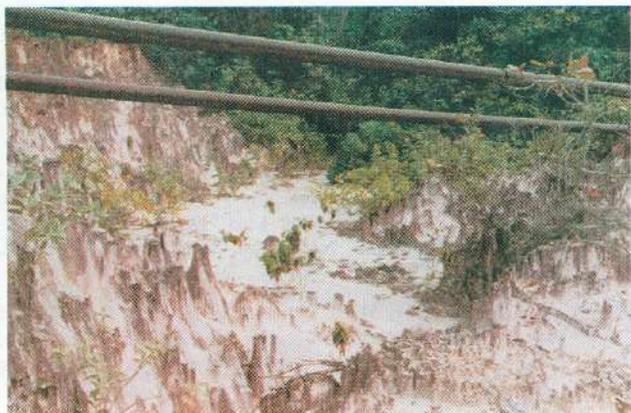
Fotografía 14



Fotografía 15



Fotografía 16



Fotografía 17



Fotografía 18



Fotografía 19



Fotografía 20

- La Formación Carbonera produce en el Campo Socuavo.

A esto cabe agregar que hay suficientes formaciones y niveles de composición pelítica que constituyen rocas sello.

Vale por lo tanto revisar las condiciones del entrapamiento y las estructuras que lo producen. Hasta ahora, las estructuras productoras han sido descritas como partes o fragmentos de anticlinales fallados. Pero la observación de la tectónica transcurrente del área sugiere que esas estructuras han sido originadas por efecto de fallamiento de rumbo, lo que genera nuevas perspectivas.

Se pueden observar grandes estructuras en el ángulo obtuso de las intersecciones de fallas, y un buen ejemplo de este tipo de estructuras lo constituye la de forma de abanico que se observa al este de las fallas de Catatumbo y Mirolindo, que la cierran en su extremo occidental. Otro tanto se observa en la intersección de las fallas de Catatumbo y Río de Oro o en la intersección de las fallas Río de Oro y La Gabarra.

Generalmente, al lado de dichas estructuras en forma de abanico se observan estructuras negativas, en el ángulo agudo de las intersecciones de las fallas, cuya forma sugiere un cabeceo sinclinal, como es el caso del "Sinclinal de Río de Oro" o la estructura que se observa entre las fallas de Catatumbo y Mirolindo.

Otra posibilidad exploratoria que presenta la tectónica transcurrente es la presencia de estructuras en flor. Un

ejemplo de estructura en flor positiva parece presentarse en la Serranía de San Lucas a lo largo de la Falla Río de Oro, que ha sido descrita como el "anticlinal" fallado de San Lucas y donde en el pasado hubo importante producción de hidrocarburos.

Bibliografía

- Bernal, J. et al.** 1987. Informe Geológico del Sector Río Catatumbo-Río de Oro: Inédito, Ecopetrol, Inf. No. 1440, 68 págs., 11 figs., 11 fotografías, 6 anexos.
- Bouman, Q.C. & Gibson, G. B.** 1964. A Geologic Review of the Barco Area: Inédito, Colombian Petroleum Co., Inf. GR-304, 81 págs., 27 figs., 18 plates, 4 App.
- Bouman, Q.C.** 1964. The Geologic History of the Cretaceous and Tertiary Sedimentary Basins in Northeastern Colombia Western Venezuela: Inédito, Colombian Petroleum Co., Inf. GR-303, 46 págs., 22 figs.
- Bowler, J. W.** 1942. Core Drilling Socuavo del Norte, Inédito, Ecopetrol, Inf. 2151, 15 págs., 2 figs.
- Buerguer, C. B.** 1941. Geological and Geophysical Exploration of the Barco Concession: Inédito, Colombian Petroleum Co., Inf. GR-96, 22 págs.
- De La Espriella, R., Galvis Vergara, J., & Herrera, A.** 1981. Geología del Desarrollo Hidroeléctrico del Río Catatumbo: En Gómez Cajiao y Asociados Cía. Ltda., Desarrollo Hidroeléctrico del Río Catatumbo, Informe de Prefactibilidad, Vol. III, Apéndice B - Geología, 44 págs., 7 figs., 2 anexos.
- _____ **Monroy, M. & Marulanda, N.** 1983. Geología del Proyecto La Gabarra: En Gómez Cajiao y Asociados Cía. Ltda., Desarrollo Hidroeléctrico del Río Catatumbo, Proyecto La Gabarra, Vol. III, Apéndice C - Geología, 205 págs., 157 figs., 2 anexos.
- Fetzer, W.** 1940. Informe de la Investigación sin Terminar sobre las Posibilidades Minerales Económicas de la Reserva Petrolífera

- del Gobierno en el Departamento Norte de Santander: Inédito, Servicio Geológico Nacional, Inf. No. 111, 60 págs., 6 figs.
- Galvis Vergara, J., De La Espriella, R., Cortés DelValle, R. & Ujueta, G.** 1991. Revisión de Algunos Conceptos sobre la Geología de la Cuenca Inferior del Catatumbo Colombiano: Inédito, Instituto Colombiano del Petróleo. 145 págs., 143 figs.
- Geostudios Ltda. & Ujueta, G.** 1987, Estudio Fotogeológico del Area Río Catatumbo-Río Tomás, Norte de Santander: en Bernal, J. et al, 1987, Inédito, Ecopetrol, Inf. No. 1440, Anexo 2: 17 págs., 3 figs., 5 mapas
- Hubach, E.** 1931. Geología Petrolífera del Departamento de Norte de Santander: Inédito, Servicio Geológico Nacional, Inf. No. 176, 461 págs., 26 figs.; 1993. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia, Tomo XII, págs. 1-377, 26 planchas, Bogotá.
- Hubman, C. W.** 1941b. Structure and Productive Possibilities of the Río de Oro Anticline, Barco Concession: Inédito, Colombian Petroleum Co., Inf. GR-75, 46 págs.
- INGEOMINAS, 1980a. Plancha 66-Miraflores: Escala 1:100.000, Bogotá.
- INGEOMINAS, 1980b. Plancha 76-Ocaña: Escala 1:100.000, Bogotá.
- INGEOMINAS, 1981. Plancha 86-Abrego: Escala 1:100.000, Bogotá.
- Instituto Colombiano del Petróleo. 1990. Evaluación Cuenca Catatumbo, I Etapa: Compilación y Evaluación de Información: Ecopetrol, Inf. Inédito
- Miller, J.B.** 1960. Directrices Tectónicas en la Sierra de Perijá y Partes Adyacentes de Venezuela y Colombia: III Congreso Geológico Venezolano, Tomo II, págs. 685-718, 16 figs., Caracas.
- Notestein, F., Hubman, C. & Bowler, J.** 1944. Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America: Geological Society of America, Bulletin, Vol. 55, No. 10, págs. 1165-1216, 6 pl., 12 figs., New York.
- Richards, H.G.** 1968. Cretaceous Section in Barco Area of Northeastern Colombia: American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, Vol. 52, No. 12, págs. 2324-2336, Tulsa.
- Roberts, J.M., Conley, D.L. & Millspaugh, R.C.** 1959. The Barco Concession, Santander del Norte: En 1979, Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists, Geological Field-Trips 1959-1978, First Annual Field Conference, January 3-4, págs. 1-32, 11 figs., Ed. Geotec, Bogotá.
- Robertson Research Inc., 1985. Colombia Petroleum Geology, A Basin by Basin Evaluation: Inédito.
- Sarmiento Alarcón, A.** 1947. Reconocimiento de Fosfatos en la Región comprendida entre los Ríos Catatumbo y Orú, Departamento de Santander: Inédito, Servicio Geológico Nacional, Inf. No. 539, 10 págs., 1 fig.; 1953, Boletín Geológico, Año I, No. 3, págs. 58-66, 1 fig., Bogotá.
- Servicio Geológico Nacional e Inventario Minero Nacional. 1967a. Cuadrángulo F-13 Tibú: Escala 1:200.000, Bogotá.
- Servicio Geológico Nacional e Inventario Minero Nacional. 1967b. Cuadrángulo G-13 Cúcuta: Escala 1:200.000, Bogotá.
- Smith, J. E.** 1951. The Cretaceous Limestone Producing Areas of the Mara and Maracaibo Districts - Venezuela: Third World Petroleum Congress, Proceedings, Section I, págs. 56-72. The Hague.
- Sutton, F. A.** 1946. Geology of Maracaibo Basin, Venezuela: American Association of Petroleum Geologists, Vol. 30, No.10, págs. 1621-1741, 8 figs, 11 pl., Tulsa.

SOBRE LOS ALISIOS DEL NORDESTE Y LA EXISTENCIA DE UNA CORRIENTE EN EL PIEDEMONTE ORIENTAL ANDINO

por

Gerardo de J. Montoya G., Joaquín Pelkowski & Jesús A. Eslava R.¹

Resumen

G. Montoya, J Pelkowski & J.A. Eslava: Sobre los alisios del nordeste y la existencia de una corriente en el piedemonte oriental andino. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 25(96): 363-370, 2001. ISSN 0370-3908.

Nuevas evidencias sobre el comportamiento de los vientos alisios, aportadas por la información del "Reanálisis" son discutidas en este trabajo. En particular, se muestra que los alisios del noreste ejercen una marcada influencia sobre la región norte de Sudamérica y hasta, aproximadamente, 5-10° S durante el invierno boreal. Además, se llama la atención sobre la existencia de una corriente, detectada en ese conjunto de datos, la cual bordea el costado oriental de los Andes hasta 20-30° S, durante esta misma época del año. La existencia de estos vientos y de tal corriente, por lo visto no mencionadas hasta ahora en la literatura especializada, pueden ser explicadas teóricamente por la relación entre el viento y presión para latitudes bajas. Además, la influencia de los alisios del noreste durante el invierno puede tener importantes consecuencias en el ciclo hidrológico de la Amazonia, en la conformación de su flora y de su fauna, como también en el transporte de partículas de polvo, polen y otras sustancias desde la costa noroccidental africana hasta el costado nororiental de Sudamérica.

Palabras clave: Sudamérica, meteorología, vientos alisios, corrientes de aire, hidrología, Amazonia.

Abstract

Based on new evidence from the Reanalysis, we examine the behavior of the trade winds, especially the influence of the northeast trades, which have a marked bearing on the northern part of South America, down to approximately 5-10°S during the boreal winter. We point out the presence of a current in these data, bordering the eastern limits of the Andean chain well down to 20-30°S, during the same period of the year. Those winds, as well as the current which seemingly have remained unnoticed in the extant literature, may be understood on the basis of a simple wind-pressure relationship. The trades and the current may be helpful in explaining the hydrological cycle of Amazonia, the formation of the flora and fauna there, as well as the long range transport of dust and pollen, among other substances, from the north African coast to South America.

Key words: South America, meteorology, trade winds, northeast trades, hydrology, Amazon basin.

1. Introducción

Los vientos alisios son, tal vez, la característica más sobresaliente de la circulación atmosférica en ambos hemisferios. El nombre de estos vientos se deriva de su persistencia. Los franceses los llamaban "vents alizés", de una vieja palabra francesa "alis" que significa regular.

Los vientos alisios revisten una singular importancia en la historia del desarrollo del nuevo mundo. Los extensos viajes en la era de los descubrimientos geográficos habían permitido conocer los alisios a partir del siglo XV, con el consiguiente aprovechamiento para la navegación. A este respecto, **Eslava** (1992) (en su obra, *El enigma de Colón y los descubrimientos de América*) anota: "...para llegar hasta el Caribe bastaba con colocar un velero en el corredor de los alisios que soplan constantemente desde la zona noreste de las Canarias". Los españoles llamaban por ello a esta parte del Océano "el mar de las damas" (**Helmholtz**, 1875), porque se les podía entregar el timón de los veleros.

Tal vez la primera descripción de estos vientos fue hecha en 1590 por el padre Jesuita José de Acosta, (**Acosta**, 1590). Por la misma época, Galileo Galilei asociaba la existencia de estos vientos con la rotación del cielo. Más tarde a fines del siglo XVII, grandes eruditos de la ciencia; E. Mariotte, E. Halley, y R. Hook así como el bucanero W. Dampier (ver **Hellmann**, 1896), enriquecen el conocimiento empírico, teórico y práctico de los alisios, en parte asociándolos con el intercambio de masas de aire entre el polo y el ecuador. Sin embargo, una explicación científica más acertada se debe a **Hadley** (1735). Posteriormente, estos vientos fueron analizados por **Teisserenc de Bort & Rotch** (1905), **Sverdrup** (1917), **Riehl et al.** (1951), **Riehl & Malkus** (1957), **Neiburger** (1960), entre otros (ver también **Hastenrath**, 1996).

Las principales características de estos vientos y su relación con el campo de la presión y otros parámetros se describen por ejemplo en los libros de **Riehl** (1979), **Krishnamurti** (1976), **Hastenrath** (1996), quienes basaron sus análisis en datos escasos y plasmados en las cartas confeccionadas por **US Departement of Commerce** (1938): **Atkinson & Sadler** (1970), entre otros autores.

Nuevas características del comportamiento de los vientos alisios, en particular de los alisios del noreste, pueden ser observadas en conjuntos de datos más recientes, tales como los del proyecto "Reanálisis", un conjunto de datos preparado por el programa NCEP NCAR de los EE UU con base en las observaciones meteorológicas de rutina, satélites meteorológicos, y otras fuentes de datos (ver por ejemplo **Kalnay, Kanamitsu & Kistler**, 1996).

El objetivo principal de este trabajo es presentar estas nuevas características del comportamiento de los vientos alisios del noreste, con base en el análisis de los mapas preparados con la información del "Reanálisis" y su comparación con las anteriores. La exposición del trabajo está organizada de la siguiente manera: primero se revisan las principales características de los vientos alisios; esta revisión está basada en las cartas de **Riehl** (1979) y del "Reanálisis". En el párrafo 3 se analiza la influencia de los alisios del noreste sobre la región norte de Sudamérica. En el párrafo 4 se analiza la corriente que bordea los andes orientales y finalmente se presentan las conclusiones.

2. Características principales de los vientos alisios

Los vientos alisios se originan en las altas subtropicales y fluyen hacia el ecuador, algunas veces traspasándolo, con dirección del noreste en el hemisferio norte y del sureste en el hemisferio sur, tal como se puede observar en la figura 1, tomada de **Riehl** (1979).

Debido probablemente a la falta de observaciones, en la figura 1, no se nota una influencia marcada de los alisios del noreste sobre la región continental de Sudamérica durante el invierno boreal. En la parte superior de la figura 1 se percibe más bien una discontinuidad de los alisios en esta zona. Mapas de viento similares a los de la figura 1 (arriba), se presentan repetidamente en atlas y otras publicaciones (ver por ejemplo, **Lacoste** 1992, pag.126), que, como se verá más adelante, no coinciden con los mapas construidos con base en el "Reanálisis" para la estación de invierno.

En las figuras 2a, b y c, se presentan los mapas medios mensuales de presión y vientos (superpuestos) construidos en base a la información del Reanálisis para el período 1969 - 1998. En estos mapas, las isolíneas corresponden a valores medios de presión y las flechas a la dirección y velocidad del viento medio.

Los cuadros de las figuras 2a, b y c, confirman las características medias de los vientos alisios y de la circulación tropical encontradas y analizadas por **Krishnamurti** (1976), **Riehl** (1979), **Hastenrath** (1996), entre otros autores. Además, de las características ya mencionadas en relación con la figura 1, se señalan las siguientes: la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) ocupa su posición más septentrional en julio- agosto y su posición más austral en enero - febrero. La ZCIT, la vaguada ecuatorial y las altas subtropicales, migran durante el año siguiendo los pasos de la declinación del sol.

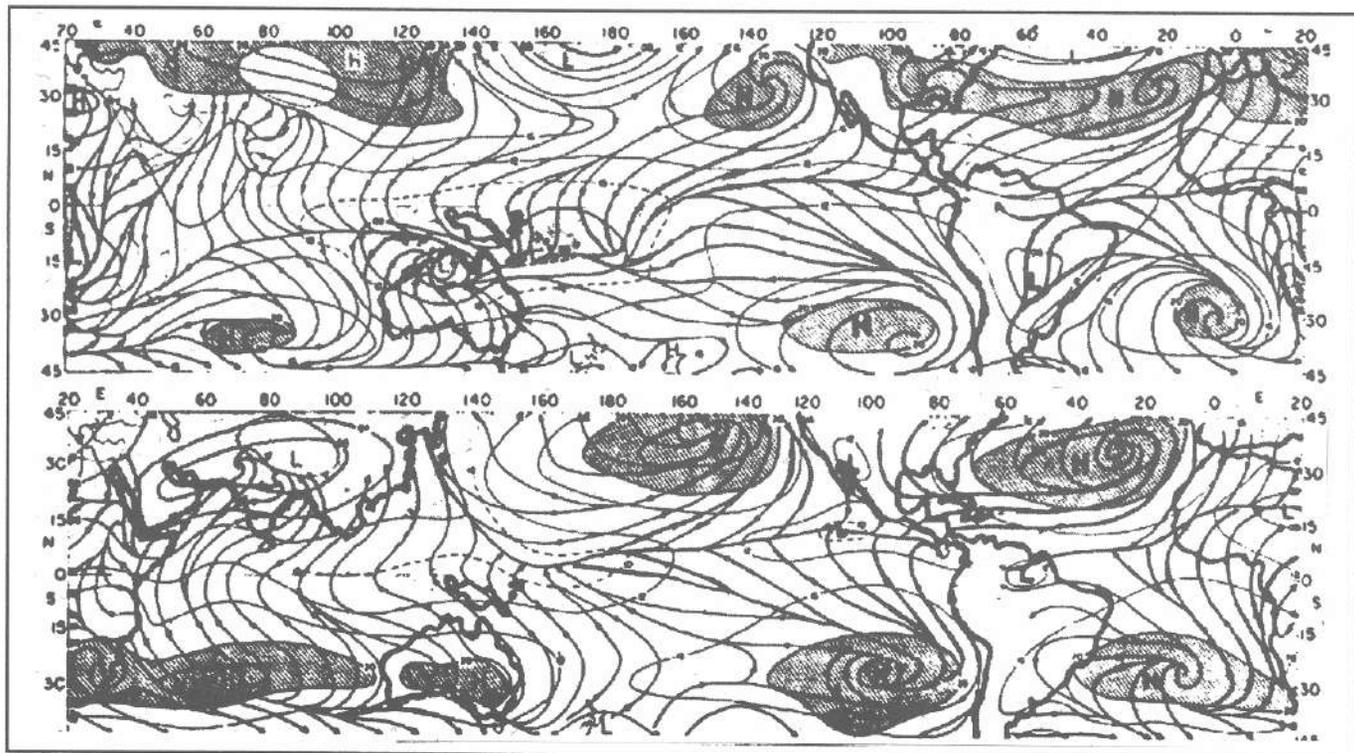


Figura 1. Líneas de corriente en superficie e isobaras a nivel del mar. Arriba: Enero. Abajo: Julio. Las áreas con presión superior a 1020 hPa están sombreadas. Tomada de Riehl (1979).

Estas observaciones confirman que la información contenida en el "Reanálisis" reproduce las características principales de la circulación tropical y de los vientos alisios en la región analizada, permitiendo con ello sacar nuevas conclusiones sobre el comportamiento de los vientos alisios.

3. La influencia de los vientos alisios sobre la región norte de Sudamérica durante el invierno boreal.

Observando detenidamente los cuadros de las figuras 2a, b y c, se observa una región continua ocupada por los alisios del noreste desde diciembre hasta marzo aproximadamente. Esta región llega a extenderse desde la costa occidental africana hasta 5-10°S en el continente Sudamericano y por lo visto no parece haber sido registrada por otros autores.

Los contornos de presión en las figuras 2a, b y c, también muestran algo muy peculiar: a partir del mes de octubre, comienza a formarse un sistema de baja presión sobre el continente sudamericano, el cual emerge desde latitudes subtropicales (20-30°S) y luego se funde con vaguada ecuatorial presente en esta época del año. La región de

bajas presiones perdura hasta marzo, se extiende hasta 5°-7° norte y se puede reconocer en los cuadros de las figuras 2a, b y c, como la región sombreada en forma de hongo, de octubre hasta diciembre, y en forma de caballito de mar desde enero hasta marzo. Durante los meses siguientes esta región de baja presión comienza a fraccionarse hasta diluirse completamente en los meses de julio-agosto y septiembre.

La acción de los vientos alisios del noreste sobre la región norte de Sudamérica parece entonces estar relacionada con la vaguada ecuatorial, la cual entra a formar parte de un sistema de baja presión más extenso, que se forma sobre el continente sudamericano durante esta época del año.

4. La corriente que bordea el Piedemonte de la Cordillera de los Andes durante el invierno

En los gráficos de la figura 3 se muestra el mismo campo de viento de las figuras 2a, b y c, pero ahora superpuesto a una carta geográfica de Sudamérica con indicación de relieve.

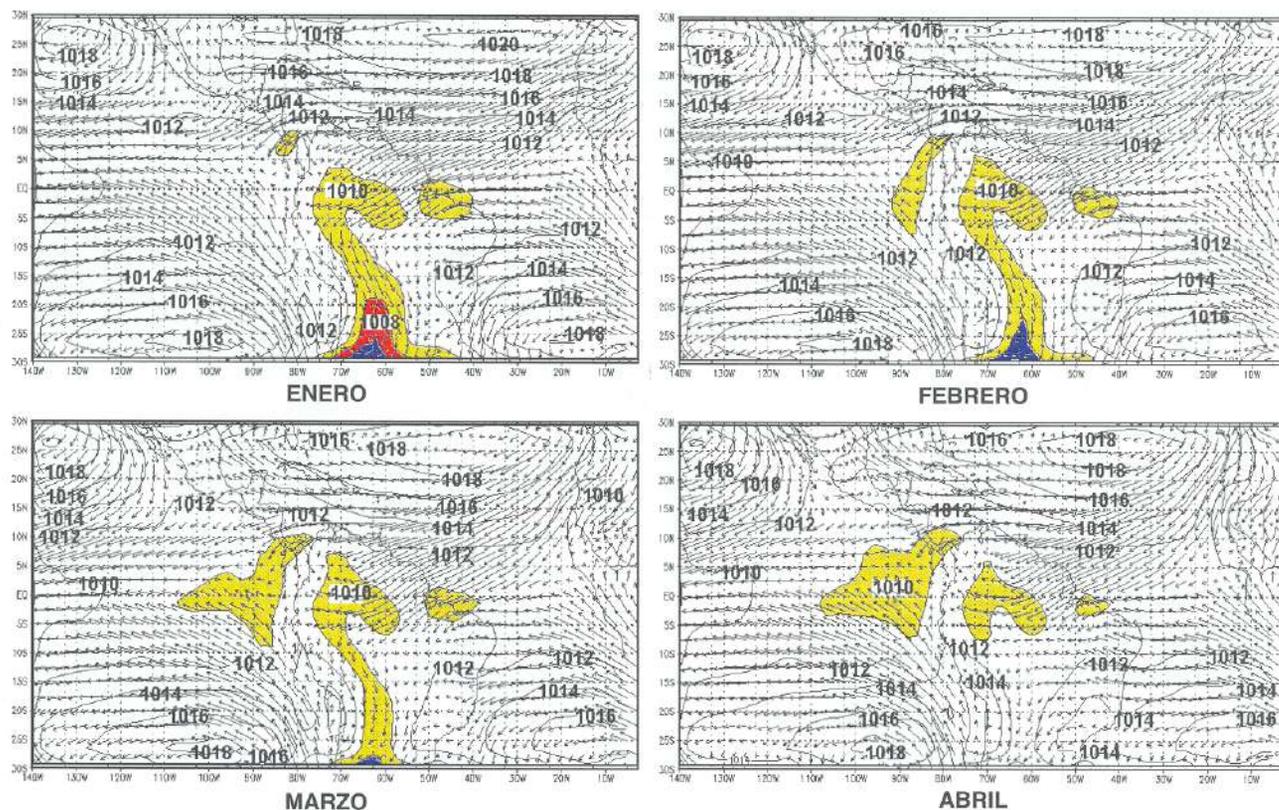


Figura 2a. Mapas medios mensuales de viento (flechas) y de presión (isolíneas). Las áreas sombreadas corresponden a bajas presiones (1010 hPa y menos), sobre el continente Sudamericano.

En estos cuadros se puede observar cómo los alisios del nordeste entran en el continente sudamericano por la costa nororiental y penetran luego hasta el costado oriental de la cordillera de los Andes, dando lugar a una corriente (resaltada en la figura 3) que bordea el piedemonte oriental de la cordillera y avanza bien adentro hasta latitudes subtropicales. Esta corriente extiende su acción de diciembre a marzo aproximadamente. Si la existencia de esta corriente, por lo visto aún registrada en la literatura disponible, más que un resultado o artefacto del "Reanálisis", podría ser llamada corriente de los Andes Orientales (CAO).

5. La relación entre el campo del viento y la presión: una probable explicación

Una probable explicación a la existencia de estos vientos del nordeste y la formación de la corriente CAO durante el invierno puede ser obtenida mediante un análisis

de la relación existente entre el campo del viento y el de la presión para latitudes tropicales.

Entre el viento y la presión existe una estrecha relación. En latitudes medias del hemisferio norte y en la atmósfera libre, el viento fluye aproximadamente a lo largo de las isobaras. Además, alrededor de centros de alta presión, como es el caso de las altas subtropicales, en el hemisferio norte el viento circula en el sentido de las manecillas del reloj (en el hemisferio sur el sentido de la rotación se invierte). Esta forma de circulación del viento según las isobaras, es una consecuencia del equilibrio entre tres fuerzas: el gradiente de presión, la fuerza de Coriolis y la fuerza centrífuga. El viento resultante de este equilibrio se conoce con el nombre de viento de gradiente, y matemáticamente se expresa a través de la ecuación del movimiento escrita en coordenadas naturales (curvilíneas) véase, por ejemplo Gordon (1965):

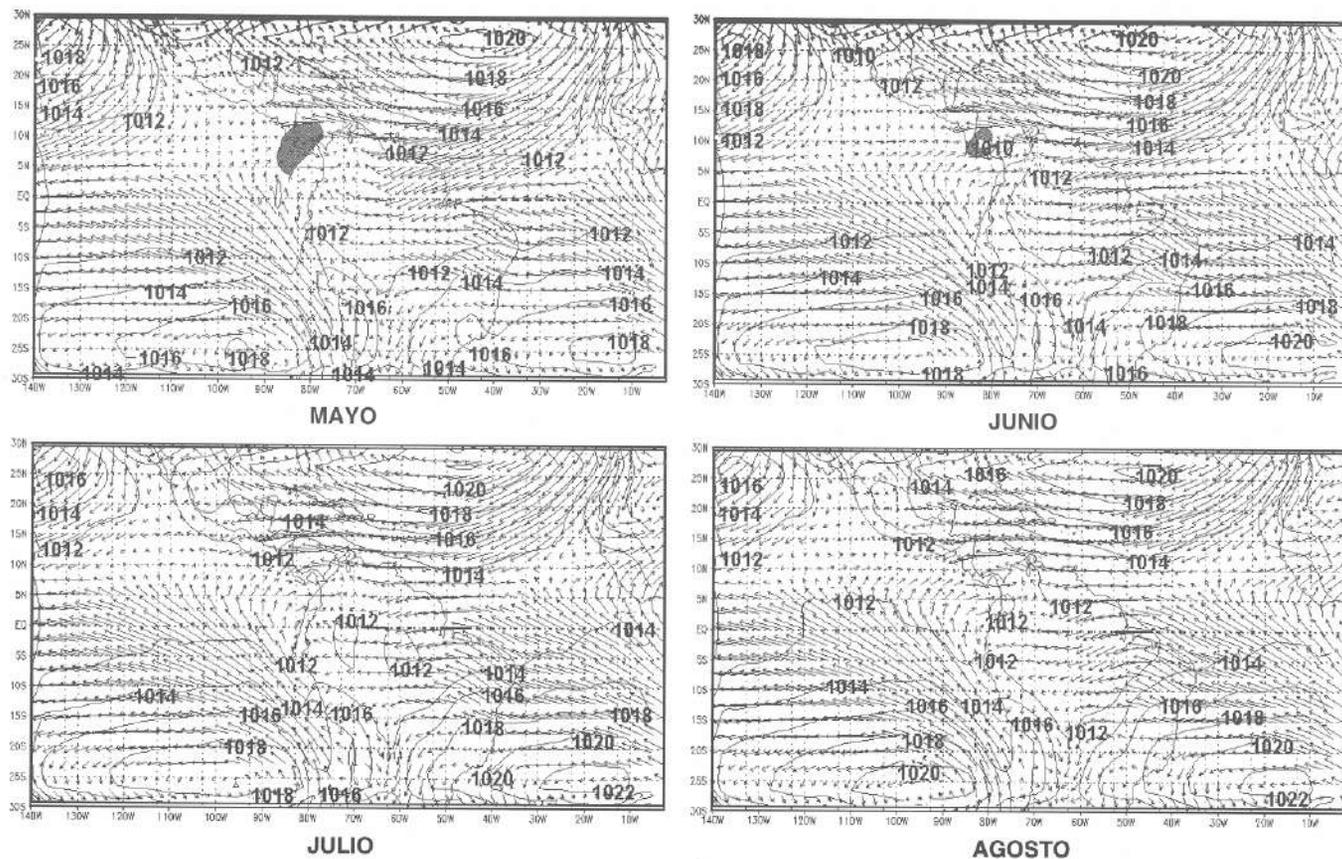


Figura 2b. Como en la Figura 2a.

$$\frac{V^2}{R} + fV = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1)$$

Donde f es el parámetro de Coriolis, R es el radio de curvatura (de la isobara), el cual se considera negativo en una circulación anticiclónica, V es la velocidad del viento, n la normal a la isobara y ρ la densidad del aire. El término en el miembro derecho de la ecuación (1), representa la componente del gradiente de presión normal al flujo. La solución de esta ecuación cuadrática en V se escribe para el caso anticiclónico como:

$$V = \frac{fR}{2} - \sqrt{\frac{f^2 R^2}{4} - \frac{R}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}} \quad (2)$$

La elección del signo negativo delante de la raíz, se debe a la restricción de que, cuando el gradiente de pre-

sión sea cero, el viento de gradiente V_{gr} también debe ser igual a cero.

Es fácil notar que cuando,

$$\frac{\partial p}{\partial n} > \frac{\rho R f^2}{4}$$

O lo que es lo mismo,

situación que puede presentarse en latitudes bajas donde el parámetro de Coriolis disminuye a medida que nos acerquemos al ecuador, la solución (2) se torna imaginaria y el viento de gradiente, como tal, deja de existir. Esto significa que el viento dejará de fluir a lo largo de las isobaras atravesándolas directamente desde la alta presión hacia la baja, tal como aparece en la región de vientos del noreste considerada anteriormente en las figuras 2-3. Así pues, la formación de la corriente CAO puede ser debida a la interacción, en latitudes bajas, entre el campo

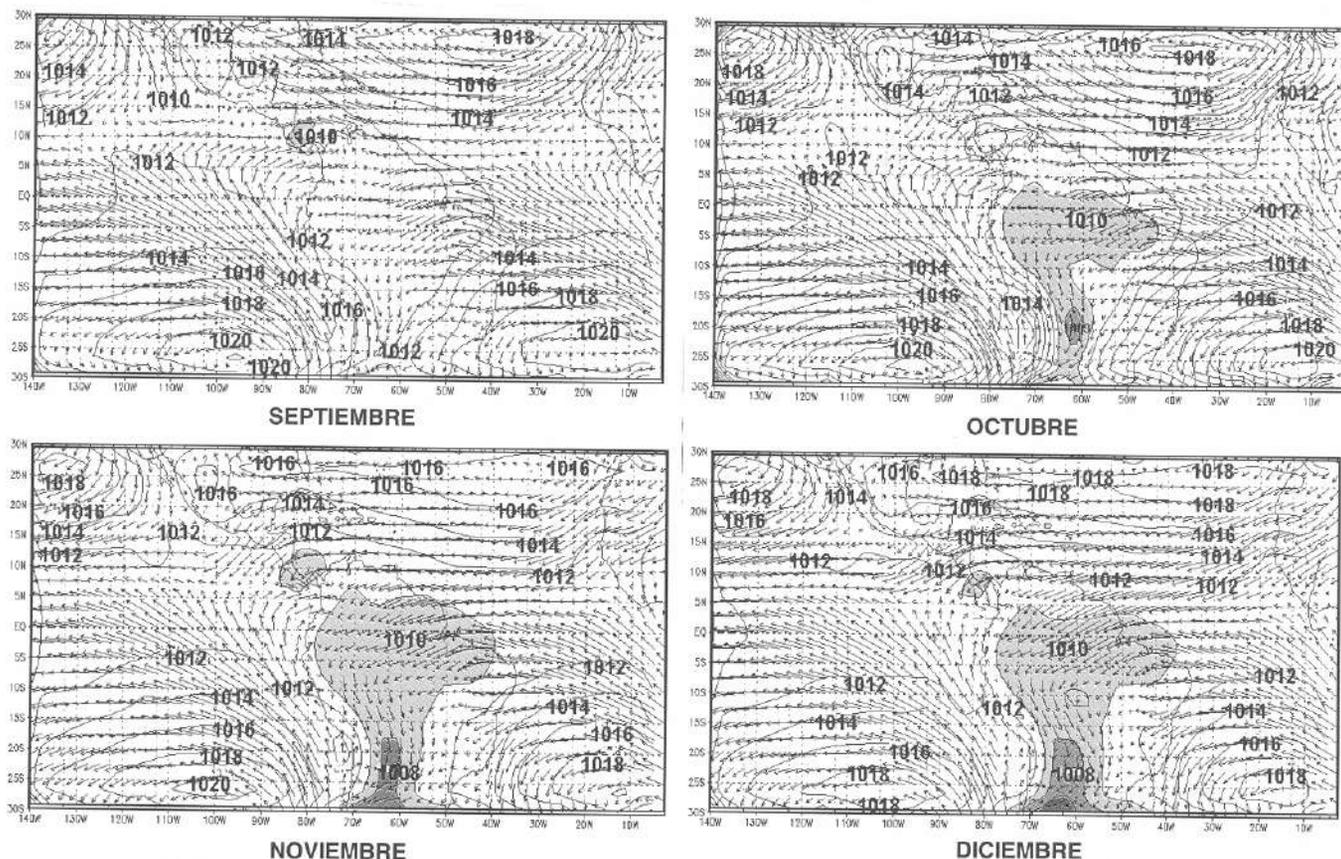


Figura 2c. Como en la Figura 2a

del viento generado en la alta del Atlántico norte y la baja presión desarrollada sobre el continente americano durante el invierno boreal (o verano austral). Debido a la dificultad en traspasar la cordillera de los Andes, esta corriente continúa su curso bordeando el piedemonte oriental de la cordillera.

Conclusiones

Los mapas confeccionados con la información del "Reanálisis" muestran una influencia, no vista en mapas anteriores de los vientos alisios del noreste sobre la parte norte de Sudamérica en la época del invierno boreal. La influencia de estos vientos se propaga hasta 5-10°S donde se confunden con una corriente que bordea los Andes orientales, que se propaga hasta latitudes subtropicales y que proponemos llamar en este artículo corriente CAO.

La acción de estos vientos parece estar relacionada con la vaguada ecuatorial que entra a formar parte de un sistema de baja presión más extenso, el cual se forma sobre el continente Sudamericano durante esta época del

año. Además, la interacción entre estos vientos del noreste y la vaguada, puede ser explicada por medio de la relación viento-presión para latitudes bajas.

Puesto que estos vientos son un eficiente mecanismo para el transporte de humedad, polvo, polen y otras partículas desde la costa occidental africana hasta el Caribe y norte de Sudamérica, la persistencia de ellos y la existencia de la corriente CAO durante el invierno boreal, puede tener profundas consecuencias en la modulación del ciclo hidrológico de la Amazonia y en la formación de su flora y su fauna.

De acuerdo con los mapas presentados, en las figuras 2-3, parece ser que la cordillera de los Andes constituye una barrera natural al desplazamiento de los vientos alisios. Particularmente, estos mapas sugieren que la humedad que alimenta los ríos amazónicos, en donde el máximo anual de precipitación se presenta entre diciembre y marzo, proviene en su mayoría del Océano Atlántico y no del Pacífico como se podría pensar, debido a su cercanía.

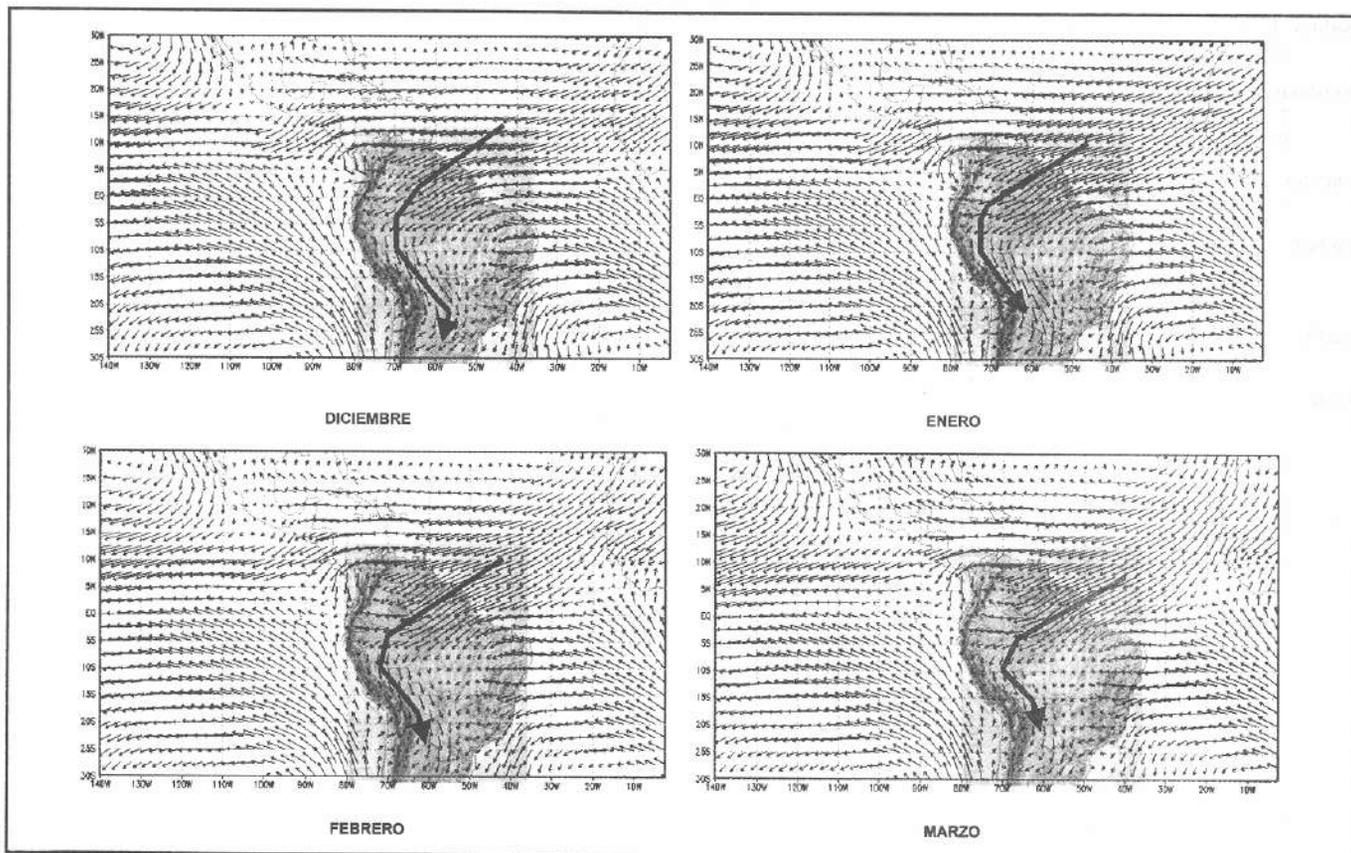


Figura 3. Vientos medios mensuales superpuestos sobre un mapa con indicación del relieve. La posición de la corriente CAO se resalta con una línea gruesa

Aunque para probar la existencia de esta corriente en el Piedemonte oriental andino se requiere realizar un trabajo más completo, que incluya experimentos de campo y otros métodos de comprobación, uno de los propósitos que busca esta publicación es llamar la atención sobre nuevos resultados obtenidos con ayuda del conjunto de datos llamado "Reanálisis", resultados aparentemente consistentes entre sí, de acuerdo con la exposición del trabajo.

Reconocimientos

Este trabajo realizado por el Grupo de Investigaciones en Meteorología-U.N., que cuenta con el apoyo financiero de COLCIENCIAS y el BID, contratos COLCIENCIAS-U.N. No.391/99 y 364/2000. El mismo forma parte de los resultados del Proyecto "Proyecciones climáticas e impactos socioeconómicos del cambio climático en Colombia", contrato COLCIENCIAS-U.N. No. 321-98.

Expresamos nuestros agradecimientos a los Institutos: NCEP y NCAR de los EE UU, por el suministro de los datos del Reanálisis utilizados en este estudio.

Referencias bibliográficas

- Acosta, Joseph, 1590. Historia natural y moral de las indias. Reimpresión, 1964, fondo de cultura económica, Méjico., 490 p.
- Atkinson, G.D. & J.C. Sadler. 1970. Mean cloudiness and gradient level winds charts over the tropics. USAF Air Weather Service. Technical Report No 215, vol 1 text, vol 2 Charts.
- Eslava, Juan G. 1992. El enigma de Colón y los descubrimientos de América. 1ª reimpresión. Edit. Planeta colombiana S.A., Bogotá, 247 pp.
- Gordon, A.H., 1965. Elementos de meteorología dinámica. Tr. al español por José Chávez Almanza. Uteha, México, 223 pp.
- Hadley, G., 1735. "Concerning the cause of the general trade winds" Philosophical transactions, 29, 58-62. (ver también traducción de este artículo en Meteorol. Colomb., (1): 95-96.
- Hastenrath, S., 1996. Climate dynamics of the tropics. 2ª Ed., Kluwer Acad. Press, Dordrecht, the Netherlands, 488 pp.
- Hellmann, G., (ed.), 1896. Neudrucke von schriften und karten uber meteorologie und erdmagnetismus. No. 6, Berlin, asher & Co.
- Helmholtz, H. 1785. Wirbelsturme und gewitter. (ver traducción al español: Ciclones y tempestades. Meteorol. Colomb. (2):121-130.

- Kalnay, E., M. Kanamitsu & R. Kistler, 1996:** The NCEP/NCAR 40-years reanalysis project. *Bull. Am. Met Soc.*, 77: 437-471.
- Krishnamurti, T. 1979.** Compendium of meteorology, Vol. II, Part 4, Tropical meteorology. World Meteorological Organization, WMO No 364, Geneva, Switzerland, 428 pp.
- Lacoste, Y. 1992.** Atlas 2000, La France et le monde. Nathan. Imprime par Clerc S.A Saint - Amand, Montrond, France, 160 p.
- Neiburger, M., 1960.** The relation of air mass structure to the field of motion over the eastern north pacific Ocean in summer. *Tellus*, 12: 31-40.
- Riehl, H. 1979.** Climate and weather in the tropics. Acad. Press, London New York San Francisco, 611 pp.
- Riehl, H., T.C. Yeh, J.S. Malkus, & N.E. Leseur 1951:** The northeast trades of the pacific Ocean. *Quart Journ. Roy., Met. Soc.* 77: 598-626.
- & J. S. Malkus. 1957.** On the heat balance and maintenance of circulation in the trades. *Quart Journ. Roy., Met. Soc.*, 83, 21-29.
- Sverdrup, H.U. 1917.** 'Der nordatantische passat'. *Veroffentl. chungen Geophys Institut, Universitat Leipzig*, 2(1): 96 pp.
- Teisserenc de Bort, L., & L. Rotch, 1905.** 'Sur les preuves directes del l'existence du contralizé'. *Comptes rendues de l'Académie de Sciences*, 9 de octubre 1905, 605-612.
- US Department of Commerce. NOAA 1938.** Atlas of Climatological charts of the Oceans. US Government Printing Office, Washington D.C.

DISTRIBUCIÓN DE LA BIOMASA PLANCTÓNICA EN LA COSTA PACÍFICA COLOMBIANA ENTRE NOVIEMBRE DE 1997 Y NOVIEMBRE DE 1998

por

María Isabel Criales-Hernandez¹ & Carlos Eduardo Fernández²

Resumen

Criales-Hernández, M.I. & C.E. Fernández: Distribución de la biomasa planctónica en la Costa Pacífica colombiana entre noviembre de 1997 y noviembre de 1998. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **25**(96): 371-380, 2001. ISSN 0370-3908.

Se determinaron las distribuciones de las biomásas fitoplanctónicas en aguas del Pacífico colombiano (Bahía Humboldt a Cabo Manglares) a partir de 120 muestras de plancton, recolectadas en tres cruceros entre noviembre de 1997 y noviembre de 1998. Se elaboraron mapas de las biomásas fitoplanctónicas y se encontró que en noviembre-diciembre de 1997, en la ocurrencia de un evento "El Niño" Oscilación del Sur, las concentraciones fitoplanctónicas en promedio fueron relativamente altas (10.11-19.97 mg/l). La subárea centro se ve favorecida con valores promedios altos de fitoplancton (11.61-20.83 mg/l), quizá debido a las descargas de los ríos que allí desembocan.

Palabras claves: Plancton, biomasa, Pacífico colombiano.

Abstract

The distributions of the plankton biomass in the Colombian Pacific waters (Bahía Humboldt to Cabo Manglares) were determined using 120 plankton samples from three cruises done in November 1997, in June and in November 1998. Maps of the plankton biomass were made; during November-December 1997, when an "El Niño" Southern Oscillation event was occurring, the mean plankton concentrations were relatively high (10.11-19.97 mg/l). The central subarea shows high mean plankton values (11.61-20.83 mg/l), maybe because of the rivers that open there.

Key words: Plankton, biomass, Colombian Pacific.

¹ A.A. 1346, Santa Marta, Colombia, e-mail: maicry@lycos.com

² INVEMAR, A.A. 1016, Santa Marta, Colombia

Introducción

El Pacífico colombiano es una extensa área marina (80000 km² aproximadamente) que hace parte del Panama Bight (**Cantera, 1993**). Se dispone de información básica acerca del fitoplancton de esta región de importancia pesquera; sin embargo, los trabajos sobre el particular son escasos, aislados y limitados a localidades puntuales. Algunas publicaciones registran las abundancias fitoplanctónicas en la parte sur del Pacífico colombiano (**Montealegre & Lasso, 1994; Pineda & Medina, 1996; Medina, 1998; Pineda, 1998**), pero no se encontraron trabajos acerca de la distribución de la biomasa del fitoplancton en el área estudiada. Algunas publicaciones sobre recursos del Pacífico colombiano incluyen datos acerca del zooplancton capturado con redes bongo (**Zapata et al., 1999a**), pero la información no es suficiente para estimar las biomásas zooplanctónicas reales.

Los análisis de la biomasa fitoplanctónica son numerosos en la literatura científica, usualmente estimada a partir de las concentraciones de clorofila *a* (**Jiménez & Bonilla, 1980; Malone et al., 1980; Cole et al., 1986; Lara-Lara & Valdez, 1988; Robles-Jarero & Lara-Lara, 1993**), utilizando datos provenientes de sensores satelitales (**Zuria-Jordan et al., 1995**), por el recuento de células en un volumen determinado (**Peña, 1997; Medina, 1998**), o a partir de pesos húmedos (**Villanueva et al., 1998a y 1998b**). Esta última técnica fue empleada para este estudio, pues cumplía los requerimientos del proyecto de investigación que lo enmarcaba.

En el presente trabajo se estudian las fluctuaciones del plancton como alimento disponible (cantidad), para las especies pelágicas en términos de biomasa planctónica, comparándolas espacial y temporalmente. Estos resultados contribuyeron a la modelación de la dinámica trófica del Pacífico colombiano, objetivo principal del proyecto "El sistema del Pacífico colombiano. Una aproximación a la modelación trófica" del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), llevado a cabo entre noviembre de 1997 y noviembre de 1998.

Área de estudio

El Panama Bight fue definido por **Wooster (1959)** como una parte del Pacífico tropical con fuerte influencia de los vientos del noroeste. El patrón de circulación superficial en la franja tropical del Pacífico americano responde al sistema dominante de vientos, determinado por el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) (**Prahl, 1986; Zapata et al., 1999b**). Toda la cuenca

se caracteriza por presentar aguas superficiales relativamente cálidas (25-26 °C) y de baja salinidad (20-33.5). El régimen de lluvias en el Pacífico colombiano depende de la influencia de las calmas ecuatoriales y de las lluvias del sudeste (**Cantera, 1993**), de modo que al sur el período de lluvias va de enero a marzo y al norte va de abril a septiembre.

El área de estudio corresponde a la franja del Pacífico colombiano hasta 20 mn de distancia de la costa. Dicha región fue dividida, para efectos de este estudio, en tres sectores (zonas según **Cantera, 1993**): norte, el cual incluyó las estaciones ubicadas entre Bahía Humboldt y Cabo Corrientes; centro, con las estaciones localizadas entre Punta Pizarro y Punta Magdalena, y sur, que incluyó las estaciones desde Isla Cajambre hasta Cabo Manglares (Figura 1).

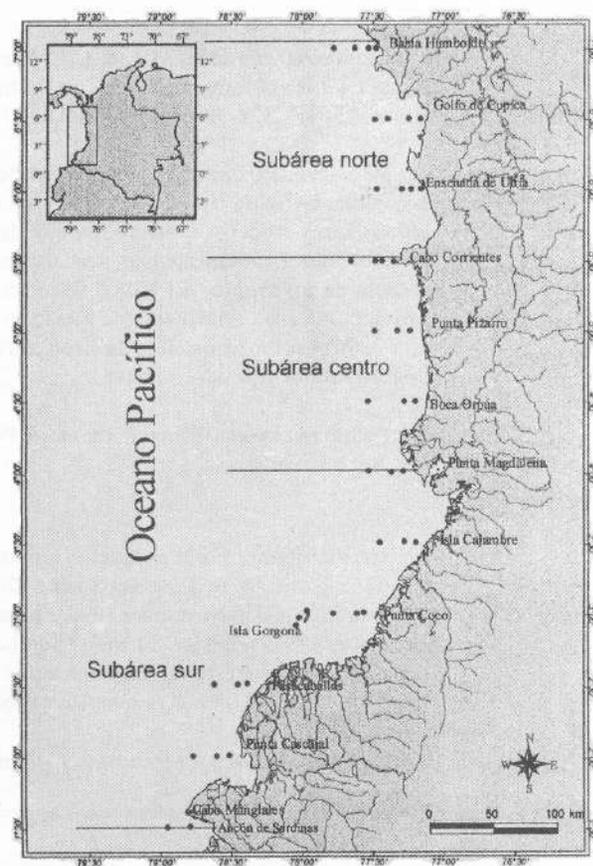


Figura 1. Costa Pacífica colombiana ubicando las estaciones de registro en las tres subáreas.

Tabla 1. Resultados obtenidos durante noviembre-diciembre de 1997, crucero ETP-I, a 50 m de profundidad.

Estación	Subárea	Coordenadas geográficas		Biomasa (mg/l)	Temperatura °C	Salinidad
		Latitud N	Longitud W			
2.1	Norte	7° 00' 10"	77° 44' 15"	8	28.69	31.92
3.1	Norte	6° 59' 48"	77° 49' 58"	34.3	28.63	32.42
4.1	Norte	7° 00' 00"	77° 00' 00"	5.1	28.74	31.78
6.1	Norte	6° 30' 13"	77° 26' 23"	56.7	28.44	32.32
7.1	Norte	6° 30' 00"	77° 31' 04"	19.5	28.82	32.22
9.1	Norte	6° 29' 58"	77° 45' 08"	22.6	28.82	31.91
10.1	Norte	6° 00' 00"	77° 25' 11"	8.2	28.59	32.28
12.1	Norte	6° 00' 08"	77° 30' 08"	18.1	28.75	32.04
14	Norte	6° 00' 00"	77° 45' 00"	9.9	28.58	32.24
17.1	Norte	5° 29' 52"	77° 37' 24"	25	28.71	32.25
20	Norte	5° 29' 52"	77° 45' 00"	14.7	28.58	32.06
21.1	Norte	5° 30' 00"	77° 52' 03"	17.6	28.47	31.83
23.1	Centro	4° 59' 52"	77° 29' 59"	14.6	28.72	31.96
24.1	Centro	5° 00' 19"	77° 34' 59"	2.8	27.83	32.34
26.1	Centro	5° 00' 4"	77° 45' 35"	7.3	28.49	31.98
30.1	Centro	4° 29' 58"	77° 30' 10"	0.3	26.86	32.71
31	Centro	4° 30' 11"	77° 35' 39"	51.4		
33.1	Centro	4° 30' 12"	77° 45' 02"	12.6	28.18	31.96
37	Centro	3° 59' 59"	77° 32' 40"	14.1		
35.1	Centro	4° 00' 00"	77° 37' 49"	11.1	27.47	32.4
36.1	Sur	3° 59' 48"	77° 45' 41"	13.5	27.66	32.78
39.2	Sur	3° 30' 01"	77° 29' 58"	20.5		
41.2	Sur	3° 30' 8"	77° 34' 59"	2.5		
43	Sur	3° 30' 00"	77° 45' 00"	8.6	27.86	32.27
49.1	Sur	2° 59' 00"	77° 49' 00"	13.4		
50	Sur	2° 59' 53"	77° 53' 47"	14.2		
51.1	Sur	3° 00' 10"	77° 59' 37"	4.9	24.95	34.12
60.1	Sur	2° 30' 00"	78° 35' 36"	9.5		
61.1	Sur	2° 29' 47"	78° 40' 37"	4.1	25.42	34.6
62.1	Sur	2° 29' 56"	78° 50' 00"	7.8	25.57	34.56
68.1	Sur	2° 03' 36"	78° 45' 04"	4.8		
69.1	Sur	2° 01' 32"	78° 51' 25"	17.2	25.41	34.6
70.1	Sur	2° 00' 01"	78° 59' 56"	0.8	25.34	34.65
74.1	Sur	1° 30' 16"	79° 04' 17"	8.5	25.41	34.38
76	Sur	1° 29' 53"	79° 15' 02"	11.9	25.32	34.61
77	Sur	1° 30' 06"	79° 30' 02"	22.9	26.96	33.24

Material y métodos

Se efectuaron tres cruceros en el B/O ARC Malpelo entre el 13 de noviembre y el 22 de diciembre de 1997 (ETP-I), entre el primero y el 8 junio de 1998 (ETP-II) y entre el 5 y el 13 de noviembre de 1998 (ETP-III). En cada uno de los cruceros se realizaron 12 cortes entre 1 y 20 mn, que incluyeron un total de 120 estaciones para todo el período de estudio. Por subárea las estaciones se discriminaron así: norte, 12 (ETP-I) y 16 (ETP-II y ETP-III); centro, 9 para los tres cruceros; sur, 15 (ETP-I) y 17 (ETP-II y ETP-III). Para efectos de este trabajo se utilizaron 120

muestras tomadas a 50 m de profundidad en cada una de las estaciones con una botella Niskin de 5 L de capacidad. Las muestras se preservaron con una solución de formol neutralizado al 10% y se filtraron sobre una malla de 55 µm. Se determinaron sus pesos húmedos por un método gravimétrico (Boltovskoy, 1981; Villanueva *et al.*, 1998b) con una balanza analítica Ohaus de 0.001 mg de precisión, estandarizándolos a miligramos sobre litro.

Las muestras recolectadas con botellas Niskin se emplea básicamente para determinar fitoplancton mediante recuento de células o determinación de clorofila. Ade-

Tabla 2. Resultados obtenidos durante junio de 1998, crucero ETP-II, a 50 m de profundidad.

Estación	Subárea	Coordenadas geográficas		Biomasa (mg/l)	Temperatura °C	Salinidad
		Latitud N	Longitud W			
2.2	Norte	6° 59' 58"	77° 41' 58"	2.5	29.33	31.79
2.3	Norte	6° 59' 59"	77° 45' 10"	3.7	28.82	33.18
3.2	Norte	7° 00' 08"	77° 50' 48"	24.6	28.73	33.18
4.2	Norte	7° 00' 03"	77° 59' 58"	17.7	28.49	33.47
5.1	Norte	6° 29' 57"	77° 23' 05"	7.6	28.91	32.94
6.2	Norte	6° 30' 00"	77° 27' 52"	16.2	29.40	32.46
8.1	Norte	6° 30' 00"	77° 37' 00"	7.6	28.94	32.84
9.2	Norte	6° 29' 52"	77° 42' 09"	8.6	28.88	33.06
10.2	Norte	6° 00' 11"	77° 22' 43"	3.1	26.35	34.03
11.1	Norte	6° 00' 02"	77° 26' 57"	13.4	28.03	33.33
12.2	Norte	5° 59' 57"	77° 30' 49"	24	28.31	33.03
13.1	Norte	6° 00' 00"	77° 41' 26"	12.5	29.06	33.00
17.2	Norte	5° 29' 50"	77° 33' 59"	13.9	18.58	34.91
18.1	Norte	5° 29' 56"	77° 38' 58"	4.2	27.40	33.52
19.1	Norte	5° 29' 59"	77° 41' 59"	40.8	27.49	33.64
21.2	Norte	5° 30' 03"	77° 52' 27"	3.5	28.85	33.05
23.2	Centro	4° 59' 55"	77° 27' 08"	0.8	29.46	31.56
24.2	Centro	5° 00' 00"	77° 32' 30"	15.9	19.95	34.83
26.2	Centro	5° 00' 03"	77° 42' 13"	4.7	20.94	34.60
29.1	Centro	4° 30' 00"	77° 25' 04"	5.7	26.50	33.99
30.2	Centro	4° 29' 59"	77° 29' 55"	20.8	19.07	34.69
33.2	Centro	4° 30' 03"	77° 45' 02"	6.8	29.51	31.78
34.1	Centro	4° 00' 11"	77° 30' 13"	23.7	26.12	33.32
35.2	Centro	4° 00' 07"	77° 35' 01"	8.5	20.90	34.30
36.2	Centro	4° 00' 13"	77° 44' 53"	17.6	20.85	34.38
40.1	Sur	3° 30' 28"	77° 24' 58"	6.1	29.51	30.91
39.3	Sur	3° 30' 11"	77° 29' 47"	19.8	20.23	34.29
42.1	Sur	3° 29' 56"	77° 40' 04"	26	17.79	34.77
49.3	Sur	3° 00' 10"	77° 46' 58"	4.9	28.76	32.50
49.4	Sur	3° 00' 00"	77° 49' 50"	11.4	29.27	32.43
51.2	Sur	3° 00' 01"	78° 00' 00"	10.2	17.65	34.84
48.1	Sur	3° 01' 11"	78° 10' 56"	3.1	17.94	34.70
52.1	Sur	2° 58' 21"	78° 14' 11"	16.3	17.05	34.98
53.1	Sur	2° 55' 07"	78° 15' 33"	14.3	18.09	34.63
60.2	Sur	2° 30' 36"	78° 36' 09"	8.5	28.34	32.47
61.2	Sur	2° 30' 14"	78° 40' 07"	4.7	21.36	33.99
62.2	Sur	2° 30' 14"	78° 50' 03"	6.8	29.23	32.57
71.1	Sur	2° 00' 17"	78° 43' 47"	15.2	29.49	31.65
69.2	Sur	2° 00' 00"	78° 48' 59"	13.9	24.90	33.04
70.2	Sur	2° 00' 00"	78° 58' 59"	3.7	18.28	34.94
74.2	Sur	1° 30' 10"	79° 00' 29"	8.2	29.46	32.70
75.1	Sur	1° 29' 56"	77° 10' 14"	9.3	22.85	33.59

más, debido a las necesidades del proyecto, fue indispensable determinar por un método gravimétrico las biomásas planctónicas. Por último, los organismos del zooplancton poseen una alta capacidad para escapar de las botellas, lo cual fue comprobado por observación directa sobre las muestras. Por ello, se optó por adelantar el trabajo como

si se tratase de material de fitoplancton. Se establecieron los promedios de la biomasa fitoplanctónica y se pasaron a gráficas los valores de biomásas sobre un mapa básico, elaborado por el Laboratorio SIG del Programa SINAM del INVEMAR, para cada uno de los cruceros. Los promedios de las concentraciones fitoplanctónicas fueron com-

Tabla 3. Resultados obtenidos durante noviembre de 1998, crucero ETP-III, a 50 m de profundidad.

Estación	Subárea	Coordenadas geográficas		Biomasa (mg/l)	Temperatura °C	Salinidad
		Latitud N	Longitud W			
2.4	Norte	7° 00' 00"	77° 42' 00"	3.28	27.91	26.94
2.5	Norte	7° 00' 00"	77° 44' 36"	3.2	18.75	34.89
3.3	Norte	7° 00' 04"	77° 49' 00"	4.92	22.98	33.60
4.3	Norte	7° 00' 00"	78° 00' 00"	6.12	17.89	35.59
5.2	Norte	6° 30' 00"	77° 22' 30"	5.6		
6.3	Norte	6° 30' 00"	77° 25' 38"	2.92	19.49	35.09
7.2	Norte	6° 30' 00"	77° 30' 00"	9.08	19.14	34.52
8.2	Norte	6° 30' 00"	77° 40' 00"	4.6	17.59	36.41
10.3	Norte	6° 00' 18"	77° 29' 54"	12.72		
11.2	Norte	6° 00' 06"	77° 27' 12"	1.96		
12.3	Norte	5° 59' 56"	77° 31' 01"	1.56	20.47	55.72
13.2	Norte	6° 00' 00"	77° 41' 00"	1.76	18.21	34.99
17.3	Norte	5° 30' 00"	77° 34' 00"	3.84	16.53	35.09
18.2	Norte	5° 30' 00"	77° 34' 24"	2.16	21.78	33.87
19.2	Norte	5° 30' 00"	77° 41' 06"	3.12		
21.3	Norte	5° 30' 00"	77° 52' 18"	3.12		
23.4	Centro	5° 00' 00"	77° 28' 00"	9.56	27.04	29.95
23.5	Centro	5° 00' 00"	77° 30' 00"	9.4	22.12	33.51
25	Centro	5° 00' 33"	77° 38' 43"	1.28	17.28	35.04
29.2	Centro	4° 30' 00"	77° 25' 36"	5.6		
30.3	Centro	4° 30' 00"	77° 30' 42"	4.56	26.99	30.85
32	Centro	4° 30' 12"	77° 40' 18"	139.24	16.03	34.95
34.2	Centro	4° 00' 00"	77° 30' 00"	7.44		
35.3	Centro	4° 00' 00"	77° 35' 02"	8.6		
36.3	Centro	4° 00' 13"	77° 45' 22"	1.76	17.67	35.05
40.2	Sur	3° 30' 00"	77° 27' 00"	1.96	19.44	37.12
39.4	Sur	3° 30' 00"	77° 30' 24"	1.64		
42.2	Sur	3° 30' 00"	77° 40' 00"	1.88	22.92	33.42
49.6	Sur	3° 00' 00"	77° 47' 56"	10.24	27.93	29.31
49.5	Sur	2° 59' 57"	77° 50' 11"	3.6	18.94	11.50
51.3	Sur	3° 00' 11"	77° 59' 35"	8.12	19.96	35.42
48.2	Sur	3° 01' 00"	77° 11' 00"	1.56	27.29	30.46
52.2	Sur	2° 58' 05"	78° 13' 40"	4.04	22.09	33.56
53.2	Sur	2° 54' 00"	78° 15' 00"	7.64	15.22	35.14
60.3	Sur	2° 30' 12"	78° 36' 00"	6.16	16.91	34.83
61.3	Sur	2° 30' 00"	78° 40' 00"	5.52	16.29	34.91
62.3	Sur	2° 30' 00"	78° 50' 00"	23.12	25.27	32.80
71.3	Sur	2° 00' 00"	78° 45' 00"	5.64		
69.3	Sur	2° 00' 00"	78° 49' 55"	1.96	27.04	31.31
70.3	Sur	2° 00' 10"	79° 00' 02"	4.92	14.82	35.32
74.4	Sur	1° 30' 47"	79° 05' 00"	4.88	15.99	34.83
75.2	Sur	1° 30' 03"	79° 10' 03"	5.92	15.93	34.88

parados en nueve tratamientos distintos por medio de un análisis de varianza no paramétrico, la prueba de Kruskal-Wallis (Sokal & Rohlf, 1981). Así mismo, con las variables oceanográficas de temperatura y salinidad a 50m se establecieron las correlaciones no paramétricas por rangos de Spearman (Zar, 1974).

Resultados

Durante el crucero ETP-I la biomasa fitoplanctónica varió entre 0.3 y 56.7 mg/l (Tabla 1, Fig. 2). En el norte se presentó el valor más alto en la estación 6.1, frente al Golfo de Cupica (56.7 mg/l) (Tabla 1 y 4). En el centro las mayo-

res biomazas aparecieron en la estación 31, frente a Boca Orpúa (51.4 mg/l) (Tabla 1 y 4). En el sur los valores fueron relativamente bajos y homogéneos, con un promedio de 10.11 mg/l (desviación estándar 6.54 mg/l) (Tabla 4).

Durante el crucero ETP-II la biomasa varió entre 0.8 y 40.8 mg/l (Tabla 2, Fig. 3). Se presentó en el norte un núcleo de concentración alta de fitoplancton en la estación 19.1, frente a Cabo Corrientes (40.8 mg/l) (Tabla 4, Fig. 3), seguido de dos nodos en las estaciones 34.1 y 42.1, frente a Punta Magdalena e Isla Cajambre en el centro y en el sur respectivamente, con valores máximos de 26.0 mg/l (Tabla 2 y 4, Fig. 3); en todos los casos las estaciones más cercanas a la costa (5-10 mn) presentaron concentraciones relativamente altas. En las demás estaciones meridionales persisten las concentraciones relativamente bajas, con un valor promedio de 10.62 mg/l (desviación estándar 6.92 mg/l) (Tabla 4, Figura 3).

En la estación 32 del crucero ETP-III, frente a Boca Orpúa, en el centro se registró un valor de biomasa de 139.24 mg/l, que corresponde al nodo de concentración fitoplanctónica más alto encontrado en el estudio (Tabla 3). Sin embargo, si se excluye dicho valor, las concentra-

ciones fitoplanctónicas en el último crucero se distribuyeron homogéneamente a lo largo de toda el área de estudio con un valor promedio de 5.35 mg/l (desviación estándar 4.17 mg/l) (Tabla 3, Figura 4).

Por otro lado, en todas las muestras el fitoplancton estuvo conformado por diatomeas, dinoflagelados, silicoflagelados y cistodinoflagelados en proporciones variables de abundancia (**Criales**, datos sin publicar). El análisis de varianza entre los tres cruceros fue estadísticamente significativo ($p = 5.3 \times 10^{-6}$) (Tabla 5); después de las pruebas de comparación se encontró que las biomazas halladas en el crucero ETP-III fueron estadísticamente más bajas que las encontradas en los otros dos cruceros. Sin embargo, las comparaciones entre las tres subáreas y entre las tres distancias no arrojaron resultados estadísticamente significativos ($p > 0.05$). En general, los promedios de las concentraciones fitoplanctónicas fueron más altos en las subáreas norte y centro, con valores que fluctuaron entre 11.61 y 19.97 mg/l (Tabla 4); en la subárea sur, por su parte, los promedios fueron usualmente los más bajos, excepto en el último crucero, cuando sobrepasó los promedios de las otras dos subáreas (Tabla 4).

Tabla 4. Valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar (s.d) de biomasa planctónica, temperatura y salinidad a 50 m de profundidad, entre noviembre de 1997 y noviembre de 1998. El asterisco indica el promedio de la biomasa en la subárea centro durante el crucero ETP-III descartando el valor máximo hallado.

Nov-Dic 1997 (ETP-I)	Norte			Centro			Sur		
	Biomasa (mg/l)	T (°C)	Salinidad	Biomasa (mg/l)	T (°C)	Salinidad (mg/l)	Biomasa	T (°C)	Salinidad
Mínimo	5.10	28.44	31.78	0.30	26.86	31.96	0.30	26.86	31.96
Máximo	56.70	28.82	32.42	51.40	28.72	32.78	22.90	27.86	34.65
Promedio	19.97	28.65	32.11	14.19	27.89	32.30	10.11	25.80	34.11
s.d.	14.23	0.12	0.21	14.86	0.64	0.35	6.54	0.95	0.82
Junio 1998 (ETP-II)									
Mínimo	2.50	18.58	31.79	0.80	19.07	31.56	3.70	17.65	30.91
Máximo	40.80	29.40	34.91	23.70	29.51	34.83	26.00	29.51	34.94
Promedio	12.74	27.85	33.21	11.61	23.70	33.72	10.62	24.79	33.19
s.d.	12.15	0.51	0.26	6.56	3.81	1.15	6.92	4.85	0.98
Noviembre 1998 (ETP-III)									
Mínimo	1.56	7.20	26.94	1.28	16.03	29.95	1.64	14.82	11.50
Máximo	12.72	27.91	36.41	139.24	27.04	35.05	23.12	27.93	37.12
Promedio	4.37	18.99	34.10	*6.02	21.19	33.22	6.15	20.12	32.14
s.d.	2.49	4.97	1.06	3.29	4.53	1.81	6.31	4.46	7.66

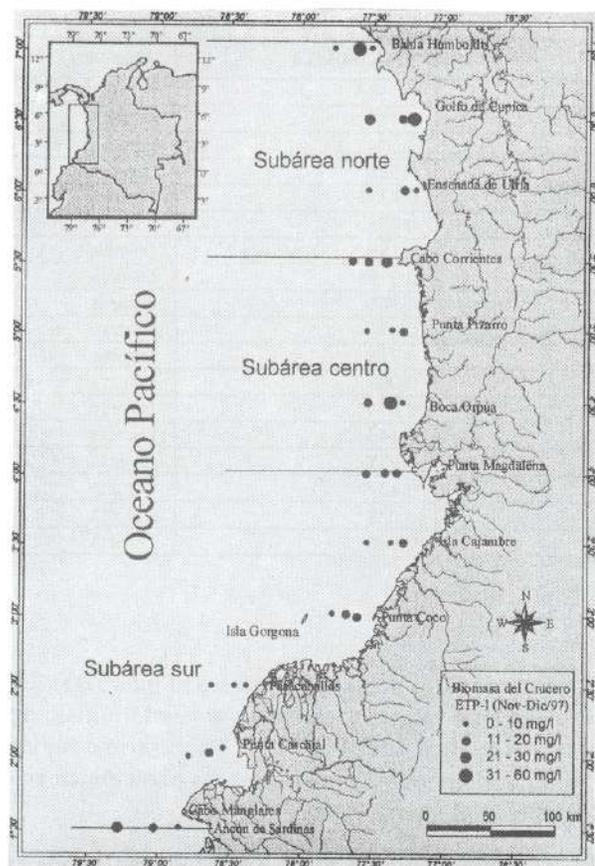


Figura 2. Variación espacial de la biomasa fitoplanctónica (mg/l) en las estaciones de registro durante el crucero ETP-I, noviembre-diciembre de 1997.

Finalmente, varias de las correlaciones arrojaron resultados estadísticamente significativos ($p < 0.05$) (Tabla 6). Por ejemplo, la temperatura se correlacionó directamente con la biomasa en el crucero ETP-I. Por su parte, la

Tabla 5. Resultados de los análisis de varianza no paramétricos (Prueba Kruskal-Wallis) efectuados. Se indica con un asterisco la probabilidad estadísticamente significativa.

Prueba Kruskal-Wallis	Probabilidad
Cruceros	$5.3 \times 10^{-6*}$
Subáreas cruceros	0.93
Subáreas Etp-I	0.063
Subáreas Etp-II	0.73
Subáreas Etp-III	0.38
Distancia a la costa cruceros	0.36
Distancia a la costa Etp-I	0.61
Distancia a la costa Etp-II	0.076
Distancia a la costa Etp-III	0.074

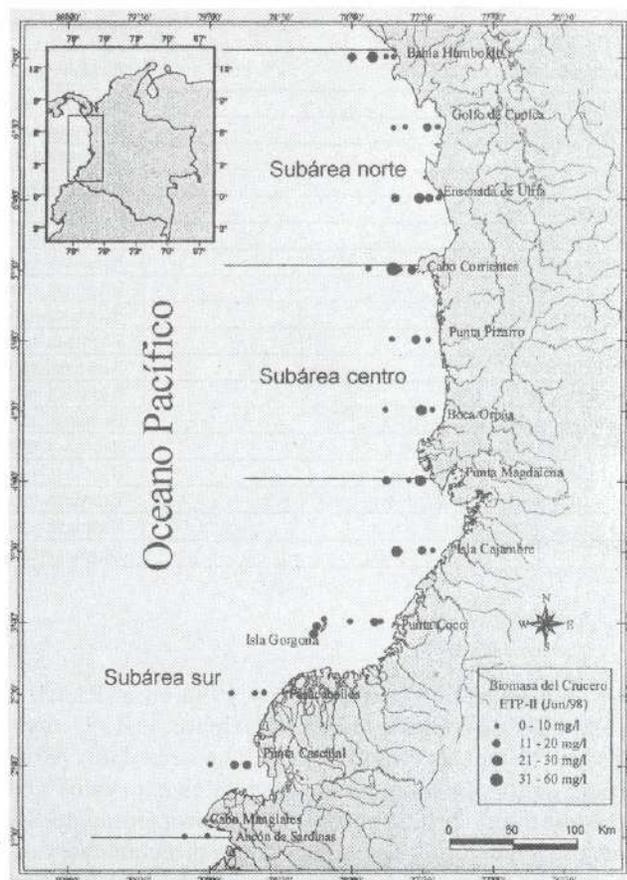


Figura 3. Variación espacial de la biomasa fitoplanctónica (mg/l) en las estaciones de registro durante el crucero ETP-II, junio de 1998.

salinidad mostró correlaciones inversas, estadísticamente significativas con la biomasa en las subáreas norte y sur y a cinco y veinte millas de la costa entre todos los cruceros.

Discusión

Tchanev & Cabrera (1998), generalizando sobre la variación de la temperatura superficial del mar y de la profundidad de la termoclina a lo largo del año en el Pacífico colombiano, plantean que en el mes de marzo la zona de convergencia intertropical (ZCIT) se halla al sur, lo que conlleva a un aumento de la temperatura superficial y a la reducción de la profundidad de la termoclina en el área de estudio. En noviembre, en cambio, la ZCIT se desplaza al norte, lo cual implica la disminución de la temperatura superficial y el aumento de la profundidad de la termoclina. Camacho (1998), por su parte, discute la evolución de los eventos atmosféricos

Tabla 6. Resultados de las correlaciones de Spearman efectuadas. Se indican con un asterisco las probabilidades estadísticamente significativas.

Correlaciones	Parámetros	Probabilidad	Tipo
Crucero ETP-I	Biomasa-salinidad	0.039*	Inversa
Crucero ETP-I	Biomasa-temperatura	0.112	Directa
Crucero ETP-II	Biomasa-salinidad	0.504	Directa
Crucero ETP-II	Biomasa-temperatura	0.526	Inversa
Crucero ETP-III	Biomasa-salinidad	0.037*	Inversa
Crucero ETP-III	Biomasa-temperatura	0.085	Directa
Subárea Norte	Biomasa-salinidad	0.188	Inversa
Subárea Norte	Biomasa-temperatura	0.019*	Directa
Subárea Centro	Biomasa-salinidad	0.145	Directa
Subárea Centro	Biomasa-temperatura	0.076	Inversa
Subárea Sur	Biomasa-salinidad	0.314	Inversa
Subárea Sur	Biomasa-temperatura	0.998	Directa
5 millas de distancia a costa	Biomasa-salinidad	0.034*	Inversa
5 millas de distancia a costa	Biomasa-temperatura	0.143	Directa
10 millas de distancia a costa	Biomasa-salinidad	0.475	Directa
10 millas de distancia a costa	Biomasa-temperatura	0.167	Directa
20 millas de distancia a costa	Biomasa-salinidad	0.028*	Inversa
20 millas de distancia a costa	Biomasa-temperatura	0.200	Directa

cos y oceanográficos entre 1996 y 1998 en el Pacífico colombiano y concluye que en diciembre de 1997 tuvo lugar una "Etapa de Niño Intenso". Nuestros datos parecen coincidir con los patrones generales expuestos por dichos autores, destacándose que los promedios de las biomasa planctónicas se relacionaron directamente con la temperatura durante el crucero ETP-I (Tabla 4); sin embargo, en los otros cruces no se observaron correlaciones significativas entre las biomasa y la temperatura. Nuestros resultados indican que las biomasa promedio fueron más altas cuando El Niño estaba incidiendo en el Pacífico colombiano, en tanto que las biomasa promedio más bajas aparecieron en diciembre de 1998, cuando las temperaturas en promedio tendían a normalizarse con los valores promedios para la región (Cantera, 1993). Abundancias fitoplanctónicas altas (124-232 células/ml) correlacionadas con las temperaturas altas de un Evento "El Niño" fueron halladas también por Medina (1998), quien encontró durante un "año normal" (1994) valores entre 16 y 196 células/ml, considerados relativamente bajos.

Para el caso de la salinidad se registraron correlaciones inversas de significado estadístico con las biomasa en las subáreas norte y sur y a cinco y veinte millas de la costa. El valor biológico de esos resultados no es muy claro, ya que los principales ríos que desembocan al Pacífico colombiano lo hacen en la subárea centro; además, el hecho de no haberse hallado una correlación significativa entre la salinidad y las biomasa de las estaciones si-

tuadas a diez millas de la costa plantea el interrogante de la existencia de tales correlaciones a veinte millas, más lejos de los aportes fluviales. Se hace necesario estudiar a fondo las relaciones salinidad-biomasa planctónica en el Pacífico colombiano.

Una posible explicación de los valores extremos encontrados en algunas de las estaciones puede ser atribuida a la distribución en parche del fitoplancton, la cual se debe a la combinación de factores físicos, químicos y biológicos que afectan a este componente marino (Yentsch, 1981). Otros factores concretos que deben ser considerados son: surgencias, movimientos de masas de agua, mezclas por acción de los vientos, cambios nictimerales, fenómenos asociados con las mareas, distribución en forma de manchas de nutrientes, reproducción diferencial, "pastoreo", entre otros.

Los datos obtenidos son escasos para la extensión del área de estudio, por tanto es difícil cuantificar la validez de las correlaciones y la relación de los datos con las variables oceanográficas. Los nuevos estudios que se haga en la región debería contar con una red de estaciones más amplia, que permita evaluar con mayor detalle los cambios fitoplanctónicos en cada subárea. Este trabajo podría complementarse con la revisión del material mediante el recuento de células, fijar con mayor exactitud el valor de concentración fitoplanctónica en cada estación y determinar la composición del material para la región de estudio.

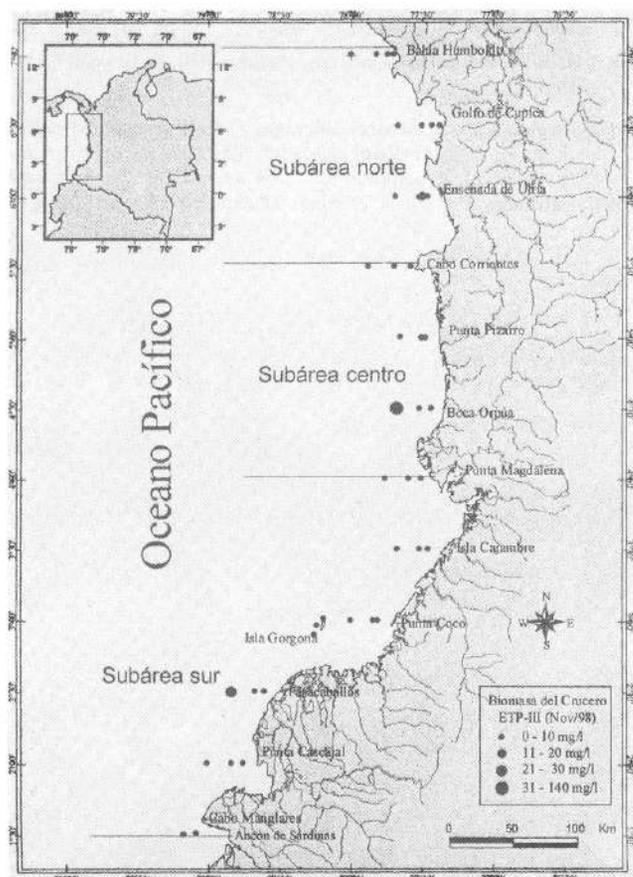


Figura 4. Variación espacial de la biomasa fitoplanctónica (mg/l) en las estaciones de registro durante el crucero ETP-III, noviembre de 1998.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración del INVEMAR y a su Programa Valoración y Aprovechamiento de Recursos. W. Troncoso, F. Parra y J.A. Angulo y A. Acero y M. Wolff por sus aportes y comentarios.

Bibliografía

Boltovskoy, D. 1981. Atlas del zooplancton del Atlántico sur occidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino. I.N.I.D.E.P. Mar del Plata, Argentina.

Camacho, G.A. 1998. Seguimiento a la evolución de los eventos La Niña-El Niño-La Niña durante el período oct/96-oct/98 mediante la variación térmica de las masas de agua en la cuenca del Pacífico colombiano (CPC). Bol. Cient. Centro Control Contam. Pacífico 7: 50-57.

Cantera, J. 1993. Oceanografía: 13-23. En: P. Leyva (Ed.). Colombia Pacífico, Fondo FEN, Bogotá. 872 p.

Cole, B.E., J.E. Cloern & A.E. Alpine. 1986. Biomass and productivity of three phytoplankton size classes in San Francisco Bay. Estuaries 9(2): 117-126.

Jiménez, R. & D. Bonilla. 1980. Composición y distribución de la biomasa del plancton en el frente ecuatorial. Acta Ocean. Pacífico INOCAR 1 (1): 19-64.

Lara-Lara, J.R. & J.E. Valdez Holguín. 1988. Biomasa y productividad primaria del Golfo de California por fracción de tamaños durante primavera de 1984. Ciencias Mar. 14 (1): 1-14.

Malone, T.C., P.J. Neale & D. Boardman. 1980. Influences of estuarine circulation on the distribution and biomass of phytoplankton size fractions: 249-262. En: V.S. Kennedy (Ed.). Estuarine Perspectives. Academic, San Diego.

Medina, L. 1998. Cambios en la composición y abundancia de la comunidad microalgal del Pacífico colombiano, en relación con el evento "El Niño" 97-98. Bol. Cient. Centro Control Contam. Pacífico 7: 58-66.

Montealegre, J.E. & M.I. Lasso. 1994. Características meteorológicas y oceanográficas en la cuenca del Pacífico colombiano durante el período 1991-1993. IX Seminario Cienc. Tecnol. Mar, Medellín, Diskette 1

Peña, V. 1997. Distribución y variación anual de la comunidad fitoplanctónica en la Ensenada de Utría-Pacífico colombiano. Tesis Biol. Mar., Univ. Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. 123 p.

Prahl, H.v. 1986. Notas sobre la geología, climatología, régimen de mareas y oceanografía: 21-26. En H.v. Prahl (Ed.). Isla de Gorgona. Banco Popular, Bogotá.

Pineda, A.R. 1998. La corriente de Cromwell durante el Fenómeno La Niña de 1996 y el Fenómeno El Niño de 1997, sobre la cuenca del Pacífico colombiano. XI Sem. Cienc. Tecnol. Mar CD: 130

Pineda, A.R. & L. Medina. 1996. Comportamiento de las condiciones hidrológicas y biológicas en la región IV zona 3, área costera sur del Pacífico nariñense para el período de 1994-1995. X Sem. Cienc. Tecnol. Mar CD: 138

Robles-Jarero, E.G. & J.R. Lara-Lara. 1993. Phytoplankton biomass and primary productivity by size classes in the Gulf of Tehuantepec. J. Plankton Res. 15 (2): 1341-1358.

Sokal, R. & F. Rohlf. 1981. Biometry principles and procedures of statistics. Mc Graw-Hill, New York. 859 p.

Tchantsev, V. & E. Cabrera. 1998. Algunos aspectos de investigación de la formación del régimen oceanográfico en el Pacífico colombiano. Bol. Cient. Centro Control Contam. Pacífico 7: 7-19.

Villanueva, P., E. Delgado & C. Fernández. 1998a. El fitoplancton superficial durante el crucero de evaluación hidroacústica de recursos pelágicos en el invierno de 1998. Inf. Inst. Mar Perú 141: 43-48.

Villanueva, P., C. Fernández & S. Sánchez. 1998b. Biomasa planctónica como alimento disponible durante el crucero BIC Humboldt y BIC José Olaya Balandra 9808-09 de Paita a Los Palos (Tacna). Inf. Inst. Mar Perú 141: 49-54.

Wooster, W. 1959. Oceanographic observations in the Panama Bight. "Askoy" Expedition, 1941. Bull. Amer. Mus. Nat. Hist. 118 (3): 113-152.

- Yentsch, C.S.** 1981. Phytoplankton growth in the sea, a coalescence of disciplines: 17-32. En: P.G. Falkowski (Ed.). Primary productivity in the sea. Plenum, Nueva York.
- Zapata, L., G. Rodríguez, B. Beltrán, G. Gómez, W. Angulo, A. Gómez, M. Ramírez, J. Morales, M. Hung, J. Herrera & C. Riascos.** 1999a. Prospección de los principales bancos de pesca en el Pacífico colombiano durante noviembre de 1998. Bol. Cient. INPA 6: 111-177.
- Zapata, L., G. Rodríguez, B. Beltrán, G. Gómez, A. Cediél, R. Avila & C. Hernández.** 1999b. Evaluación de recursos demersales por el método de área barrida en el Pacífico colombiano. Bol. Cient. INPA 6: 177-226.
- Zar, J.H.** 1974. Biostatistical analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, EE.UU. 620 p.
- Zuria-Jordan, I.L., S. Alvarez-Borrego, E. Santamaria-del-Angel & F. E. Müller-Karger.** 1995. Estimación de biomasa fitoplanctónica, derivada de datos de satélite, frente a Baja California Sur. Cienc. Marinas 21 (3): 265-280.

JUNTURAS JOSEPHSON BASADAS EN SUPERCONDUCTORES DE ALTA TEMPERATURA

por

Pedro Prieto¹ & Wilson Lopera²

Resumen

Prieto, P. & W. Lopera: Junturas Josephson basadas en superconductores de alta temperatura. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 25(96): 381-394, 2001. ISSN 0370-3908.

La mayor parte de las aplicaciones de la superconductividad en electrónica, están basadas en el efecto *Josephson*. La fabricación de dispositivos Josephson basados en superconductores de alta temperatura (SATC) ofrece altas temperaturas de trabajo y un mayor rendimiento. Sin embargo, las complejas características de estos materiales generan una gran variedad de problemas que se deben sortear para el desarrollo de dispositivos de buena calidad basados en estos compuestos. En este artículo se describen las características principales del efecto Josephson y los diferentes sistemas desarrollados para elaborar junturas Josephson con SATC. Se hace énfasis en las junturas Josephson de frontera de grano mostrando como se logra aumentar el rendimiento de las muestras dopando el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ con plata. Finalmente se describe la elaboración y caracterización de dispositivos tipo escalón, basados en $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ que se comportan como una serie de junturas Josephson apiladas y presentan valores significativamente grandes de la figura de mérito.

Palabras claves: Efecto Josephson, Junturas, Superconductividad, Cupratos, Películas Delgadas Epitaxiales.

Abstract

The electronic applications of superconductivity are based on the *Josephson effect*. The fabrication of Josephson devices based on high temperature superconductors (HT_c) offers high work temperatures and efficiency. Nevertheless, the complex characteristics of these materials show a great variety of problems in the development of high quality devices based on these compounds. In this paper we describe the main features of the Josephson effect and the different developed systems to elaborate Josephson junctions with HT_c. We have focused in *Grain Boundary Josephson Junctions* showing how increase superconducting properties of samples doping $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ with silver. Finally we describe the elaboration and characterization process for *Step Stack Josephson Junctions* based on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ which show large values of the figure of merit.

Key words: Josephson Effect, Junctions, Superconductivity, Cuprates, Epitaxial Thin Films.

1 Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle, A.A. 25360, Cali, Colombia.

2 Grupo de estado Sólido, Instituto de Física, Universidad de Antioquia, A.A. 1226, Medellín, Colombia.

1. Introducción

Desde el descubrimiento de la superconductividad al comienzo de este siglo, los científicos e ingenieros han estado en la búsqueda de aplicaciones para este fenómeno. Dos grandes campos de aplicaciones se pueden distinguir: Aplicaciones de gran escala y de pequeña escala. Las aplicaciones de gran escala están basadas en corrientes superconductoras con resistencia cero, por ejemplo en electroimanes de alto campo o cables delgados que puedan transportar grandes cantidades de corriente. Las aplicaciones de pequeña escala se basan en la fabricación de dispositivos electrónicos superconductores con altas velocidades de conmutación y bajo consumo de potencia, comparados con los dispositivos basados en materiales semiconductores. Las investigaciones en este campo fueron fuertemente incrementadas debido al descubrimiento de los superconductores de alta temperatura crítica (SATC) [Bednorz & Müller 1986], pero rápidamente se encontró que estos materiales cerámicos eran mucho más complicados de trabajar que los superconductores convencionales. Para aplicaciones en electrónica, básicamente dos ingredientes son necesarios: Primero, la posibilidad de crecer películas delgadas superconductoras, metálicas y aislantes basadas en estos materiales con muy alta calidad epitaxial sobre sustratos especiales, y el segundo ingrediente es la utilización de un método de estructuración de las películas confiable.

La unión o juntura Josephson es el elemento clave en la mayor parte de los dispositivos superconductores desarrollados para aplicaciones, y muy pronto después del descubrimiento de los SATC, se realizaron los primeros intentos de fabricación de junturas Josephson basadas en estos cerámicos superconductores usando las fronteras de grano dentro del material. Los SATC de mayor interés para los investigadores son el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) y el $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) debido a que ellos exhiben altas temperaturas de transición al estado superconductor ($T_c \approx 90 \text{ K}$) y ofrecen la posibilidad de ser depositados en forma de película delgada con alta calidad epitaxial a través de diferentes técnicas.

2. Tunelamiento Josephson

El *tunelamiento* es un fenómeno de la mecánica cuántica por medio del cual partículas (como por ejemplo los electrones) penetran barreras de energía potencial. Esto no puede suceder en un modelo de partículas clásicas como

las bolas de billar, pero cuando las partículas son representadas por funciones de onda mecánico cuánticas, es posible para la función de onda existir dentro de la barrera y es posible para la partícula ser encontrada (con probabilidad finita) al otro lado de la barrera [Merzbacher 1961]. Entonces se dice que la partícula ha realizado "tunelamiento" a través de la barrera.

En 1962 el británico Brian D. Josephson predijo teóricamente que los superconductores deberían exhibir un fenómeno similar, donde una corriente superconductoras puede realizar tunelamiento a través de una barrera y continuar fluyendo en otro superconductor al otro lado de la barrera [Josephson 1962], lo cual fue confirmado experimentalmente un tiempo relativamente corto después de su predicción [Anderson & Rowell 1963]. Este fenómeno conocido actualmente como *Efecto Josephson*, se logra experimentalmente fabricando un dispositivo basado en películas delgadas, donde la barrera de potencial es suministrada por un material no-superconductor que es evaporado encima de la superficie de una película superconductoras y luego otra capa superconductoras es evaporada encima de esta barrera. La forma de las curvas características de corriente-voltaje de este dispositivo depende del ancho de la barrera tal como se muestra en la figura 1 [Matisoo 1980]. Si la barrera es muy gruesa a cualquier temperatura (a) no se produce ninguna corriente de tunelamiento electrónico para ningún voltaje. Cuando la barrera es más delgada y el dispositivo se encuentra a una temperatura mayor que la temperatura crítica, T_c , del superconductor (b), entonces aparece una corriente de tunelamiento, y el dispositivo se comporta como un conductor normal, con la corriente variando en proporción directa con el voltaje. Cuando la temperatura del dispositivo comienza a disminuir por debajo de T_c , los electrodos pasan al estado superconductor y los electrones de éstos se organizan en pares, de acuerdo con la teoría BCS [Bardeen, Cooper & Schrieffer 1957] de la superconductividad, los cuales son denominados *pares de Cooper*. Entonces la relación de la corriente de tunelamiento con el voltaje de la unión deja de ser cada vez menos lineal a medida que disminuye la temperatura (c). Para temperaturas muy por debajo de T_c se observa que la corriente de tunelamiento sólo aparece cuando el voltaje en la unión supera un cierto valor. Este valor está directamente relacionado con la brecha de energía Δ , la cual es la energía necesaria que se debe suministrar al superconductor para romper el par de Cooper. Una vez roto el par, los electrones no apareados logran cruzar la barrera por tunelamiento electrónico ordinario, conocido

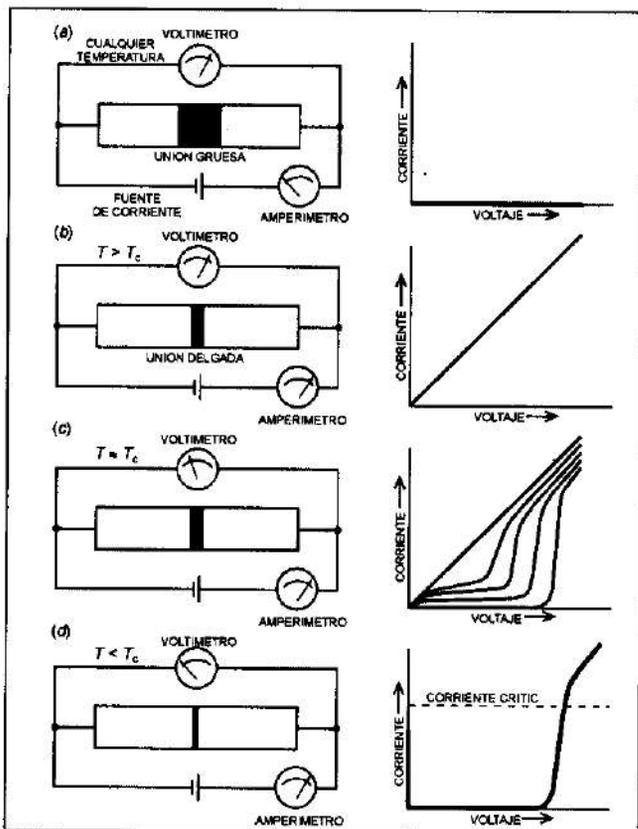


Figura 1. Curvas características I - V en diferentes configuraciones de temperatura y ancho de barrera para una juntura superconductor-aislante-superconductor (SIS) [Matisoo 1980].

en este caso como tunelamiento de cuasipartícula. Finalmente, por debajo de T_c y cuando la barrera es suficientemente delgada ocurre el efecto Josephson (d), en el cual los pares de Cooper logran penetrar la barrera sin romper el par produciéndose entonces una corriente de tunelamiento de pares, la cual es superconductor. Esto significa que esta corriente circula con resistencia cero y por consiguiente no produce ningún voltaje en la unión. La corriente permanece superconductor siempre y cuando no exceda un valor crítico conocido como corriente crítica I_c , por encima de la cual el voltaje salta a un valor diferente de cero y la unión se comporta como una barrera de tunelamiento resistiva. Una unión que presente un comportamiento similar al de la figura 1d se le denomina *Juntura Josephson, JJ*.

Una condición para obtener el efecto Josephson, es que el ancho de la barrera de la juntura sea del orden de la longitud de coherencia, ξ , del superconductor, la cual determina la distancia promedio a la que se encuentran los

dos electrones que forman el par de Cooper. Dependiendo de las propiedades del material de la barrera (aislante o metal normal) se reconocen dos tipos de junturas: superconductor - aislante - superconductor (SIS) y superconductor - normal - superconductor (SNS).

Las dos ecuaciones básicas que describen el efecto Josephson están dadas por:

$$I = I_c \sin \varphi \quad (1)$$

y

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2eV}{\hbar} \quad (2)$$

donde I es la corriente que circula a través de la juntura, I_c es la corriente crítica, V es el voltaje que aparece en la unión, e es la carga del electrón, \hbar es la constante de planck (h) dividida por 2π , y finalmente φ es la diferencia de fase ($\theta_2 - \theta_1$) de la función de onda, $\psi(r, \theta)$, que describe, según la mecánica cuántica, el estado superconductor en ambos lados de la barrera

La ecuación (1) describe que una corriente finita puede fluir a través de la barrera sin que aparezca un voltaje en la unión, a lo que se conoce como el *Efecto Josephson d.c.* Por otra lado, cuando un voltaje d.c. es aplicado, la integración de la ecuación (2) muestra que el argumento de la función seno en (1) se convierte en $\varphi = \varphi_0 + (2e/\hbar)Vt$ y por lo tanto se genera una supercorriente oscilante:

$$I = I_c \sin \left(\varphi_0 + \frac{2e}{\hbar} Vt \right) \quad (3)$$

con una frecuencia de Josephson ν_j , dada por: $\nu_j = (2e/h)V$. Estas oscilaciones producen emisión de radiación electromagnética con la misma frecuencia. El comportamiento descrito por (2) y (3) es conocido como *Efecto Josephson a.c.* y fue observado por primera vez en 1963 [Shapiro 1963]. Posteriores experimentos confirmaron que un voltaje d.c. de $1 \mu V$ a través de una juntura Josephson produce una corriente oscilante con una frecuencia de 483.6 MHz como predice la ecuación (3) [Finnegan et al. 1971].

Una curva característica típica de corriente-voltaje para una juntura Josephson tipo SIS es mostrada en la figura 2. Se puede observar que la curva tiene un comportamiento claramente histerético.

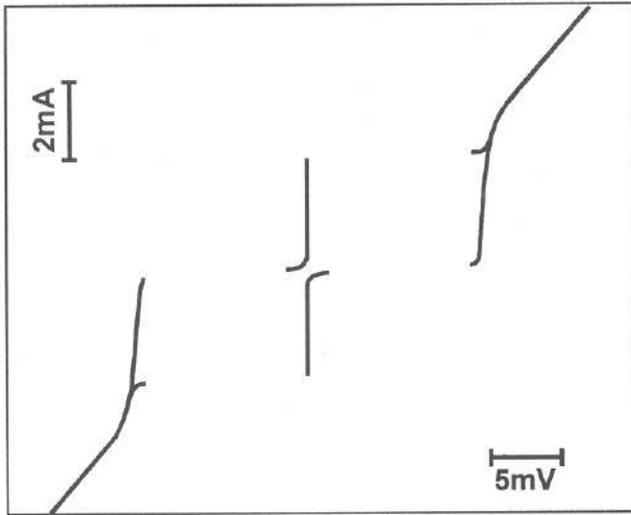


Figura 2. Curva característica típica de corriente-voltaje para una juntura Josephson tipo SIS de Sn-Sn_xO_y-Sn a $T = 1.52$ K [Barone & Paternò 1982].

3. Modelo RCSJ

El efecto Josephson no solamente se obtiene en junturas planares tipo SIS o SNS como las que hemos mencionado, sino que se puede presentar en cualquier tipo de configuración en la que dos superconductores se encuentren acoplados débilmente. Un ejemplo de esto es la juntura tipo constricción que aparece en la figura 3, en la que dos electrodos superconductores se encuentran conectados a través de un micropuente del mismo material. Al circular una corriente lo suficientemente grande, afectará las propiedades superconductoras del micropuente sin perturbar los electrodos, entonces se dice que existe un enlace débil (weak link) entre los electrodos superconductores.

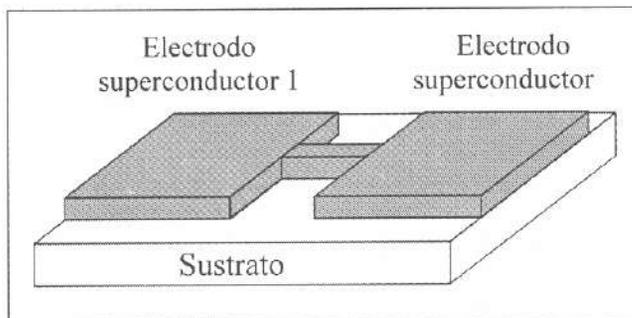


Figura 3. Película delgada superconductora con una constricción. Esta presenta un comportamiento de juntura de enlace débil (weak link).

Una de las medidas más importantes de una juntura es su curva característica de corriente-voltaje (curva $I-V$) ya que la forma de la curva depende del tipo de juntura que se esté estudiando. Las junturas SIS tienen un comportamiento marcadamente histerético como se observa en la figura 2, mientras que las junturas SNS o las de enlace débil son generalmente monovaluadas, al menos para temperaturas no muy lejos de T_c , tal como se muestra en la figura 4.

Las ecuaciones (1) y (2) se aplican para el caso ideal en el cual toda la corriente es suministrada por pares de Cooper. En el caso más general pueden haber otros tipos de corriente fluyendo. Las diferencias en las curvas $I-V$ de las distintas junturas de enlace débil no son completamente inherentes a la naturaleza física diferente de estas estructuras, y muchas de las características de las curvas $I-V$ en los "weak links" pueden ser modelados en términos de un circuito simple en el cual la capacitancia distribuida y la conductancia de cuasipartícula del dispositivo son consideradas como elementos en paralelo con una juntura Josephson ideal [McCumber 1968]. Este modelo conocido como "Resistively and Capacitively Shunted Junction Model" (modelo RCSJ) supone que una juntura Josephson real está siempre intrínsecamente conectada por una resistencia R_n , y una capacitancia C , tal como se observa en la figura 5. Introduciendo estos dos términos a la ecuación (1) se obtiene:

$$I = I_c \sin \varphi + \frac{V}{R_n} + C \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

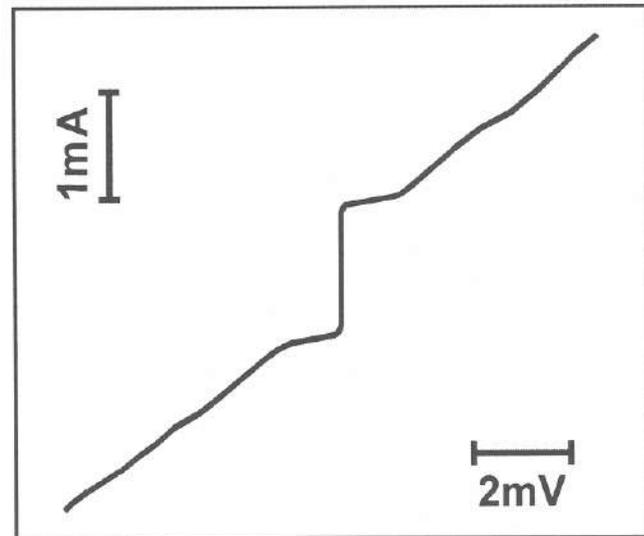


Figura 4. Curva característica $I-V$ de una juntura tipo enlace débil (weak link) elaborada con un puente de aluminio [Barone & Paternò 1982].

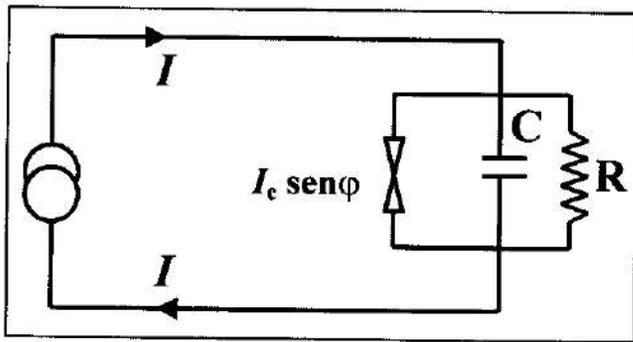


Figura 5. Circuito equivalente de una juntura Josephson real, según el modelo RCSJ, en el cual, un elemento Josephson ideal se encuentra en paralelo con una capacitancia y una resistencia. El circuito es alimentado por una fuente de corriente d.c. mostrada a la izquierda.

Para el caso particular en que los efectos capacitivos son despreciables ($C \approx 0$) la ecuación (4) se puede solucionar exactamente obteniéndose el denominado *modelo RSJ*:

$$V = \pm I_c R_n \sqrt{\left(\frac{I}{I_c}\right)^2 - 1} \quad \text{para } |I| > I_c \quad (5a)$$

$$V = 0 \quad \text{para } |I| < I_c \quad (5b)$$

$$V = IR_n \quad \text{para } |I| \gg I_c \quad (5c)$$

El comportamiento gráfico de esta ecuación se observa en la figura 6. Cuando la corriente que circula la juntura tiene un valor menor a I_c , no existe voltaje en la unión. Para corrientes mayores a I_c , aparece un voltaje determinado por la ecuación (5a), el cual tiende a la expresión IR_n , para valores muy grandes de corriente. Entonces podemos observar que R_n es el valor de la resistencia de la juntura en el estado normal.

4. Dependencia con la radiación de Microondas y el campo magnético

Una de las evidencias experimentales de la presencia del efecto Josephson en una juntura, es observar el comportamiento de las curvas $I-V$ cuando la muestra es irradiada con microondas. Con la radiación se crea una interacción entre la corriente Josephson a.c. y la señal de microonda externa, lo cual produce la aparición de unos saltos de corriente espaciados por un valor de voltaje constante, y que forma una especie de escalones en las curvas $I-V$ denominados *escalones de Shapiro* o "*Shapiro steps*" [Shapiro et al. 1964]. En la figura 7 se puede

observar como se modifica la forma de la curva $I-V$ de una juntura Josephson cuando es irradiada con microondas de 35 GHz de frecuencia, con la aparición de los escalones de Shapiro.

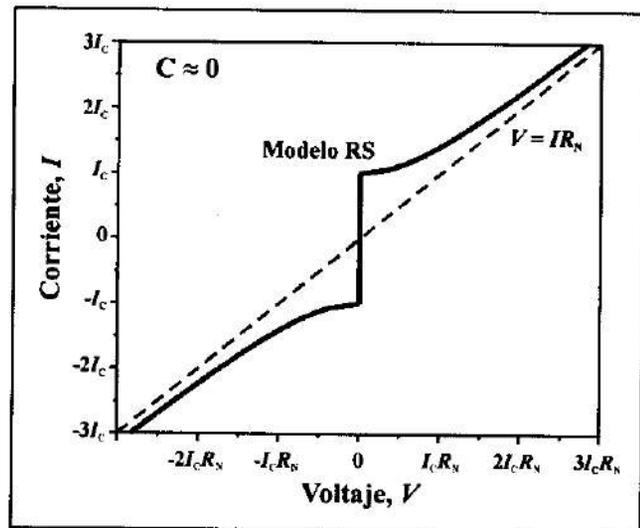


Figura 6. Curva característica de corriente-voltaje para el circuito Josephson de la figura 5 cuando $C \approx 0$ (Modelo RSJ). La línea punteada representa la curva correspondiente al comportamiento lineal: $V = IR_n$, donde R_n constituye la resistencia de la juntura en el estado normal.

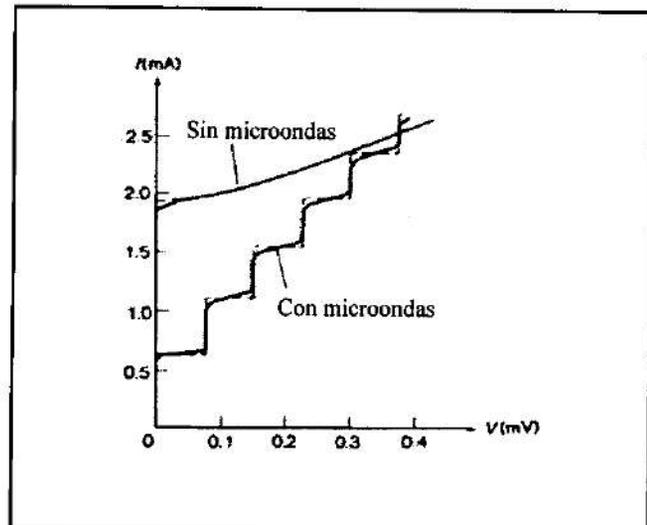


Figura 7. Aparición de los escalones de Shapiro en la curva característica de corriente-voltaje de una juntura Josephson tipo punto de contacto por la presencia de radiación de microondas de 35 GHz de frecuencia

Los escalones de Shapiro ocurren a valores discretos de voltaje V_n , dados por:

$$V_n = \frac{nh}{2e} f \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (6)$$

donde f es la frecuencia de la radiación de microonda aplicada. Para una juntura SIS es fácil de entender como aparece esta contribución a la corriente d.c. Cuando el voltaje d.c. a través de la juntura es igual a V_n , hay una diferencia de energía de $2eV_n$ entre los pares de Cooper a cada lado de la barrera. Cuando la radiación externa está presente, los procesos de tunelamiento de pares sólo son posibles cuando un par absorbe o radia n fotones de frecuencia f . La máxima probabilidad para este proceso se obtiene cuando la relación (6) se cumple. Una frecuencia de radiación típica de 10 GHz produce escalones separados por 20 μ V.

Otra característica que permite evaluar la presencia del efecto Josephson en una juntura es la dependencia de la corriente crítica con el campo magnético, $I_c(B)$. Cuando un campo magnético B , es aplicado sobre una juntura Josephson, la corriente crítica de la juntura modula con la variación de campo magnético a través de la siguiente expresión:

$$I_c(B) = I_c(0) \left| \frac{\text{sen } \pi (\Phi_B / \Phi_0)}{\pi (\Phi_B / \Phi_0)} \right| \quad (7)$$

donde $I_c(0)$ es la corriente crítica sin presencia de campo, Φ_B es el flujo de campo magnético que atraviesa la juntura, y Φ_0 es una constante fundamental denominada *cuanto de flujo magnético*, $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb.

La ecuación (7) es idéntica al patrón de difracción que forman las ondas de luz cuando pasan a través de una pequeña rendija, y que se denomina *patrón de Fraunhofer*. Un patrón de Fraunhofer típico obtenido experimentalmente se puede observar en la figura 8 [Balsamo et al. 1976].

5. Junturas Josephson en SATC

Con el descubrimiento de los superconductores de alta temperatura crítica (SATC) empezó un gran interés en la realización de junturas Josephson basados en estos nuevos óxido, para su aplicación en la crioelectrónica. Tener valores más altos de T_c da la posibilidad de obtener

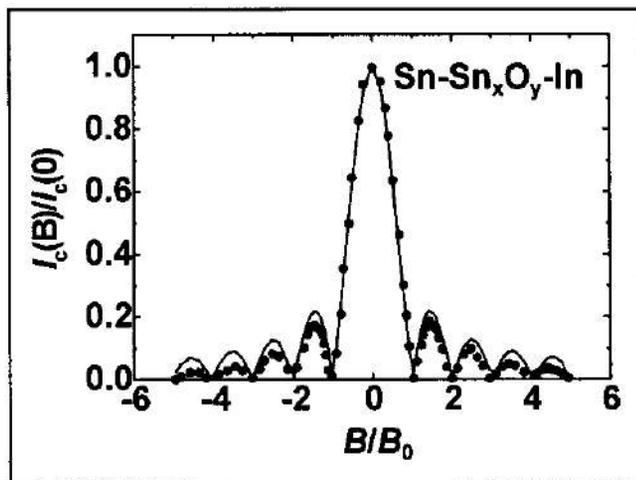


Figura 8. Patrón de Fraunhofer que experimenta la corriente crítica en función del campo magnético de una juntura de Sn-Sn_xO_y-In. Los círculos son los datos experimentales y la línea sólida es la curva teórica según la ecuación 7 [Balsamo et al. 1976].

temperaturas de trabajo más altas en los dispositivos realizados con estos materiales pudiéndolos refrigerar con nitrógeno líquido (alrededor de 77 K) en lugar de helio (4.2 K). Además con estas altas temperaturas era posible pensar en la realización de circuitos híbridos conteniendo dispositivos superconductores y semiconductores. Los altos valores de T_c están también conectados con una brecha de energía, Δ , más grande y un voltaje característico de las junturas Josephson, $V_c = I_c R_n$, más alto. Este voltaje característico es de suma importancia ya que se constituye en la figura de mérito de una juntura Josephson, debido a que es independiente de la geometría y las dimensiones de éstas, y además a que está directamente relacionado con las velocidades de conmutación de los dispositivos y las resoluciones de campo magnético de los SQUIDS (Superconducting Quantum Interference Devices) fabricados con las junturas. Estos SQUIDS se basan en una espira superconductora conectada por una o dos junturas Josephson en paralelo, y son los detectores de campo magnético más sensibles que existen [Clarke 1994], con muchas aplicaciones, entre las cuales se destacan la magnetoencefalografía y la magnetocardiografía, utilizadas para el diagnóstico de tumores cerebrales y enfermedades del corazón respectivamente. Así entonces, el aumento de T_c debe conducir a frecuencias características más altas, mayores velocidades de conmutación y mejor resolución de flujo de campo magnético en los SQUIDS desarrollados con estos materiales. Por otro lado los SATC presentan una fuerte anisotropía con respecto a la orientación cristalográfica y muy pequeñas longitudes de coherencia,

por debajo de 1 nm. Esto hace que los conceptos tradicionales para dispositivos Josephson tales como las junturas planares SIS estándar de la crioelectrónica de baja temperatura sean difíciles de realizar con SATC, ya que esto significa el crecimiento de multicapas basadas en películas delgadas de alta calidad epitaxial y barreras aislantes con un espesor menor a 10 Å. Otros problemas aparecen por la dinámica de vórtices en estos superconductores tipo II extremos.

Para sortear las dificultades estructurales de los SATC, los cuales tienen una estructura en forma de capas, una gran variedad de diferentes geometrías de juntura fueron desarrolladas de tal forma que el acoplamiento tome lugar a lo largo del plano a - b donde la longitud de coherencia es mayor. En la figura 9 se muestran los principales tipos de junturas desarrolladas. Un número de variaciones a los conceptos presentados han sido usados, pero ellos pueden ser resumidos bajo unos pocos principios.

Las primeras junturas con SATC se realizaron sobre las fronteras de grano presentes en forma natural dentro de las películas. Pequeños micropuentes estructurados sobre la película son atravesados con una cierta probabilidad por una de estas fronteras de grano, exhibiendo un comportamiento de enlace débil (a). Sin embargo este tipo de junturas dejaron de implementarse rápidamente debido a la amplia dispersión de sus propiedades. Un paso adelante a una juntura más controlada se logró usando fronteras de grano definidas artificialmente, las cuales pueden ser creadas utilizando sustratos bicristalinos (b) o usando una capa intermedia (c) para producir diferentes orientaciones de crecimiento en las películas crecidas sobre éstos, ubicando una frontera de grano en el centro de la película. Un escalón fabricado artificialmente sobre el sustrato crea una serie de dos fronteras de grano sobre las películas (d). Las propiedades de estas junturas dependen de la calidad cristalina en la frontera de grano así como del ángulo entre los granos de los electrodos. Su ventaja es el rápido procedimiento de preparación.

El comportamiento de enlace débil es también implementado modificando artificialmente las propiedades del superconductor en un micropunto, por ejemplo haciéndole incidir un haz de iones o de electrones (e).

Las junturas tipo SXS usan un material de barrera entre los electrodos superconductores para desarrollar un comportamiento de tunelamiento o de enlace débil. El material de barrera puede ser un aislante (SIS),

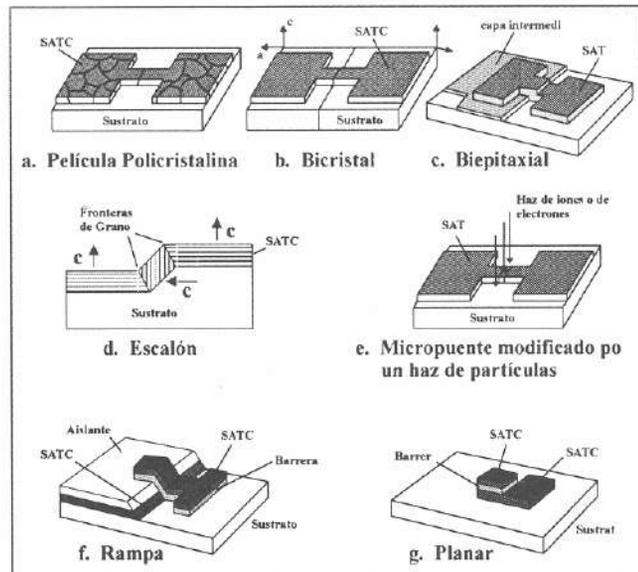


Figura 9. Diferentes tipos de fabricación de junturas Josephson con superconductores de alta temperatura crítica.

semiconductor (SSeS) o un conductor normal (SNS). Incluso superconductores con una T_c reducida con respecto a los electrodos son usados (SS'S). Una de las junturas tipo SNS o SIS más estudiadas es la juntura tipo rampa (f). Después de la deposición de las primeras dos capas de superconductor y aislante, un proceso de erosión (etching) fabrica un escalón en forma de rampa sobre la bicapa. Finalmente son depositados la barrera y el segundo electrodo superconductor [Faley & Poppe *et al.* 1994]. Usando este tipo de junturas una amplia variedad de materiales de barrera han sido estudiados. Este tipo de junturas al lado de las bicristalinas son las más desarrolladas y en muchos casos el punto de inicio para el desarrollo de dispositivos con aplicaciones en la electrónica superconductora.

Las junturas tipo planar, también conocidas como tipo "sandwich" o tricapa, involucran el concepto de una configuración de apilamiento (g). Este tipo de junturas es el más usado con superconductores convencionales de baja temperatura y la ventaja de éstas consiste en que la multicapa puede ser crecida *in situ*, es decir, sin necesidad de romper el vacío durante el proceso. Esto evita cualquier contaminación en las interfaces entre los electrodos superconductores y la barrera.

Como se mencionó anteriormente, el valor del voltaje característico $V_c = I_c R_n$ o producto $I_c R_n$ de una juntura

Josephson, es un parámetro muy importante relacionado con la brecha de energía, tiempos de conmutación y resolución de flujo de campo magnético en los SQUIDS, y es usado para comparar los diferentes tipos de juntura. En la tabla 1 se lista los productos $I_c R_n$ y temperaturas críticas de diferentes tipos de juntas Josephson de alta temperatura.

6. Juntas Josephson en bicristales

Una de las técnicas más utilizadas para fabricar juntas Josephson de frontera de grano (Grain Boundary Junctions, GBJ) consiste en el crecimiento epitaxial de películas superconductoras de alta temperatura crítica sobre un sustrato bicristalino. Un bicristal consiste de dos piezas fundidas de un monocristal, como el SrTiO_3 , con un ángulo de desorientación relativa entre los ejes cristalográficos. Las películas de SATC elaboradas sobre este tipo de sustratos, crecen con el eje c perpendicular a la superficie del sustrato pero con el mismo ángulo de desorientación del plano $a-b$ a lado y lado de la frontera de grano creada por el bicristal. En la figura 10 se muestra la curva característica $I-V$ de una junta bicristalina de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-\delta}$ de 10 μm de ancho y con un ángulo de desorientación de 24° [Lopera *et al.* 2000]. La curva tiene un típico comportamiento de acuerdo con el modelo RSJ con un valor del producto $I_c R_n$ alrededor de 2 mV a una temperatura de 4.2 K. Al hacer incidir una señal de

microondas con una frecuencia de 8.26 GHz aparecen los escalones de Shapiro en valores fijos de voltaje. La separación entre los escalones es de 17 μV , lo cual está de acuerdo con el valor predicho por la teoría de Josephson: $h f / 2e$, según la ecuación (6).

Como se mencionó anteriormente una de las aplicaciones de las juntas Josephson consiste en la elaboración de SQUIDS. Un SQUID d. c. contiene un par de juntas Josephson en paralelo dentro de un circuito (loop) de corriente superconductor. Este tipo de disposición de las juntas se ha logrado diseñar con películas epitaxiales de SATC crecidas y fotolitografiadas sobre sustratos bicristalinos de SrTiO_3 , [Vivas *et al.* 2000]. En la figura 11 se muestra las curvas características $I-V$ para un circuito superconductor depositado sobre un sustrato bicristalino de SrTiO_3 , con un ángulo de desorientación a temperaturas entre 20 y 50 K. Las curvas presentan un claro comportamiento RSJ como se puede observar en el inserto superior de la figura. En el inserto inferior se muestra la geometría del diseño realizado sobre la película para obtener la configuración de dos GBJs en paralelo dentro de un "loop" superconductor. El efecto de una irradiación con microondas de 6.94 GHz de frecuencia en este dispositivo se presenta en la figura 12. Claramente se observa la presencia de los escalones de Shapiro indicando que el efecto Josephson a.c. se encuentra presente en las juntas que componen el "loop"

Tipo de junta	material	T = 4.2 K	$I_c R_n$ T = 77K	T_c [K]
Película policristalina	YBCO	30 μV - 3 mV	1 - 200 μV	79
Junta Bicristalina	YBCO	0.2 - 8 mV	0.1 - 0.2 mV	90
Junta Biepitaxial	YBCO	0.1 - 1 mV	1 - 10 μV	80
Junta tipo escalón	YBCO	0.3 - 5 mV	30 - 500 μV	82
	TBCCO		5 mV	
Junta tipo rampa con barrera	YBCO	1 - 8 mV	160 μV	80
Junta tipo planar con barrera	YBCO	170 μV		28
	BSCCO	500 μV		30
Puente S-N-S con escalón (Ag, Au)	YBCO	0.2 - 2 mV	10 - 150 μV	85
Puente S-N-S (Ag)	YBCO	1 mV	200 μV (46 K)	75
Puente modificado por haz	YBCO	1 mV	40 μV (66.2K)	82

Tabla 1. Valores del producto $I_c R_n$ y de la temperatura crítica, T_c , obtenidos experimentalmente para diferentes tipos de juntas Josephson de alta

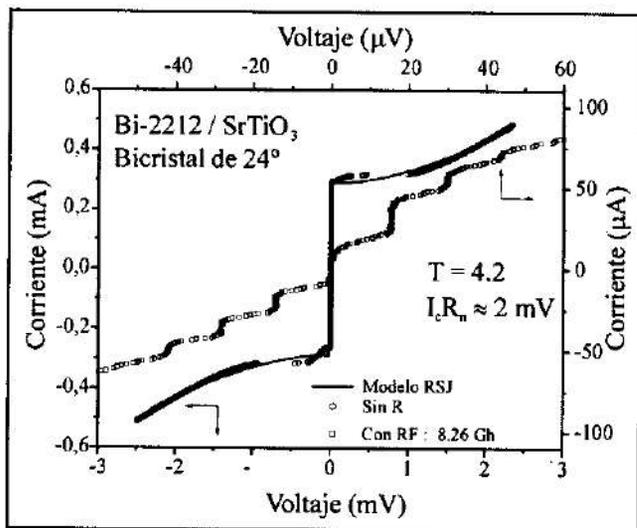


Figura 10. Curva I - V de una juntura tipo Bicristal de Bi-2212 a 4.2 K. Los círculos corresponden a los datos experimentales sin irradiación de microonda. La línea sólida representa el ajuste teórico con el modelo RSJ. Finalmente, los cuadrados corresponden a las medidas de la curva I - V bajo irradiación de microonda de 8.26 GHz de frecuencia [Lopera *et al.* 2000].

superconductor.

Las características de las GBJs puede ser perfeccionado usando películas delgadas epitaxiales con valores de la corriente crítica por encima de 10^6 A/cm² a 77 K. Esto se ha logrado mejorar en películas delgadas de YBCO dopadas con plata [Bolaños *et al.* 1997], las cuales muestran una mejor microestructura con el incremento

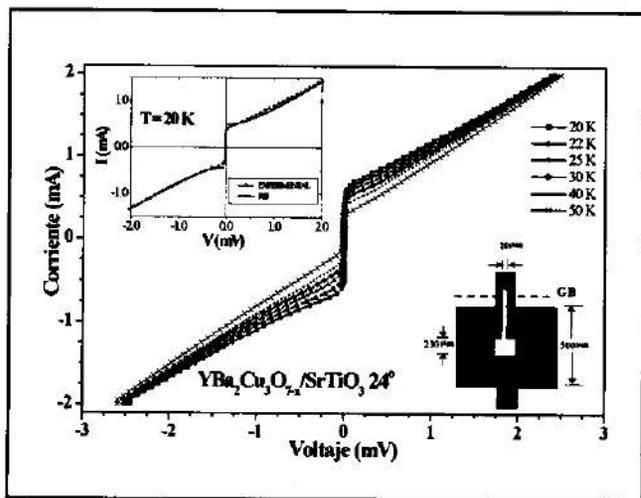


Figura 11. Curvas I - V de un "loop" superconductor con dos junturas Josephson tipo bicristal en paralelo a diferentes temperaturas [Vivas *et al.* 2000].

del tamaño de grano, una mayor orientación del grano y fases sin impurezas en la frontera de grano. La figura 13 muestra como varía la densidad de corriente crítica J_c , a medida que aumenta el dopaje con plata desde 0 % hasta 15 %. Se observa como J_c obtiene un valor máximo para un nivel de dopaje con plata del 5 % [Bolaños *et al.* 2000]. El producto $I_c R_n$ obtenido para este valor óptimo de dopaje mejora en un 58 % aproximadamente con respecto a una muestra sin dopar tal como se observa en la figura 14.

En la figura 15 se observa que tanto las GBJs dopadas con plata como las muestras sin dopar presentan una modulación de la corriente crítica con el campo magnético siguiendo un claro patrón de Fraunhofer. Esto indica que la homogeneidad de J_c a lo largo de la frontera de grano es buena a una escala de micras. Además la simetría del patrón alrededor del campo cero, $B = 0$, indica que no hay anclaje de flujo magnético en la vecindad de la frontera de grano.

7. Efecto Josephson intrínseco

En 1992 se descubrió que el $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_3\text{O}_{8-\delta}$ (Bi-2212) se comporta como una serie de junturas Josephson tipo SIS o SNS apiladas una sobre otra [Kleiner *et al.* 1992]. A este fenómeno que posteriormente se descubrió en otros SATC altamente anisotrópicos se le denominó *Efecto Josephson Intrínseco*. Para entender este fenómeno recordemos que en los SATC se puede asumir que los pares de Cooper están concentrados en los planos de

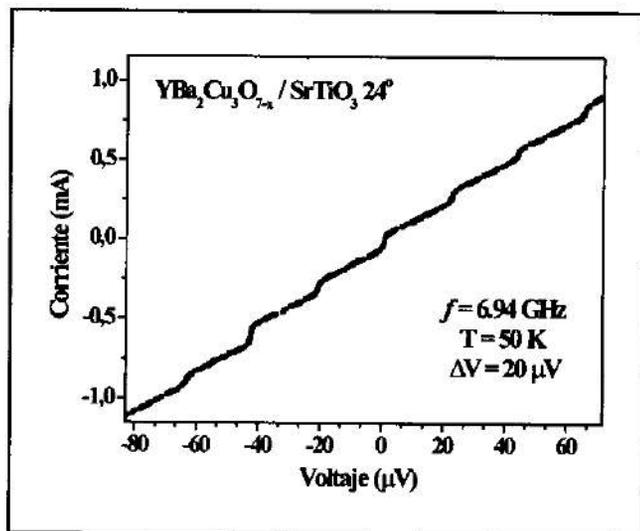


Figura 12. Curva característica de corriente-voltaje (I - V) del "loop" de la figura 11 bajo irradiación con microondas de 6.94 GHz de frecuencia a una temperatura de 50 K [Vivas *et al.* 2000].

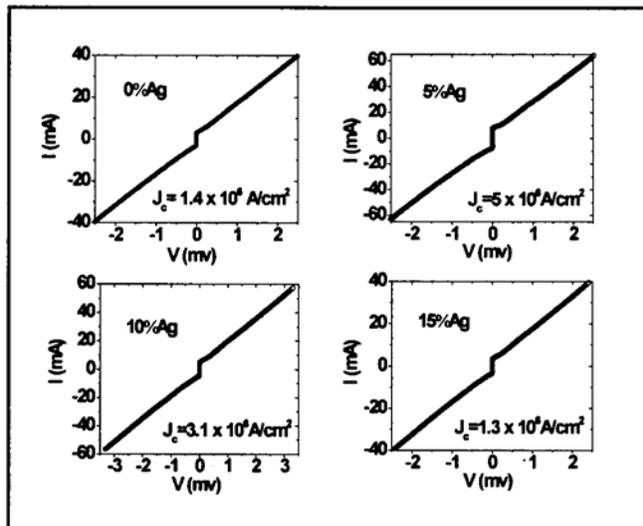


Figura 13. Determinación de la densidad de corriente crítica, J_c , para juntas bicristalinas de YBCO dopadas con diferentes porcentajes de plata (Ag). Se observa que J_c es máximo para un nivel de dopaje del 5 %.

CuO_2 . En los materiales más anisotrópicos como el Bi-2212 , el cual contiene capas dobles de CuO_2 separadas por capas de Bi_2O_3 y SrO , las densidades de corriente crítica a lo largo de los planos de CuO_2 (la dirección a - b) son al menos dos órdenes de magnitud mayores que aquellos perpendiculares a las capas (la dirección c). La relación de anisotropía de las profundidades de penetración del campo magnético, $\gamma = \lambda_{ab}/\lambda_c$, puede ser mayor a 1000. La longitud de coherencia a lo largo del eje c , ξ_c , es menor que 1 Å, es

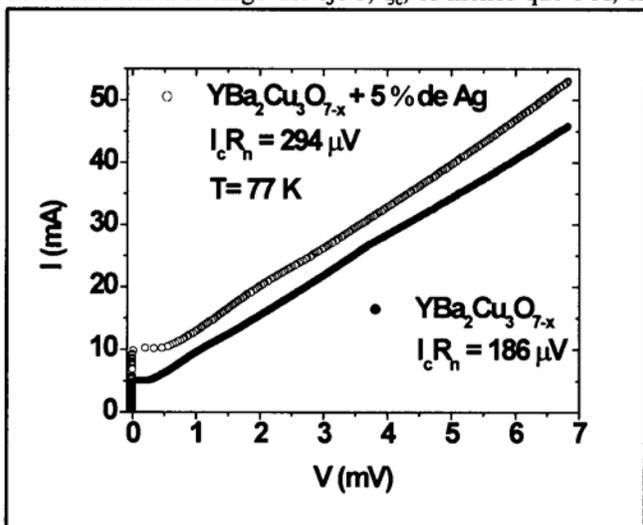


Figura 14. Determinación del producto $I_c R_n$ de una junta bicristalina de YBCO no dopada, y dopada al 5 % en peso con plata a 77 K. Se observa un aumento de la figura de mérito del 58 % en la muestra dopada con respecto a la no dopada [Bolaños *et al.* 2000].

decir, más de 10 veces menor que la distancia entre dos capas dobles de CuO_2 adyacentes. Por lo tanto se puede asumir que las capas dobles de CuO_2 actúan como electrodos superconductores de 3 Å de espesor separados por capas aislantes, semiconductoras o metálicas normales (dependiendo de la distribución del oxígeno en las capas de Bi_2O_3 y SrO) que actúan como barreras de 12 Å de espesor. Entonces desde ese punto de vista, una película delgada de 300 nm de espesor está compuesta de una serie de 200 juntas SIS o SNS acopladas por el efecto Josephson.

El estudio del efecto Josephson intrínseco en películas delgadas ofrece la posibilidad de fabricar dispositivos que utilicen este efecto y sean incluidos dentro de la tecnología de los circuitos integrados. El interés en este tipo

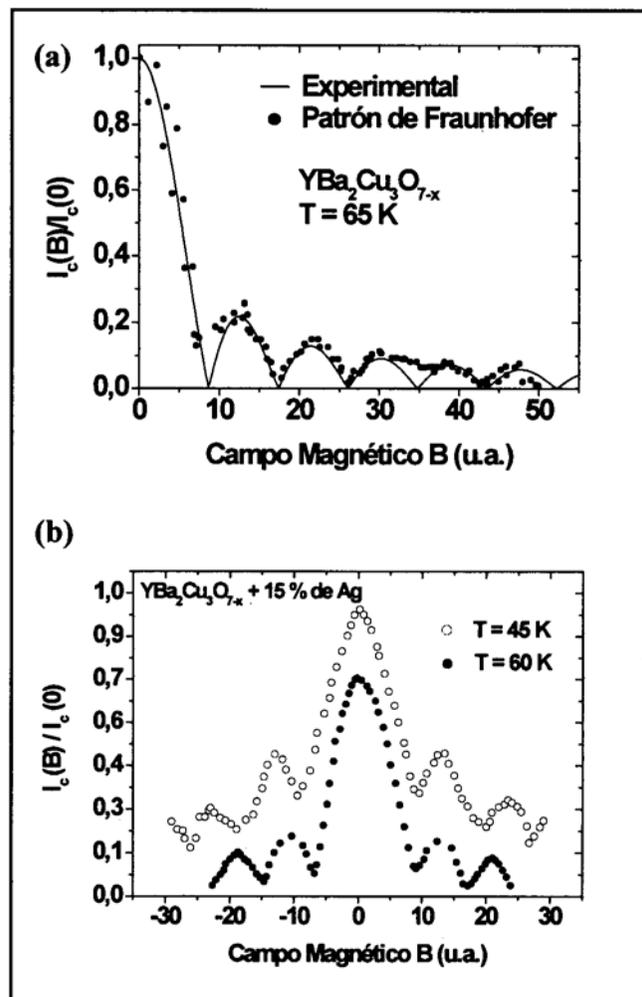


Figura 15. Dependencia de la corriente crítica con el campo magnético para una junta bicristalina de (a) YBCO y (b) YBCO dopado al 5 % en peso con plata. Se observa una modulación de la corriente crítica con el campo magnético, formando un patrón de Fraunhofer [Bolaños *et al.*

de sistemas de Josephson interno se ha incrementado recientemente debido a que ellos pueden ser aplicados para dispositivos de alta frecuencia tales como, mezcladores (mixers) [Walkenhorst *et al.* 1997], amplificadores [Preis *et al.* 1997] y fuentes de radiación [Schlenga *et al.* 1995]. Para la fabricación de este tipo de dispositivos es necesario construir una configuración que garantice que la corriente fluya a través de los planos de CuO_2 , es decir a lo largo del eje c , dentro de la película delgada SATC.

El método de preparación de un dispositivo Josephson intrínseco conocido como Step Stack Josephson Junction (SSJJ), es mostrado en la Figura 16 [Lopera *et al.* 1999]. Inicialmente se deposita una película delgada epitaxial de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{YCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-22Y2) el cual es un material aislante pero con la misma estructura cristalina del Bi-2212 (a). Las líneas horizontales representan los planos de CuO_2 que crecen paralelos al sustrato. Luego con un proceso de fotolitografía de luz ultravioleta combinado de un ataque químico con una solución no acuosa de Bromo-Etanol, se estructura un escalón sobre la película de Bi-22Y2 (b). Después de la fotolitografía se deposita la película de Bi-2212 sobre el escalón (c). Finalmente con un nuevo proceso de fotolitografía se estructuran micropuentes entre 10 y 50 μm de ancho atravesando el escalón (d). Al poner a circular una corriente sobre este dispositivo se observa que ésta circulará a través de los planos de CuO_2 del Bi-2212 en el micropuente (Figs. 16c y d) acoplando de esta manera la serie de junturas intrínsecas con el efecto Josephson.

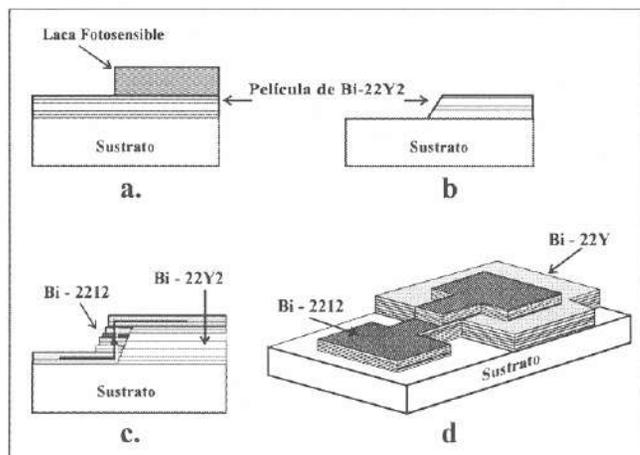


Figura 16. Proceso de fabricación de un dispositivo de efecto Josephson intrínseco denominado "Step Stack": a. Fotolitografía de ultravioleta sobre la película de Bi-22Y2; b. Erosión química hasta el sustrato; c. Deposición de la película de Bi-2212; d. estructuración de micropuentes

En la figura 17 Se observa la dependencia de la resistividad ρ con la temperatura para un SSJJ. A medida que decrece la temperatura y la muestra se acerca a su temperatura crítica, la resistividad experimenta un ligero crecimiento antes de caer abruptamente a cero. Este comportamiento de la resistividad es típico de los SATC cuando la corriente circula a través de los planos de CuO_2 . A temperaturas mayores a T_c , ρ tiene una dependencia con la temperatura de la forma $\rho_0 T^\alpha \exp(\epsilon/k_B T)$ propuesta para la conducción eléctrica a lo largo del eje c en los SATC. [Crommie & Zettl 1991], donde k_B es la constante de Boltzmann y ϵ es una energía de activación.

La forma de las curvas características de corriente voltaje dependen del comportamiento ya sea aislante o metálico normal de las capas de Bi_2O_3 y SrO que actúan como barrera en las junturas intrínsecas del Bi-2212. La figura 18 muestra una curva corriente voltaje ($I-V$) para una SSJJ con barreras aislantes. Una gran histéresis es claramente observada típica de las junturas tipo SIS. Otra característica de las junturas tipo SIS en las SSJJs es la dependencia de la corriente crítica con la temperatura siguiendo una relación de Ambegaokar-Baratoff [Ambegaokar & Baratoff 1963], tal como se muestra en la figura 19.

La figura 20 muestra la curva $I-V$ para un SSJJ con barreras metálicas normales y una altura de escalón de 120 nm, a una temperatura de 4.2 K. En este caso la

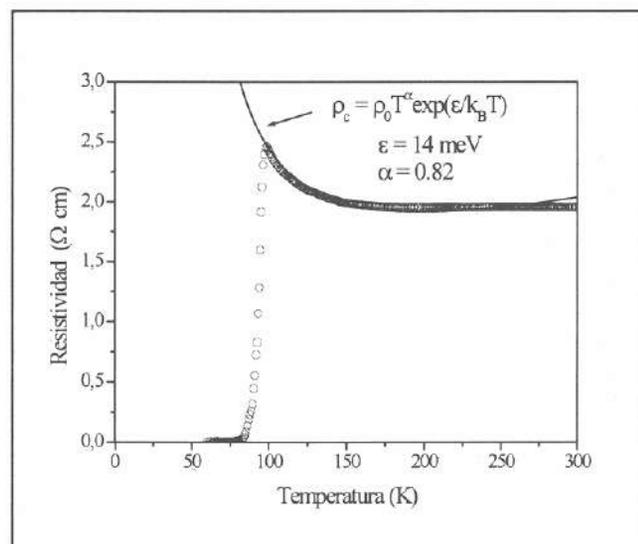


Figura 17. Resistividad como función de la temperatura de un SSJJ basado en una bicapa de Bi-2212 / Bi-22Y2. Para $T > T_c$ la curva ajusta bien con la expresión $\rho_0 T^\alpha \exp(\epsilon/k_B T)$ propuesta por Crommie & Zettl.

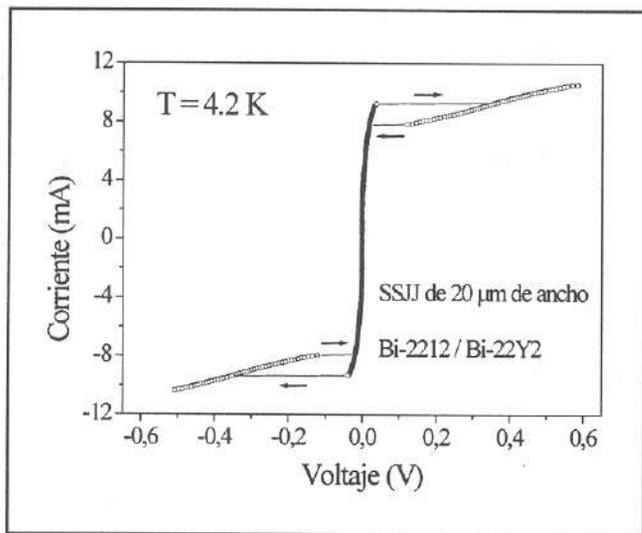


Figura 18. Curva I - V de una SSJJ de Bi-2212 / Bi-22Y2 de 20 μm de ancho a 4.2 K. Se observa un comportamiento claramente histerético similar al de las juntas Josephson tipo SIS [Lopera *et al.* 1999].

curva no presenta histéresis y muestra un claro comportamiento RSJ, característico de las juntas tipo SNS, con un valor extremadamente alto del producto $I_c R_N$ de 780 mV, el cual se explica por la presencia de unas 80 juntas Josephson en serie. Este es un claro ejemplo de la importancia de obtener estas juntas tipo escalón, ya que constituyen una forma efectiva de aumentar fuertemente el valor de la figura de mérito de los dispositivos Josephson.

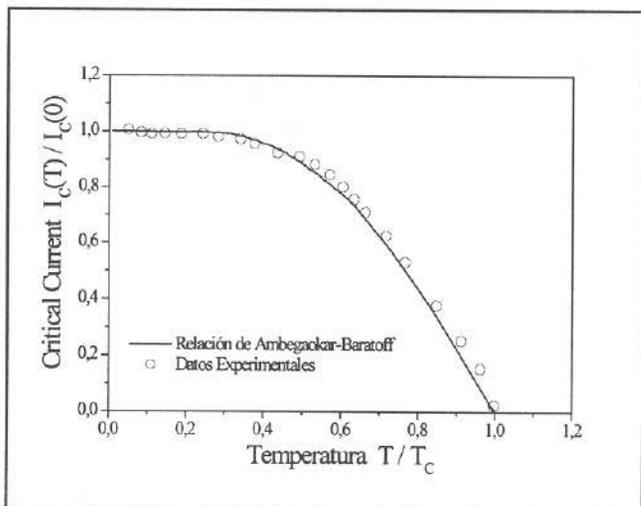


Figura 19. Dependencia de la corriente crítica con la temperatura medida sobre una SSJJ de Bi-2212 / Bi-22Y2. Los círculos indican los resultados experimentales, y la línea sólida es el cálculo teórico de Ambegaokar - Baratoff para juntas tipo SIS [Lopera *et al.* 1999].

La corriente crítica de una junta intrínseca modula con un campo magnético externo aplicado en una orientación paralela a los planos de Cu-O sobre la muestra de forma similar a como lo hace una sola junta SIS. Este tipo de modulación es apreciado en la figura 21 donde se observa la corriente crítica en función del campo magnético para un SSJJ con un ancho de 50 μm a una temperatura de 20 K. La figura no muestra un patrón de Fraunhofer bien definido debido a que las dimensiones de la junta no son suficientemente pequeñas comparadas con la longitud de penetración de Josephson λ_J , que para el caso del Bi-2212 tiene un valor de 1 μm a una temperatura de 4.2 K. Los mínimos de la modulación aparecen cuando $B = nB_0$, siendo n entero y $B_0 = \Phi_0 / bs$, donde s es la periodicidad interplanar (15 \AA para el Bi-2212) y b es el ancho de la junta (50 μm). Este resultado indica que el flujo de campo magnético penetra discretamente dentro de las capas aislantes de cada junta intrínseca.

8. Conclusiones

El desarrollo de dispositivos electrónicos basados en superconductores de alta temperatura crítica promete un aumento significativo en la eficiencia de éstos, comparados con sus equivalentes basados en superconductores convencionales. A pesar de las dificultades que involucra trabajar con los SATC debido a su fuerte anisotropía y extremadamente corta longitud de coherencia entre otras,

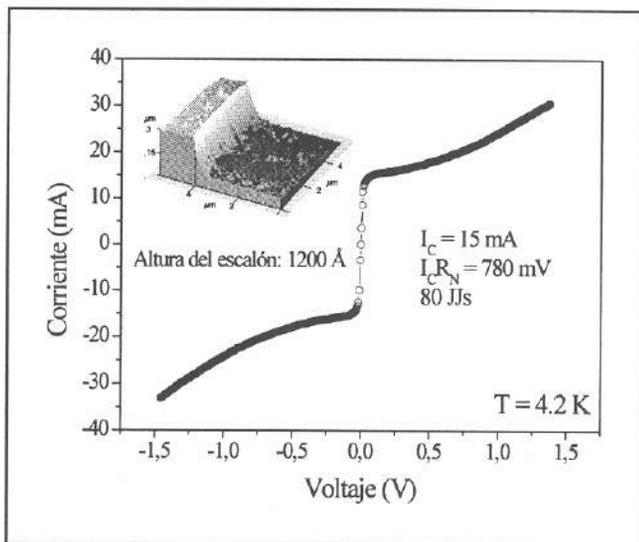


Figura 20. Curva I - V de una SSJJ de Bi-2212 / Bi-22Y2 con comportamiento tipo SNS. El inserto muestra una imagen de microscopía de fuerza atómica, AFM, sobre el escalón de Bi-22Y2. Las medidas ajustan al modelo RSJ con un valor del producto $I_c R_N$ de 780 mV a 4.2 K.

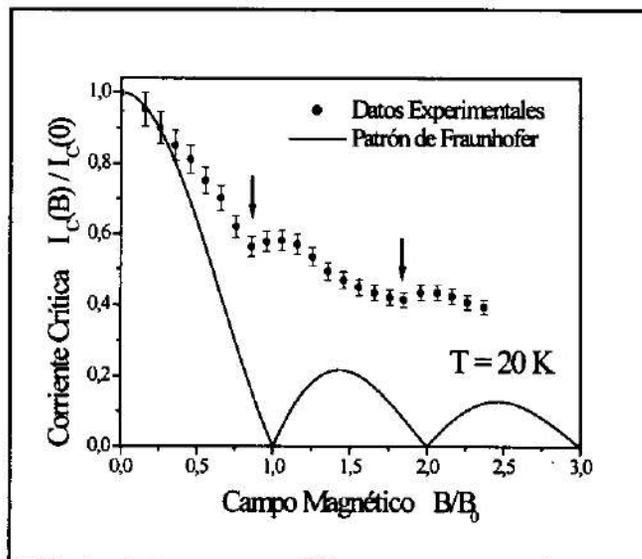


Figura 21. Dependencia de la corriente crítica con el campo magnético para una SSJJ de Bi-2212 / Bi-22Y2 a 20 K. Se puede observar una modulación de I_c con el campo magnético [Lopera et al. 1999].

las investigaciones en estos materiales han permitido hacer grandes avances en la fabricación de junturas Josephson de SATC con buenos resultados.

Las junturas Josephson de SATC presentan un curvas características $I-V$ generalmente monovaluadas que ajustan muy bien con el modelo RSJ, a diferencia del comportamiento altamente histerético de las junturas SIS convencionales basadas en superconductores de baja temperatura. Sin embargo fenómenos como los escalones de Shapiro, y los patrones de Fraunhofer se han podido observar claramente en los dispositivos Josephson de SATC.

Un aumento importante en la eficiencia de las junturas Josephson basadas en YBCO se ha logrado mejorando las características superconductoras de este material dopándolo con plata. Se ha encontrado que el nivel óptimo de dopaje para obtener un producto $I_c R_n$ (figura de mérito) más alto corresponde a un 5 %.

La estructura altamente anisotrópica del Bi-2212 hace que este material se comporte como una pila de junturas Josephson en serie. Este comportamiento ha permitido el desarrollo de dispositivos de Efecto Josephson Intrínseco, donde una película delgada con un escalón de 120 nm de altura contiene unas 80 junturas en serie, cada una aportando un voltaje característico entre 9 y 10 mV, para

obtener un valor total entre 700 y 800 mV. Estos altos valores del producto $I_c R_n$, junto con otras características, hace que este tipo de dispositivos sean de sumo interés para el desarrollo de aplicaciones en electrónica y comunicaciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen a COLCIENCIAS por el apoyo brindado a través del proyecto "Development of electronic devices based on HT_c thin films" contrato No. 1106-05 197-95.

Bibliografía

- Ambegaokar, V., & Baratoff, A. 1963. Tunneling between superconductors. *Phys. Rev. Lett.* 10 (11): 486-489
- Anderson, P. W., & Rowell, J. M. 1963. *Phys. Rev. Lett.* 10: 230
- Balsamo, E. P., Paternò, G., Barone A., Russo, M., & Vaglio, R. 1976. *phys. stat. sol. (a)* 35: K173-175
- Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R. 1957. *Phys. Rev.* 108: 1175
- Barone, A., & Paternò, G. 1982. *Physics and Applications of the Josephson Effect*. Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York. pp. 13, 122
- Bednorz, J. G., & Müller, K. A. 1986. *Z. Phys. B* 64: 189
- Bolaños, G., den Ouden, G., Chacón M., Lopera, W., Gómez, M. E., Pulzara, A., Heiras, J., & Prieto, P. 1997. Grain Boundary Junctions with Ag-doped $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ epitaxial thin films. *Physica C* 282-287: 2419-2420
- Bolaños, G., Baca, E., Osorio, J., & Prieto, P. 2000. Improvement in the properties of Ag-doped $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ grain boundary Josephson junctions. *phys. stat. sol. (b)* 220 (1): 517-520
- Clarke, J. 1994. SQUIDS. *Sci. American* 271 (2): 46-53
- Crommie, M. F., & Zettl, A. 1991. *Phys. Rev. B* 43 (1): 408-412
- Faley, M. I., Poppe, U., Jia C. L., Glyantsev, V. N., Siegel, M., & Urban, K. 1994. *Physica C* 235-240: 591
- Finnegan, T. F., Denenstein, A., & Langenberg, D. N. 1971. *Phys. Rev. B* 4: 1487
- Josephson, B. D. 1962. *Phys. Lett.* 1: 251

- Kleiner, R., Steinmeyer, F., Kunkel, G., & Müller, P.** 1992. Intrinsic Josephson effects in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ single crystals. *Phys. Rev. Lett.* **68**: 2394-2397
- Lopera, W., Baca, E., Gómez, M.E., Prieto, P., Poppe, U., & Evers, W.** 1999. Properties of Bi-2212/Bi-22Y2 step-stack Josephson junctions. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** (2): 4288-4291
- Lopera, W., Giratá, D., Osorio, J., & Prieto, P.** 2000. Structural and electrical properties of grain boundary Josephson junctions based on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ thin films. *phys. stat. sol. (b)* **220** (1): 483-487
- Matisoo, J.** 1980. The superconducting computer. *Sci. American* **242** (5): 50-65
- McCumber, D. E.** 1968. *J. Appl. Phys.* **39** (6): 2503
- Merzbacher, E.** 1961. *Quantum Mechanics*. Ed. Wiley, New York
- Preis, Ch., Sardar, M., & Keller, J.** 1997. Parametric amplification of radiation by the intrinsic Josephson effect. *J. Appl. Phys.* **81** (1): 315-323
- Schlenga, K., Hechtfisher, G., Walkenhorst, W., Müller, P., Régi, F. X., Savary, H., Schneck J., Veith, M., Brodkorb, W., & Steinbeiss, E.** 1995. Intrinsic Josephson junctions in high- T_c superconductors as high frequency sources. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (2)
- Shapiro, S.** 1963. *Phys. Rev. Lett.* **11**: 80
- Shapiro, S., Janus, A. R., & Holly, S.** 1964. *Rev. Mod. Phys.* **36**: 223
- Van Duzer, T., & Turner, C. W.** 1981. *Principles of Superconductive Devices and Circuits*. Ed. Elsevier, New York. p. 184
- Vivas, P., Chacón, M., Gómez, M., & Prieto, P.** 2000. Characterization of Josephson junctions for the elaboration of High- T_c SQUIDS. *phys. stat. sol. (b)* **220** (1): 503-507
- Walkenhorst, W., Hechtfisher, G., Schlötzer, S., Kleiner, R., & Müller, P.** 1997. Probing the collective Josephson plasma resonance in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ by W-band-mixing experiments. *Phys. Rev. B* **56** (13): 8396-8403

DESCUBRIENDO ANCESTROS DE LOS UREDINALES

por

Pablo Buriticá C¹.

Resumen

Buriticá, P.: Descubriendo los ancestros de los uredinales. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(96): 395-401, 2001. ISSN 0379-3908.

Las especies de uredinales de los géneros *Uncol* y *Desmella*, encontradas sobre helechos en el trópico bajo americano, exhiben características morfológicas, de ciclo de vida y de relación con sus hospederos, que pueden ser consideradas como ancestrales con respecto a otras especies que se desarrollan sobre helechos de las regiones templadas y que han sido consideradas hasta ahora como el punto de partida de los fenómenos evolutivos en el Orden Uredinales.

Palabras Claves: Helechos, Uredinales, ancestros, evolución, neotrópico.

Abstract

Uredinales species belonging to the genera *Uncol* and *Desmella* on ferns in the low American tropics, show characteristics in morphology, life cycles and relations with hosts, which are ancestral with respect to the species found in temperate climate and considered, up to now, as the starting point of phenomena related with evolution rust.

Key words: Ferns, Uredinales, ancestors, evolution, Neotropics.

Introducción

Los estudios biológicos y sistemáticos sobre especies del Orden Uredinales (hongos-royas), tienen gran valor científico dadas su abundancia y diversidad. Los uredinales forman el grupo natural más grande entre los hongos, con alrededor de 6.000 especies agrupadas en 120 géneros. Son los organismos fungosos que presentan el mayor rango de hospederos entre las familias de fanerógamas (ca. 200. **Hennen & Buriticá, 1980**) a cuyas especies han seguido a todos los lugares y hábitats del

globo. Sus ciclos de vida son complejos y llegan a presentar hasta cinco estados esporicos, en igual número de estructuras, todos ellos con distinta función biológica. Son parásitos, ecológicamente obligados, y algunas de sus especies, son críticas para la agricultura como patógenas con un alto poder epidémico y destructivo.

Entender los pasos evolutivos y las soluciones biológicas, que han logrado, para llegar a ser organismos con amplia diversidad morfológica y notable plasticidad adaptativa, para ajustarse a los cambios sufridos por sus

¹ I.A., Ph.D., Profesor Titular Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

hospederos y a los accidentes geológicos y geográficos o variantes ambientales, permite comprender uno de los grandes desarrollos biológicos de la naturaleza, mucho más si se tiene en cuenta su carácter de parásitos obligados.

Sobre su origen y sus ancestros es mucho lo que se ha especulado, mediante un buen número de argumentos, todos ellos, acordes con el grado de conocimiento y con el saber biológico de cada época. Como los uredinales han desempeñado un papel protagónico en la historia de la agricultura, sobre ellos existen abundantes referencias, especialmente como organismos dañinos a los cultivos. En los tiempos bíblicos fueron consideradas como un castigo de Dios que buscaba purgar los pecados de los hombres (Orlob, 1964). Luego, en la época romana fueron considerados dentro de la teoría de las causas siderales ("la roya resultaba especialmente perjudicial durante el período de la luna llena, porque con su calor, al igual que el sol de día, dañaba las plantas durante la noche" Orlob, 1964). La primera ilustración como organismos, de una roya (*Phragmidium mucronatum* (Persoon) Schl.) se debe a Hooke y fue hecha en 1665. Los uredinales comenzaron a ser considerados hongos por la similitud de sus esporangios con los de *Lycoperdon*, tanto que la roya del tallo del trigo fue colocada, inicialmente en este género. Su carácter como grupo de hongos independiente y parásito fue establecido en 1767 por Targioni Tozzetti (Orlob, 1964). El primero en Colombia, en referirse a ellos fue Francisco José de Caldas, quien en 1803, cuando al mencionar el polvillo (roya negra del tallo) del trigo, lo definió como una "..... pequeña planta parásita.....". (Buriticá, 1999). El punto de partida de la taxonomía de los Uredinales lo constituye el trabajo "*Synopsis Methodica Fungorum*" de Persoon, publicado en 1801.

En el siglo XIX se consolidaron las teorías biológicas predominantes en la actualidad, y en especial la sistemática de los organismos (exceptuando los virus); por mucho tiempo los hongos fueron considerados como un grupo de plantas inferiores carentes de clorofila; en el presente, han sido separados en un reino aparte. Los uredinales han sido ubicados junto con los hongos Basidiomycetes, un hecho al parecer incuestionable.

Sobre sus ancestros se han elaborado varias hipótesis. Savile (1955) plantea un origen común con los Ascomycetes con base en una especie de *Prototaphrina*; Donk (1972), Leppik (1955) y Hennen & Buriticá (1980), sugieren que varios géneros de auriculariáceos (*Jola* Möller, *Eocronartium* Atkinson, *Herpobasidium* Lind y *Platycarpa* Couch) que crecen sobre musgos, no presentan diferencias morfológicas fundamentales con los uredinales (basidio fragmentado, ciclo de vida no expan-

dido) y probablemente son sus parientes ancestrales. En los estudios sobre evolución de los Basidiomycetes Oberwinkler (com. pers. 1997), argumenta que los *Cryptomyocolax* (levaduras con características combinadas de ascomicetes y basidiomicetes) resultan esenciales para comprender su origen y evolución; los uredinales han sido colocados en el mismo tronco con los septobasidiales y con un grupo de los ustilaginales (nótese que es reconocida su heterogeneidad; los tilletiales se consideran como grupo aparte). Buriticá (1995) sugiere que organismos protosimbiontes (plantas autotróficas y hongos heterótrofos) fueron pioneros en la colonización de la tierra; algunos heterótrofos en estrecha relación con su autótrofo constituyeron la base para la evolución de las algas y los hongos endofíticos y para el desarrollo del parasitismo obligado. Los uredinales tuvieron su origen como hongos heterótrofos endofíticos (endomycofolia).

En este trabajo, con base en el análisis de los hospederos primitivos, el hábitat, los ciclos de vida y la morfología, se postulan algunas hipótesis sobre los ancestros de los uredinales y sobre los problemas biológicos que debieron resolver, para llegar a ser lo que son en la actualidad.

Hospedantes

Biológicamente se acepta que los estudios de los parásitos proporciona información sobre las relaciones evolutivas con sus hospederos. Con los animales han sido propuestas algunas "reglas": "la filogenia del parásito es un espejo de la de su hospedero", regla de Fahrenholz; "entre más primitivo sea el hospedero, más primitivos serán sus parásitos", regla de Szidat; o, "cuando un gran grupo taxonómico (ej. familia) de hospederos, formado por un amplio número de especies, se compara con un equivalente taxonómico de pocos representantes, el grupo mayor tendrá la mayor diversidad de parásitos", regla de Eichler (Hart, 1988). Entre los uredinales, Dietel en 1904, fue el primero en proponer que los taxones desarrollados en hospederos primitivos, son primitivos con respecto a los encontrados en hospederos más avanzados. En relación con los uredinales, Buriticá en 1995, conceptúa: "el hospedero hace parte integral del ambiente del patógeno y la edad del huésped marca la edad de la relación (parásito - hospedero)". Bajo este punto de vista, es obvio que los uredinales que se desarrollan sobre helechos (o musgos?) deben ser primitivos en relación con los encontrados en otros grupos de plantas. La coevolución de los uredinales con sus hospederos no está restringida a un único grupo de plantas relacionadas; normalmente sigue el desarrollo y dispersión de helechos y plantas superiores (Leppik, 1973). El género *Uredinopsis*

Magnus ha sido considerado como el más primitivo ("fósil viviente") (Savile, 1995); Leppik (1973) sugiere que las royas más primitivas son aquellas que forman el telio en helechos y los aecios en *Abies* Mill. Al aceptar esta hipótesis habría que aceptar que el ciclo de vida más complejo (completamente expandido) es primitivo (más adelante se discute lo contrario).

Ando (1984) al revisar la filogenia de los géneros de uredinales considerados como primitivos en la familia Pucciniaceae (*Uredinopsis* Magnus, *Milesina* Magnus e *Hyalopsora* Magnus), con base en las nuevas hipótesis filogenéticas de los Filices determina que *Uredinopsis* Magnus no es el más primitivo, habiendo sido precedido por *Milesina* Magnus. Hasta el presente no hay estudios filogenéticos que incluyan los géneros y especies de uredinales que crecen sobre helechos frecuentes en las regiones tropicales y el punto de partida de la filogenia tiene como base a los uredinales encontrados en las zonas templadas, donde la flora uredinológica está mejor conocida.

Las relaciones de los uredinales que se desarrollan sobre helechos en Colombia se presentan en la Tabla 1. La organización descendente de familias, subfamilias y géneros, sigue el orden filogenético consignado en el trabajo sobre helechos y plantas afines en Colombia de Murillo-Pulido & Harker-Useche (1990).

El rango de hospedantes de los géneros de uredinales que se desarrollan sobre las distintas familias y géneros de helechos, muestra que los de origen tropical (*Uncol* Buriticá & Rodríguez y *Desmella* Sydow) abarcan mayor número de géneros que los que tienen distribución geográfica correspondiente, principalmente, a las regiones templadas. El hábitat de los géneros de origen e influencia de clima templado, sólo se encuentra en las regiones tropicales en zonas altas, tal y como ha sido demostrado para otros géneros de uredinales (Buriticá, en prensa).

La flora de los filices y sus relacionados es mucho más abundante en el trópico. Tatuno, en 1972 (citado por Ando, 1984), al estudiar la composición cromosómica de varios helechos, sugiere que la familia Polypodiaceae ($n=12$) es ancestral con respecto a las familias Osmundaceae ($n=11$) y Pteridaceae ($n=10$). Al confrontar esta hipótesis con la presencia de los géneros de uredinales que crecen sobre ellas (tabla 1), parece evidente que *Uncol* Buriticá & Rodríguez y *Desmella* Sydow, típicos de helechos tropicales, son ancestrales con respecto a los géneros correspondientes a las regiones templadas (*Uredinopsis* Magnus, *Milesina* Magnus y *Hyalopsora* Magnus). La representación de especies en la familia Polypodiaceae es mucho más

grande y diversa en el trópico, la familia Osmundaceae se encuentra restringida a hábitats específicos y localizados.

Del análisis planteado merece ser destacada la ubicación taxonómica actual del género *Desmella* Sydow y de la especie *Puccinia lygodii* Arthur, dentro de la familia Pucciniaceae; pues, parece necesario un estudio más crítico para determinar la afinidad *Uncol* Buriticá & Rodríguez / *Desmella* Sydow y *Puccinia lygodii* Arthur / *Desmella* Sydow.

Recientemente, Hennen (1997) ha registrado ejemplares de *Uredo vetus* Hennen sobre *Selaginella* sp. (Division Lycophyta) en material proveniente de la China subtropical. De la morfología descrita es muy poco lo que se puede inferir, pero, la edad del hospedero (Período Devoniano) permite sospechar una relación ancestral, que confirma el hecho que todavía falta mucho por descubrir sobre los orígenes de los uredinales y de sus parientes ancestrales, probablemente, en plantas mucho más primitivas que los helechos. Las evidencias apuntan a que es importante reconsiderar algunos de los géneros de phragmobasidiomycetos que crecen sobre musgos, como uredinales ancestrales (Hennen & Buriticá, 1980)

Hábitat

Los uredinales han evolucionado con sus plantas hospederas y, así han llegado a todos los lugares donde ellas crecen. Para seguir las a las zonas extremas del ártico o la antártida, han reducido su ciclo de vida, para ajustarse a los pocos días disponibles que el hospedero y el clima les proporcionan. En las regiones de clima templado y con estaciones, mecanismos tales como la expansión del ciclo de vida, el heteroicismo, el reposo en teliosporos protegidos por una gruesa pared o en un micelio sistémico, les ha permitido contar con más tiempo para la reproducción y sobrevivir en las condiciones climáticas extremas de los inviernos y de escasez de hospederos. Todos estos mecanismos, altamente eficientes, son derivados (antes que ancestrales) como adaptaciones tangibles al clima. Savile (1980) al aceptar como ancestral el género *Uredinopsis* trata de derivar toda una serie de características morfológicas y de ciclos de vida a partir de él.

Los uredinales tropicales que han permanecido en tal condición, sólo siguen la línea coevolutiva con los microcambios de hábito y morfología de sus hospederos. Ancestros autoestériles, con ciclos de vida no expandidos, salida a través de los estomas, autoicismo, germinación del teliosporo sin periodo de reposo, ausencia de paredes gruesas y alta especificidad del hospedero,

Tabla 1. Distribución de las especies de Uredinales sobre Filices colombianas*

Familia, Subfamilias, Géneros de Filices	Familias y Géneros de Uredinales				
	Uncoleaceae	Pucciniastraceae		Pucciniaceae	
	<i>Uncol</i>	<i>Uredinopsis</i>	<i>Milesina</i>	<i>Desmella</i>	<i>Puccinia</i>
Schizaeaceae <i>Lygodium</i>					X
Gleicheniaceae <i>Gleichenia</i>				X	
Cyatheaceae	X				
Polypodiaceae					
Dennstaedtioidaeae <i>Dennstaedtia</i>			X	X	
<i>Hipolepis</i> X				X	
<i>Pteridium</i>					
Lyndsayoideae <i>Lindsaea</i>		X			
Davallioidaeae <i>Nephrolepis</i>			X	X	(Uredo)
Pteridoideae <i>Pteris</i>				X	
Gymnogrammoideae <i>Adiantum</i>				X	
<i>Pityrogramma</i>				X	
Blechnoideae <i>Blechnum</i>			X		
Dryopteridoideae <i>Theliptheris</i>	X				
<i>Polybotrya</i>	X				
Polypodioidaeae <i>Polypodium</i>	X				
Elaphoglossoideae <i>Elaphoglossum</i>					(Uredo)

* Con base en material publicado y en especímenes depositados en el herbario Buriticá en Medellín.

son algunas de las características que muestran la base suficientemente amplia, para derivar de ella las características de las demás en los otros ambientes. En el proceso de seguir al hospedero hacia las alturas de las montañas de los Andes sudamericanos, son evidentes los cambios sugeridos, tal y como ha sido postulado por Buriticá (en prensa). Los ambientes neotropicales y pantropicales parecen ser, entonces, el punto de partida, para los uredinales modernos y es allí donde se encuentran evidencias de las características ancestrales.

De acuerdo con Florin (citado por Leppik, 1973) las coníferas tuvieron su origen en regiones subtropicales y climas cálidos; sus fósiles más primitivos se han encontrado en la época tardía del Carbonífero y del Pérmico temprano; para la constitución de los supercontinentes de Laurasia (Norte) y Gondwanalandia (Sur), las coníferas se encontraban bien establecidas y sus familias estaban

diferenciadas. El origen tropical de los helechos es una hecho indudable y su migración hacia los climas templados, parece haber ocurrido al tiempo con las coníferas y con ellos la de los Uredinales, que al llegar a un clima inhóspito y con estaciones marcadas, expandieron su ciclo de vida y lo dividieron en fases, para dar origen al heteroicismo, tomando las coníferas para establecer su estado aecídico (coincidencia de hospederos). Los uredinales con estructuras teliospóricas sobre las coníferas, tipo *Mikronegeria* Dietel (familia Micronegeriaceae Cummins & Hiratsuka), presentan características morfológicas ancestrales y su relación es anterior a los estados aecídicos provenientes de uredinales con teliosporos sobre los helechos. Además, son más afines con los uredinales de clima tropical tipo Chaconiaceae Cummins & Hiratsuka. "Presumiblemente las royas ancestrales vivieron en los trópicos, difiriendo poco de los basidiomicetes ancestrales" (Leppik, 1973).

Los uredinales, típicamente tropicales, que crecen sobre helechos (*Uncol* y *Desmella*) al no sufrir una gran presión ambiental, se han limitado a mantenerse a su hospedero bajo una relación de estrecha coevolución; su morfología sigue siendo simple; sus ciclos de vida son del tipo no expandido y se cumplen en un sólo hospedero (autóico). Es decir, se ajustan mucho mejor a la expectativa de ser los ancestrales.

Morfología

Los uredinales se caracterizan por tener un epibasidio fragmentado (fragmobasidio), en el cual se originan las basidiosporas uninucleadas. El estado anterior o de hipobasidio, mejor conocido como estado teliospórico, es considerado el estado perfecto y en él se fundamenta la taxonomía. Dependiendo de la especie, la fusión nuclear y la posterior meiosis, se realizan en alguna de estas dos estructuras que, fundamentalmente, son continuas y sólo se encuentran desfasadas por períodos de reposo presentes en el hipobasidio y en algunas especies y hábitat. Especialmente en uredinales de zonas templadas o tropicales con estaciones que contrastan.

Durante el proceso evolutivo, los uredinales han dado lugar a otros estados esporóicos y a nuevas estructuras. Aparecieron los órganos sexuales conocidos como espermogonios (hifas receptoras y espermacios) así como los estados esporóicos relacionados con ellos para la dispersión de los nuevos heterocariones (ecídicos); la perpetuación de ellos se realiza en forma asexual en nuevas estructuras llamadas uredos (estados uredospóricos). Sí, el estado de espermogónico y su consecuente aecio, se forman en un hospedero diferente del que mantiene el estado de telio, se tratará de un uredinal heteróico; sí todo el ciclo se mantiene en un sólo hospedero se tratará de una especie autóica.

La evolución de las estructuras y de las esporas correspondientes, para cumplir mejor su función de perpetuación de la especie y de adaptación al ambiente, no ha sido totalmente paralela entre ellas. Se han caracterizado al menos doce tipos de espermogonios, siete tipos de aecio, alrededor de veinte tipos de uredo (si se sigue la norma de caracterizarlos taxonómicamente probablemente este número será superior) y alrededor de una docena de tipos de telios y teliosporos (sirven para caracterizar las familias y los géneros). La presencia de las estructuras (O, I, II, III) en combinaciones particularizadas y de orden filogenético y de otros factores morfológicos críticos (tipo de germinación, poros en el telio, complejidad del telio, estructuras estériles en el esporangio, etc.), conforman la

base para la clasificación de los 120 géneros y las 16 familias reconocidas.

En los uredinales el progreso morfológico por especialización y elaboración de los teliosporos, se inicia con la especialización de la punta de la hifa, tal y como ha sido sugerido por Buriticá (1980). El fragmobasidio es terminal y en los organismos que crecen sobre musgos no se encuentra acompañado de un hipobasidio, o este es incipiente, pudiendo reconocerse sólo por una pequeña hinchazón. En los uredinales propiamente dichos, en el género *Uncol* el teliosporo es simple y forma una sucesión de dos/tres esporas sencillas. En *Uredinopsis* la formación de las esporas ocurre también en sucesión, pero el teliosporo aparece mucho más elaborado, al presentar septos horizontales y verticales y pared gruesa. En *Milesina* aparece más sencillo al presentar una sola celda.

Con respecto a la organización en un teliosoro, *Uncol* y *Uredinopsis* no lo forman como tal; en el primero la punta de la hifa protrude, a través del estoma o a través del pseudohimenio del uredosoro y en el segundo las esporas se hallan embebidas en el tejido del hospedero (medida interpretada como de protección al ambiente). En *Milesina* y *Mikronegeria* ya se encuentra definida la organización en un teliosoro identificable como tal.

Como ha sido propuesto por Buriticá (1995), los uredinales, bien pudieron tener un ancestro con características endofíticas, hipótesis sustentada por cuanto los fenómenos de producción y exposición de los esporangios (eciosporos, uredosporos y teliosporos) para facilitar la diseminación de las basidiosporas o de ellos mismos, están relacionados con la forma de "salir" del tejido del hospedero. En los uredinales tropicales, se encuentran géneros que exponen sus esporangios al salir del hospedero por aberturas naturales, especialmente por los estomas. A partir de ellos, se originó el rasgado de la epidermis del hospedero, para formar soros radiales definidos, en géneros más avanzados evolutivamente. Evidencias al respecto se encuentran en las secuencias: *Hemileia* / *Chaconiaceae*; *Hennelia* / *Shaerophragmiaceae*; *Edythea* / *Pucciniaceae*; *Desmella* / *Pucciniaceae*.

Ciclos de vida

En reciente publicación Hennen & Buriticá (1980), al analizar las rutas de la evolución de los distintos ciclos de vida de los uredinales postularon como primitivo un tipo de ciclo de vida en el cual sólo se forma el estado teliospórico (III) y a partir de él se derivan los demás tipos de ciclo de vida, pasando por el completamente expandido (O, I, II, III) y llegando a los distintos tipos de ciclo

reducido (O, III; III). La hipótesis ha sido aceptada en la comunidad científica y tiene implícito el evento de que los órganos sexuales (espermogonios con espermacios e hifas receptivas), los esporangios que llevan el resultado de los nuevos heterocariontes (Eciosporos) y los esporangios asexuales de reproducción masiva (Uredosporos), se han formado de novo en la escalera ascendente de la evolución. La pérdida de ellos (O, I, II) también ha sido el resultado de la adaptación.

El ciclo de vida no expandido con sólo el estado III, es entonces el primitivo; aún cuando es especulativo, ya que no se ha demostrado, éste, por lo encontrado actualmente ocurre en los musgos; le siguen los ciclos de vida en donde aparecen los espermogonios o los estados asexuales. Evento que ha sido demostrado en los géneros tropicales *Uncol* y *Desmella*. Para este último no se conocen estados distintos del III y el II. En *Uredinopsis* el ciclo de vida incluye O, I, II, III y dos hospederos: helechos y coníferas. Este tipo de ciclo de vida es muy elaborado y se considera, entonces, como derivado, antes que ancestral (Hennen & Buriticá, 1980).

Las evidencias apuntan a que la expansión-reducción del ciclo de vida, ha sido un evento evolutivo progresivo, para seguir la colonización de los distintos ambientes a los cuales han migrado sus hospederos, y paralelamente, con el mecanismo de expansión y el paso a autoicismo a heteroicismo, se ha ganado la conquista de nuevos hospederos (Hennen & Buriticá, 1980) Buriticá (en prensa) ha demostrado que los uredinales en el trópico colombiano han seguido a sus hospederos en la conquista de las alturas de los Andes y que uno de los mecanismos usados ha sido el de la reducción del ciclo de vida.

Conclusiones

Los organismos que han establecido una relación de dependencia alimenticia estrecha y obligada (mediante haustorios) y que cumplen totalmente su ciclo de vida en un hospedero, son llamados comúnmente parásitos obligados, tal cual ocurre con los uredinales; en ellos la relación con sus hospederos es tan antigua como la edad misma de formación y origen del hospedero. La dependencia es y ha sido parte de la coevolución entre los dos organismos. Suponer que los protouredinales establecieron relaciones con protoplantas y que coevolutivamente llegaron a la condición actual, permite comprender de mejor forma la historia evolutiva de los dos organismos involucrados en la relación.

Hennen & Buriticá (1980) sugirieron cuatro mecanismos mediante los cuales los Uredinales siguieron a

sus hospederos: 1- divergencia y radiación con el hospedero; 2- brinco a nuevos hospederos; 3- expansión del ciclo de vida; 4- reducción del ciclo de vida. El primer evento implica reconocer la coevolución; el segundo, más difícil de explicar, encuentra evidencias en la hipótesis de "memoria genética" y la plasticidad parasítica; los otros dos eventos están bien documentados. Suponer que un parásito con hábitos alimenticios especializados llegue de "fuera" a colonizar de novo un nuevo hospedero, sólo se explicaría por el reconocimiento e identificación de la base genética ya identificada en épocas previas. Ejemplos de la "memoria genética" se han encontrado en uredinales que reconocen hospederos que han estado alejados geográficamente; *Puccinia psidii* Winter es típicamente un uredinal del trópico americano y ha tomado, en Brasil, como hospedero especies de *Eucaliptus* introducidas de Australasia. Con respecto a la plasticidad parasítica, las basidiosporas la han exhibido al desarrollarse en hospederos alternantes, hecho que ha permitido a Leppik (1953) postular la hipótesis de la "escalera hologenética".

El descubrimiento de nuevos hospederos ancestrales, el estudio y la mejor comprensión del papel de las distintas estructuras y de los ciclos de vida, muestran lo estrecha y dependiente que ha sido la relación entre los uredinales con sus hospederos y pone de presente lo poco que se ha explorado y recolectado en los centros de origen de estos organismos que probablemente apuntan a los trópicos.

Bibliografía

- Ando, K. 1984. Phylogeny of the fern rusts (*Uredinopsis*, *Milesina* and *Hyalopsora*). Trans. Mycol. Soc. Japón 25: 295-304.
- Buriticá, P. 1980. Teliospore ontogeny as a criteria for rust phylogeny. Rept. Tottori Mycol. Inst. (Japón) 18: 296.
- . 1995. Origen de los hongos causantes de enfermedad en las plantas. ASCOLFI Informa 21(5): 58-63.
- . 1999. Las enfermedades de las plantas y su ciencia en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 473 pp.
- (en prensa). Adaptación al ambiente de Uredinales Neotropicales.
- Donk, M.A. 1972. The Heterobasidiomycetes: A reconnaissance-II Some problems connected with the restricted enmendation. Proc. Konink Nederl. Akad. Wetensch. 75: 376-390.
- Hennen, J.F. & P. Buriticá. 1980. A brief summary of modern rust taxonomic and evolutionary theory. Rept. Tottori Mycol. Inst. (Japón) 18: 243-256.
- Hennen, J.F. 1997. *Uredo vetus* sp. nov., the first record of a rust on *Selaginella*, and the use of the name *Uredo*. Mycologia 89(5): 801-803.

- Leppik, E.E.** 1953. Some viewpoints on the phylogeny of rust fungi. I. Coniferous rusts. *Mycologia* 45: 46-74.
- . 1955. Evolution of Angiosperm as mirrored in the phylogeny of rust fungi. *Arch. Soc. Zool. Bot. Fenn. "Vanamo"* 9 (suppl.): 149-160.
- . 1973. Origin and evolution of conifer rusts in the light of continental drift. *Mycopathologia & Mycologia Applicata* 49(2-3): 121-136.
- Murillo-Pulido, M.T. & Harker-Useche, M.A.** 1990. Helechos y plantas afines de Colombia. *Acad. Colomb. Cienc. Colección Jorge Alvarez LLeras* 2. 323 pp.
- Orlob, G.B.** 1964. Conceptos sobre la etiología en la historia de la fitopatología. *Pflanzenschutz-Nachrichten -Bayer-* 17 (1964/4): 197-288.
- Savile, D.B.O.** 1955. A phylogeny of the Basidiomycetes. *Can J. Bot.* 33: 60-104.
- . 1980. Ecology, convergent evolution, and classification in Uredinales. *Rept. Tottori Mycol. Inst. (Japón)* 18: 275-281.

MINERAL DE MAGNESITA COLOMBIANA EN LA OBTENCIÓN DE REFRACTARIOS DE ESPINELA

por

Marcela Pachón*, Edgar Delgado**, Pilar Pena***, Emigdio Segura****

Resumen

Pachón, M., Delgado E., Pena P., Segura E.: Mineral de magnesita colombiana en la obtención de refractarios de espinela. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **25**(96):. 403-409, 2001. ISSN 0370-3908.

Se evaluó el comportamiento de una magnesita colombiana en la obtención de un material de espinela, comparando propiedades físicas y composición de fases por DRX, con la obtenida a partir de óxido de magnesio puro. La espinela es útil en la formulación de refractarios básicos, utilizados en la industria del acero y cemento (Henry, 1997), como material abrasivo, como sustrato en circuitos eléctricos, como membranas cerámicas y actualmente en odontología (Pasquier, 1991). La espinela se produce por la reacción entre la magnesia y la alúmina a temperaturas superiores a 1100°C. Con base en los diagramas de fase se diseñaron dos formulaciones. Los reactantes se llevaron a un tamaño de partícula menor a 10 µm, se conformaron y sinterizaron a 1650°C. Se encontró que el exceso de magnesia, y el contenido de sílice, en la materia prima natural favorecieron la sinterización.

Palabras clave: Cerámicas, Refractarios básicos, Espinela, Magnesita, Sinterización.

Abstract

A Colombian magnesite mineral behaviour in obtaining spinel was evaluated by comparing its physical properties and XRD determined phases to those of spinel produced from pure magnesium oxide. Spinel is useful as a refractory, in cement and steel industries (Henry, 1997), as abrasive media, as an electric circuit substrate, as ceramic membranes and lately as dental restoration material. Spinel is obtained by thermally activated reaction above 1100°C between magnesia and alumina. Two compositions based on phase diagrams were chosen and studied. Reactants with D_{90} smaller than 10 µm were dry pressed and sintered at 1650°C. Silica present in starting mineral and excess added magnesia facilitate sintering.

Key words: Ceramics, Refractories, Spinel, Magnesite, Sintering.

* INGEOMINAS. Diagonal 53 # 34 - 53. Bogotá. mpachon@ingecom.gov.co

** Universidad Nacional de Colombia. Dpto. de Química. Bogotá. edelgado@ciencias.ciencias.unal.edu.co

*** CSIC. Instituto de Cerámica y Vidrio. Madrid (España). ppena@icv.csic.es

**** SUMICOL. Medellín. esegura@corona.com.co

Introducción

Los ladrillos refractarios que contienen espinela, la cual es obtenida por reacción de una mezcla de óxido de magnesio y alúmina, tienen una aplicación muy amplia en la formulación de refractarios básicos ($MgO-MgAl_2O_4$) ó de alta alúmina ($Al_2O_3-MgAl_2O_4$) especialmente donde se trata de mejorar la resistencia al impacto, la erosión por metales, el choque térmico y la resistencia a la corrosión por escorias. Dichos materiales son exigentes en sus características microestructurales, debido a que en condiciones de operación los refractarios están expuestos durante largos periodos a altas temperaturas, al contacto con escorias altamente reactivas y a la erosión causada por las turbulencias del metal. Una de las principales ventajas de la presencia de espinela es la reducción de la penetración de escorias y por consiguiente de la corrosión o el deterioro del refractario. La escoria, cuyos componentes mayoritarios son hierro, calcio y silicio, al estar en contacto con el refractario forma una interfase refractario-escoria donde se llevan a cabo diversas reacciones. A nivel industrial se usan espinelas obtenidas a partir de materias primas sintéticas de alta pureza, lo cual reduce su aplicación debido al alto costo (Wang, 1992). Por lo anterior resultó de interés evaluar el comportamiento de una magnesita natural en la obtención de material de espinela.

Químicamente estos compuestos han sido llamados aluminatos o ferritas. Las espinelas de aluminato de magnesio son óxidos complejos de fórmula general $\{A^{2+}\}^{tet}\{B_2^{3+}\}^{oct}O_4$, donde A es un metal divalente (habitualmente magnesio, hierro, cinc o manganeso), y B es un metal trivalente (aluminio, hierro o cromo);

A nivel mineralógico, la espinela está constituida por una estructura en la que los iones O^{2-} forman un empaquetamiento cúbico compacto con los iones Mg^{2+} y Al^{3+} en los intersticios tetraédricos y octaédricos respectivamente; en particular la mitad de los huecos octaédricos están ocupados por Al^{3+} y un octavo de los lugares

tetraédricos por Mg^{2+} . (Fyfe, 1964). La espinela tiene una gran celdilla unidad cúbica con $a = 8.08 \text{ \AA}$ que contiene ocho unidades fórmula lo que corresponde a $Mg_8Al_{16}O_{32}$.

La espinela se obtiene por sinterización† reactiva de la magnesita y la alúmina cuando se mezclan homogéneamente y se tratan a una temperatura adecuada para que tengan lugar la sinterización y la reacción siguiendo el mecanismo de reacción de Wagner (West, 1985). Para obtener las proporciones de los reaccionantes se utilizó el diagrama de equilibrio de fases ternario $MgO-Al_2O_3-SiO_2$, teniendo en cuenta que el carbonato de magnesio utilizado como materia prima contenía como impureza principal la sílice. El calcio también se encontraba como impureza, pero de acuerdo a la relación molar CaO/SiO_2 , se pueden conocer las temperaturas aproximadas de primera formación de fases líquidas por este concepto. Para conocer las fases que teóricamente deben formarse a la temperatura de sinterización que se usó en el presente trabajo ($1650^\circ C$), se utilizó el diagrama de la Figura 1, el cual representa la sección isotérmica a $1650^\circ C$ del sistema ternario $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ donde se han marcado las áreas de compatibilidad en las que podemos observar que las espinelas ricas en alúmina, en presencia de pequeñas impurezas de sílice, forman fases líquidas, y las ricas en magnesita forma forsterita ($2MgO.SiO_2$). En esta figura los espacios sombreados corresponden a campos de cristalización de una fase primaria y líquido, los cuales son señalados de esta forma para reconocer rápidamente las regiones donde coexisten dos fases.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento de una magnesita, de la vereda de San Pedro de la Sierra en la costa norte de Colombia, para la obtención de un aluminato de magnesio por prensado y posterior sinterización de una mezcla de la magnesita y una alúmina suministrada por Martinswerk (Alemania) y comparar algunas de las propiedades con las de una espinela obtenida a partir de óxido de magnesio reactivo analítico.

† Es la reacción fisicoquímica entre partículas sólidas individuales de un material, mediante la aplicación de una temperatura inferior al punto de fusión, para obtener un producto duro, menos poroso y de menor tamaño.

También puede definirse como un proceso térmicamente activado donde ocurre la densificación de un cuerpo policristalino, con disminución de la energía interfacial. Este proceso se puede llevar a cabo con o sin fase líquida presente.

Sinterización reactiva:

Cuando dos o más reaccionantes se mezclan homogéneamente y a continuación se tratan a una temperatura adecuada para que tengan lugar la sinterización y la reacción. Durante el tratamiento térmico puede aparecer una fase líquida transitoria a baja temperatura que enaltece el proceso tanto de reacción como de sinterización. Cuando hay un solo componente se da la sinterización sin reacción.

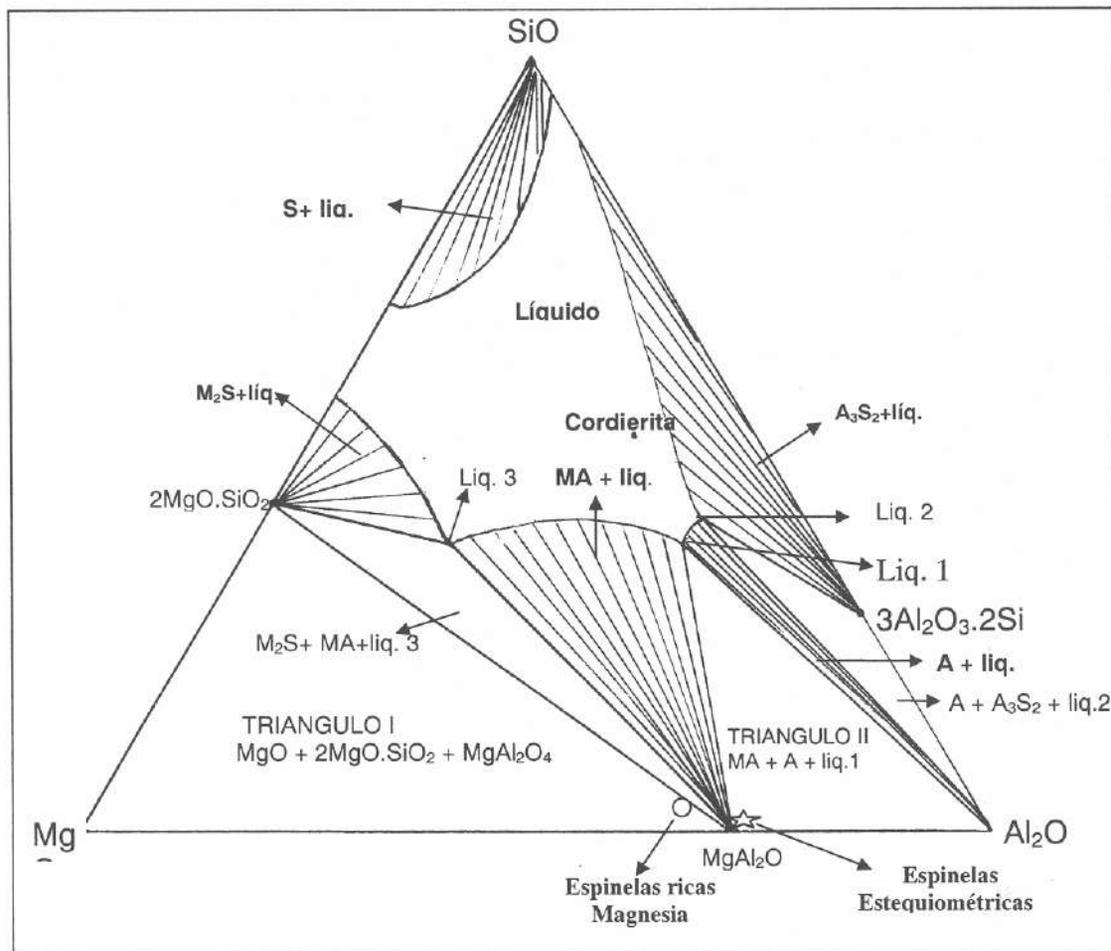
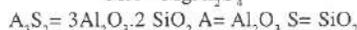
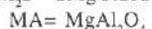
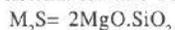


Figura 1. Sección isotérmica a 1650°C, al sistema ternario MgO-Al₂O₃-SiO₂ (Pena, 1998) Nomenclatura:



Líquidos 1, 2 y 3 = Líquidos de composición fija

Metodología

Con el objeto de obtener diferencias en el comportamiento a la sinterización se escogieron mezclas en diferentes proporciones de los reactantes. De acuerdo con la reacción de formación de la espinela: $MgO + Al_2O_3 \rightarrow MgAl_2O_4$, se escogieron dos formulaciones: una en proporciones estequiométricas de magnesia y alúmina (28.32% y 71.67% en peso respectivamente) (estrella en la figura 1) y otra enriquecida en magnesia (40% magnesia – 60% alúmina) (círculo negro en la Figura 1). Estas proporciones se prepararon con la magnesita (carbonato de magnesio), con la magnesia (óxido de magnesio obtenido por calcinación del carbonato) y con el óxido de magnesio reactivo analí-

tico cada uno con alúmina. A las mezclas se realizó análisis dilatométrico para conocer su comportamiento con la temperatura.

En la Tabla 1 se da la composición química y de fases de las materias primas utilizadas para las mezclas y en la Tabla 2, primera fila, se explican e identifican con un número las diferentes mezclas y proporciones de los reaccionantes.

Las condiciones utilizadas para el procesamiento cerámico fueron:

- Tamaño de partícula: D_{80} de los materiales de partida menor de 10 mm

Tabla 1. Composición de las materias primas

TIPO DE ANÁLISIS	MgCO ₃	MgO NATURAL	MgO R.A.	Al ₂ O ₃
Fases por DRX	Carbonato de Magnesio	Periclasa Brucita Forsterita	Periclasa Brucita	α - alúmina
Humedad 105°C, %	0,96	0,66	0,68	< 0,01
P.P.I.* a 1000°C, %	48,17	11,66	11,24	0,05
SiO ₂ , %	4,21	6,80	0,05	0,05
MgO, %	45,24	79,39	87,78	0,10
CaO, %	0,62	1,09	0,01	0,01 - 0,05 _{max.}
Fe ₂ O ₃ , %	0,04	0,10	< 0,01	0,03 _{max.}
Al ₂ O ₃ , %	0,06	0,13	< 0,01	99,71**
Na ₂ O, %	< 0,01	0,02	0,01	≤ 0,1
K ₂ O, %	< 0,01	< 0,01	0,01	-

* Pérdidas por ignición

** Obtenido por diferencia

Composición Química promedio de dos determinaciones para las muestras naturales. Para el Oxido de Magnesio reactivo Analítico y para la Alúmina los valores se tomaron de la ficha técnica.

El contenido de boro (elemento que forma fases líquidas a muy bajas temperaturas) es menor a 0,001%. Este porcentaje fue determinado para una muestra de la misma mina en un trabajo anterior (Mojica, 1997).

- Conformado por prensado uniaxial en seco (humedad aproximada de 6% utilizando carboximetilcelulosa y alcohol polivinílico al 0.1%).
- Presión de conformado: 300 MPa.
- Velocidad de calentamiento: 2°C/min.
- Temperatura de sinterización: 1650°C
- Tiempo de permanencia a 1650°C: 180 minutos

Resultados y discusión

En la Figura 2 se presenta el análisis dilatométrico para una de las mezclas con carbonato de magnesio - alúmina.

En este análisis se observa que hacia los 600°C se inicia una contracción, que coincide con la pérdida del CO₂, lo cual es habitual en los carbonatos (Morrel, 1985). A los 1100°C empieza una expansión debida a la formación de la espinela. Por último a los 1300°C se inicia una densificación como causa de la sinterización que se pro-

longa hasta los 1500°C. Para las otras mezclas la tendencia general es la misma.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 2 para los análisis por DRX, observamos que las fases para cada uno de los conformados concuerdan en general con lo esperado según la sección isotérmica del diagrama tridimensional del sistema MgO-Al₂O₃-SiO₂ (Figura 1), en los triángulos de compatibilidad I y II, que son los triángulos en los cuales se encuentran las formulaciones escogidas (círculo negro para las formulaciones 40% MgO - 60% Al₂O₃ y estrella para las formulaciones en relación estequiométrica). La fase líquida que se espera que aparezca en las formulaciones estequiométricas no se detecta por DRX.

En cuanto a las mezclas preparadas con magnesia reactivo analítico, es decir, donde el contenido de sílice es despreciable, se está trabajando sobre el lado binario de la figura 1 correspondiente al sistema magnesia- alúmina, donde se encuentra la espinela. Para el caso 5 solamente debería haberse detectado la espinela, ya que

DILATOMETRIA

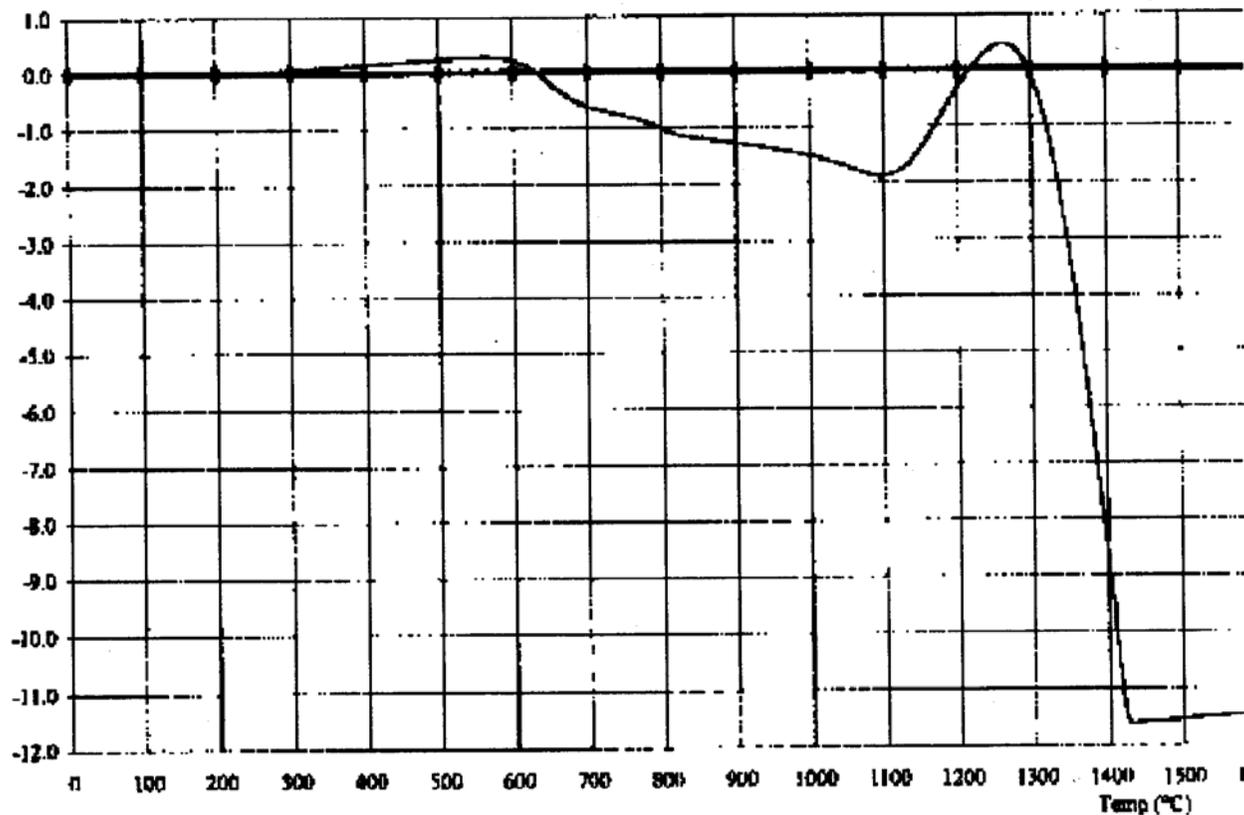


Figura 2. Análisis dilatométrico para la mezcla carbonato de magnesio - alúmina, en proporciones estequiométricas

corresponde al punto de composición estequiométrica de su formación; sin embargo algo de periclasa se detectó en el análisis, lo cual podría atribuirse a una o varias de las siguientes causas: a) que no se haya alcanzado el equilibrio y por tanto la reacción fue incompleta. b) que haya faltado homogenización en la muestra. c) que haya ocurrido segregación durante el proceso. Para la mezcla 6, es decir la enriquecida en magnesia y que por tanto se encuentra ubicada en el diagrama sobre la línea de composición binaria $MgO-MgAl_2O_4$, se comprobó la coexistencia de Periclasa y espinela, tal como se esperaba del diagrama de la figura 1.

Con respecto a los resultados expuestos en la tabla 2, se observa que una vez sinterizadas las mezclas se lograron densidades cercanas a la teórica (densidad teórica de la espinela = $3,55 \text{ g/cm}^3$) (Hurlbut, 1978), lo cual indica que las condiciones de tamaño de partícula, de prensado

y sinterización fueron favorables; además puede decirse que la expansión volumétrica debida a la formación de la espinela no interfirió para lograr densidades, cercanas a la teórica.

Los valores de contracción lineal más bajos se encontraron para los sinterizados 1, 3 y 5, lo cual está de acuerdo con los resultados de absorción de agua y porosidad aparente más altos y las densidades aparentes más bajas. Es decir en estas mezclas se logró una menor densificación. Este efecto se presentó muy marcado para la mezcla 5, para la que se logró apenas un 92,4% de la densidad teórica.

En las mezclas con carbonato de magnesio, donde no hubo una calcinación previa de esta materia prima (1 y 3) se obtuvieron buenos resultados. Esto es importante ya que para la producción de los materiales de espinela podría partirse del carbonato, evitando así un paso interme-

Tabla 2. Ensayos físicos y DRX de los conformados sinterizados

Conformado Análisis	1. MgCO ₃ natural - Al ₂ O ₃ rel. estequiométrica	2. MgCO ₃ natural - Al ₂ O ₃ 40% MgO	3. MgO natural - Al ₂ O ₃ rel. estequiométrica	4. MgO natural - Al ₂ O ₃ 40% MgO	5. MgO R.A. - Al ₂ O ₃ rel. estequiométrica	6. MgO R.A. - Al ₂ O ₃ 40% MgO
DRX	Espínela ^{****} (e) Alúmina ^{***} (e)	Espínela ^{****} (e) Periclasa ⁺ (e) Forsterita ⁺ (e)	Espínela ^{****} (e) Forsterita ⁺ (n.e) Alúmina ⁺ (e)	Espínela ^{****} (e) Periclasa ^{**} (e) Forsterita ⁺ (e)	Espínela ^{****} (e) Periclasa ⁺ (n.e)	Espínela ^{****} (e) Periclasa ^{**} (e)
Contracción lineal, %*	12,7	20,8	17,2	19,6	7,20	21,2
Densidad en crudo g/cm ³	2,48	2,25	2,21	2,04	2,21	2,01
Densidad aparente, g/cm ^{3**}	3,37	3,50	3,35	3,49	3,28	3,44
(% de la densidad teórica)	(94,9)	(98,6)	(94,4)	(98,3)	(92,4)	(96,9)
Absorción de agua, %*	1,51	0,03	0,17	0,02	10,31	0,05
Porosidad aparente, %*	5,09	0,10	0,57	0,07	33,82	0,17

**** Abundante *** Común ** Pobre + Escasa

** Datos promedio de tres determinaciones

(e) Fase esperada según figura 1

* Datos promedio de cinco determinaciones

* y ** Técnicas realizadas según método ASTM C 20 -74

(n.e) Fase no esperada según figura 1

dio de calcinación. Estos datos son similares a los logrados por Bailey y Russell quienes utilizaron carbonato de magnesio reactivo analítico y una temperatura de sinterización de 1640°C (Bailey, 1968).

Las mezclas enriquecidas en magnesia presentaron una contracción lineal mayor, un porcentaje de absorción de agua menor, una porosidad aparente más baja, y las densidades aparentes más altas, lo cual indica que en estas mezclas la sinterización fue mejor. Este hecho se puede explicar si se tiene en cuenta que las propiedades de los sinterizados, también pueden mejorarse con la adición de reguladores del crecimiento de grano. Varios autores han estudiado el efecto de la adición de magnesia en la sinterización de materiales como la alúmina encontrando que aquella facilita los sinterizados de alta calidad. Estos autores, han llegado al consenso de que la magnesia actúa ejerciendo un control sobre el crecimiento normal de los granos de la alúmina a través de una reducción en la movilidad de la frontera de grano. El mecanismo por el cual sucede este fenómeno no está dilucidado aún, pero sí está comprobado este efecto benéfico de la magnesia sobre la sinterización de alúmina. Este mismo efecto puede suceder sobre la sinterización de la espínela. (Handwerker, 1988).

Las velocidades altas de sinterización en la obtención de espínelas ricas en magnesio, se atribuyen a la creación de vacancias en la red que tienen un efecto positivo o acelerante de la sinterización. La presencia de magnesia

en exceso permite la creación de vacancias de sitios de oxígeno en la red, llegándose a obtener una espínela con deficiencia aniónica. (Zografou, 1983).

La presencia de sílice en la magnesia natural, facilita la sinterización por la producción de fases líquidas que actúan como lubricante, favoreciendo el acomodamiento de los granos y la difusión en la frontera de grano. En este sentido algunos autores sugieren que es necesario sinterizar con un contenido de sílice entre el 1 y 2%, lo que permite utilizar temperaturas más bajas de sinterización. Debe tenerse cuidado con contenidos mayores de sílice, pues pueden crearse zonas mecánicamente frágiles en los materiales en trabajo y desmejorar la calidad del producto. (Prasad, 1982) (Zografou, 1983).

La falta de sílice, el tamaño de partícula y la cantidad de magnesia limitada a la necesaria estequiométrica, no favorecieron la sinterización de la mezcla 5. Es posible que para estos reactantes de alta pureza se necesiten temperaturas de sinterización más elevadas.

Conclusiones

El tamaño de partícula con un D_{80} menor 10 mm, la presión de conformado de 300 MPa, la velocidad de calentamiento lenta de 2°C/min favorecieron la sinterización, presentándose diferencia en el comportamiento para las formulaciones escogidas. El exceso de magnesia en las formulaciones 2, 4 y 6 favoreció la cali-

dad de la sinterización, así como también la presencia de sílice en la magnesita natural. Para la formulación 2, en la que se parte de carbonato de magnesio, se obtienen buenos resultados lo cual es importante pues se evita un paso intermedio de calcinación, lo cual reduce los costos del proceso. Es posible que para reactantes de alta pureza (formulaciones 5 y 6) se requieran temperaturas de cocción más elevadas para mejorar la calidad de los sinterizados. Finalmente, puede aseverarse que la magnesita natural de la costa norte de Colombia, es apropiada para la obtención de materiales de espinela, con buenas propiedades físicas y composición de fases.

Bibliografía

- Bailey, J., Russell, R. 1968. "Sintered spinel ceramics". *Ceramic Bulletin*, 47 (11): 1025-1029.
- Fyfe, W.S. 1964. "Geochemistry of solids". 1st ed. McGraw-Hill Book Company. New York.
- Handwerker, C., Blendell, J. 1988 "Ceramic Transactions. Sintering of Advanced Ceramics". National Institute of Standards and Technology. Westerville, Ohio. 13
- Henry, W. and Stendera, J. 1997. "Producing basic refractories for steel applications". *Ceramic Industry*, february : 29-32.
- Mojica, A. 1997. "Estudio de la potencialidad refractaria de algunas magnesitas nacionales". (Tesis de Grado) Universidad Nacional de Colombia. 117 p. Bogotá.
- Morrel, R. 1985. "Handbook of properties & engineering ceramics. Part I. An introduction for the engineer and designer". National Physical Laboratory. New York.
- Pasquier, J., Komarneni, R. and Roy, R. 1991. "Synthesis of $MgAl_2O_4$ spinel: seeding effects on formation temperature". *Journal of Materials Science*, 26, 3797 - 3802.
- Pena, P. 1998. Diagrama elaborado por Pilar Pena y enviado por correo. Instituto de Cerámica y Vidrio. CSIC. Madrid - España.
- Prasad, T., Radovanovich, S. 1982. "Studies on sintering of some natural magnesites and crystal growth of periclase at high temperature". *Trans. Ind. Ceram. Soc.* 21(2): 37 - 48.
- Wang, J., Zhang, L., Ren, X., Zhu, X. and Gao, P. 1992. "Compositions of alumina - magnesia spinel synthesized from natural raw materials". *Interceram*, 41 (1).
- West, A. 1985. "Solid state chemistry and its applications". 1st ed. John Wiley & Sons Ltd. New York.
- Zografou, C., Reynen, P. & Mallinckrodt, D. 1983. "Non-stoichiometry and sintering of MgO and $MgAl_2O_4$ ". *Interceram*. (2): 40-42.

LOS RENACUAJOS COLOMBIANOS DE *SPHAENORHYNCHUS* (HYLIDAE): DESCRIPCIONES, ANOTACIONES SISTEMÁTICAS Y ECOLÓGICAS

por

Ángela M. Suárez-Mayorga¹ & John D. Lynch²

Resumen

Suárez-Mayorga, A. M. & J. D. Lynch: Los renacuajos colombianos de *Sphaenorhynchus* (Hylidae): descripciones, anotaciones sistemáticas y ecológicas. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 25(96): 411-419, 2001. ISSN 0370-3908.

En los alrededores de Leticia *Sphaenorhynchus carneus*, *S. dorisae* y *S. lacteus* coexisten en pantanos de bosque, tanto en tierra firme como en varzea y forman parte de comunidades complejas, compuestas por cerca de diez especies. Sus larvas son neotónicas y se encuentran asociadas a vegetación flotante; se caracterizan por poseer papilas grandes, en varias hileras (a excepción de *S. dorisae*) y tubo anal medial, además de una llamativa coloración verde con gamas de rojo en vida. *Sphaenorhynchus dorisae* presenta una estructura bucal externamente similar al llamado "brazo labial" de *Scarthyla goinorum* o de los *Scinax* del grupo *rostrata*. *Sphaenorhynchus carneus* posee una hilera anterior de denticulos a diferencia de las otras especies, que poseen dos. Se proporcionan datos novedosos sobre biología de las especies.

Palabras clave: Anura, Amazonas, larvas.

Abstract

In the vicinity of Leticia, *Sphaenorhynchus carneus*, *S. dorisae* y *S. lacteus* occur microsympatrically in permanent forest ponds of tierra firme as well as the varzea and form part of a complex community made up of about ten species. Their larvae are nektonic and are found associated with floating vegetation. The larvae are characterized by having multiple rows of large labial papillae (excepting *S. dorisae*) and a median anal tube, as well as distinctive coloration (green with red markings) in life. *Sphaenorhynchus dorisae* has a buccal structure similar to what has been called a "labial arm" in *Scarthyla goinorum* or the *Scinax* of the *rostrata* species group. *Sphaenorhynchus carneus* has a single row of denticles anterior to the beak whereas the other two species have two rows. New data about the biologies of the three species are presented.

Key words: Anura, Amazonas, tadpoles

¹ Bióloga, maestría en Biología - Sistemática. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional.

² Profesor Asociado. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, A.A. 7495 Bogotá, Colombia. asuarez@ciencias.unal.edu.co

Introducción

Tradicionalmente la fauna de ranas amazónicas ha sido una referencia obligatoria cuando se habla de riqueza de especies, v. gr. Santa Cecilia en Ecuador (Crump, 1974). No obstante, son relativamente pocos los trabajos publicados sobre ella (Crump, *op. cit.*, Duellman, 1978, Duellman & Crump, 1974, Hödl, 1977) y más escasos aún los trabajos recientes (Ardila-R. & Ruiz-C, 1997, Duellman & Mendelson, 1995, Rodríguez & Duellman, 1997), en especial considerando la extensión de la cuenca y las fortalezas de los países que tienen acceso a la misma. En el trabajo con larvas la carencia de información es tanto mayor en cuanto a que, existiendo descripciones y claves (Duellman, *op. cit.*, Hero, 1990, Rodríguez & Duellman, *op. cit.*), estas no incluyen más que una mínima parte de las especies y/o carecen de ilustraciones y de series representativas, por lo que es difícil llegar a identificaciones certeras.

Como parte del proyecto "Clave Ilustrada de los Renacuajos Colombianos", en su fase inicial, se realizaron colecciones de larvas y adultos en los alrededores de Leticia (Amazonas, Colombia) en un radio de ca. 15 Km. Como producto de ellas se obtuvieron larvas de *Sphaenorhynchus carneus* (no conocidas previamente), *S. dorisae* y *S. lacteus*, cuyas descripciones, sumadas a información taxonómica, ecológica y sistemática se presentan a continuación.

Materiales y Métodos

Las colecciones se realizaron en abril y julio de 2001, en diferentes puntos a lo largo de la carretera Leticia - Tarapacá (hasta Km 11), los lagos de Yahuaraca y de Tarapoto, por vía fluvial. Se examinaron hábitats diferentes, como pantanos permanentes en bosques de tierra firme, gramalote en Lago de Tarapoto, pantanos naturales y artificiales en zonas intervenidas y zonas de varzea, — éstas únicamente se examinaron en la segunda colección (aguas bajas)—. Las colecciones de adultos y neonatos se hicieron manualmente. Las colecciones de larvas se realizaron en horas de luz, empleando mallas manuales de anjeo (ojo de malla de aproximadamente 1 mm), planas, para muestreos subsuperficiales, ideadas exclusivamente para trabajar los hábitats encontrados.

La identificación taxonómica de las larvas se realizó con base en el seguimiento de series de desarrollo y las colecciones de adultos y neonatos; en caso de duda, las larvas fueron mantenidas en cautiverio hasta el final de la metamorfosis. Todo el material fue fijado y preservado en una solución de formol al 10% y depositado en la Colec-

ción de Anfibios del Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia (ICN). Se realizaron descripciones de color en vida y en preservativo y descripciones morfológicas con base en el material preservado. Para cada descripción se tomaron las características y dimensiones promedio de cinco larvas en estadio 35 de Gosner (1960), que fueron medidas bajo estereoscopio con un calibrador de 0.1 mm de precisión. Para las tablas de crecimiento por estadios se consideraron uno o varios lotes, que serán identificados posteriormente en la descripción de cada especie. Se empleó la nomenclatura de Altig *et al.* (1998) con las siguientes abreviaturas: LC: longitud del cuerpo, AC: anchura corporal, ALL: longitud total, BTMH: altura basal de la musculatura caudal, BTW: anchura basal de la cola, DDH: distancia de medición de DH, DH: altura máxima de la aleta dorsal, DIO: distancia interorbital, DVH: distancia de medición de VH, ED: diámetro del ojo, HC: altura corporal, IN: distancia entre narinas, ND: diámetro máximo de la narina, N-R: distancia narina - extremo rostral, O-N: distancia ojo - narina, O-R: distancia del ojo al extremo rostral, PD: diámetro de la pupila, RS: distancia del espiráculo al extremo rostral, TDO: diámetro transversal del disco oral, TH: altura máxima de la cola, TL: longitud de cola, TL%: porcentaje de TL respecto a la longitud total, VH: altura máxima de la aleta ventral. Todas las dimensiones se encuentran en milímetros.

Resultados

Sphaenorhynchus carneus (Cope)

Larvas pequeñas, 25.7 mm de longitud (véase Tabla 1 para variación). Cuerpo de constitución moderada, globular (BH/AC = 1.0), redondeado, ligeramente deprimido anteriormente en aspecto dorsal y ovoide, casi triangular en aspecto lateral, que ocupa casi 1/3 de la longitud total. Ojos grandes pero no protuberantes (ED = 1.2, ED/BH = 0.3, ED/AC = 0.3), dorsolaterales (DIO = 2.3, DIO/AC = 0.6); narinas ovaladas, grandes (ND = 0.4), dorsolaterales (IN/AC = 0.5), inclinadas anteriormente y ubicadas más cerca del ojo que del extremo rostral (O-R = 1.7, O-N: 1.0, N-R = 0.7); espiráculo sinistral, moderadamente largo, adpreso al cuerpo salvo en su extremo posterior y ubicado en la mitad posterior del cuerpo (RS/LC = 0.7), por debajo de la línea media de la musculatura caudal; tubo cloacal largo y medial. Cola larga (TL = 17.5, 70.3% de la longitud total), tan alta como el cuerpo (TH/BH = 1), simétrica (DH = VH = 1.5; DDH = 8.8, DVH = 9.8), con musculatura poco desarrollada (BTW = 1.9, BTMH = 2.9), terminada en punta, con un ángulo amplio y sin filamento (Fig. 1)

Disco oral anteroventral, mediano, (TDO = 1.7, TDO/AC = 0.4), no emarginado, bordeado por aparentemente tres hileras de papilas: una hilera exterior, formada por papilas grandes y triangulares, con una interrupción anterior casi tan grande como A1; una hilera intermedia, lateral y ventral de papilas subtriangulares a cilíndricas y una hilera interna, visible sobre todo en el labio posterior, de papilas pequeñas y redondeadas (tal vez papilas submarginales). Fórmula dental 1/2-3 (1), aunque la hilera P3 no se encuentra queratinizada en la mayoría de los individuos y 28% de los individuos considerados no la presentan, indiferentemente del estadio en que se encuentren; el espacio en P1 es amplio, en muchos casos casi tan amplio como P2, que usualmente se encuentra sólo en el centro del labio; pocos individuos en estadios inferiores presentan un espacio diminuto en P2. Picos córneos queratinizados, con serraciones finas; el superior en forma de dos colinas y el inferior en forma de U abierta. (Fig. 1).

La coloración en vivo presenta un llamativo patrón de una línea media roja en la musculatura caudal, con deri-

vaciones menos nítidas hacia las aletas sobre un fondo verde translúcido, más fuerte hacia la región cefálica. Cuerpo verde dorsalmente con una línea *canthal* roja; ventralmente son muy evidentes dos franjas púrpura longitudinales, una a cada lado de la región gular y abdominal anterior, mientras que el vientre es rojo fuerte al igual que el tubo anal. En preservativo, las líneas rojas adquieren un tinte café rojizo, las aletas se hacen transparentes y la musculatura, crema pálido. La presencia de las franjas ventrales es diagnóstica para la especie y se mantiene en todos los estadios.

Machos cantando fueron recolectados tanto durante el día como en la noche; sin embargo, nuestra impresión es que la actividad es mucho más fuerte en las horas de luz, por lo que consideramos la especie principalmente crepuscular; de hecho, casi todas nuestras colecciones de esta especie se realizaron cuando coleccionábamos renacuajos hacia el final de la tarde. Una hembra coleccionada el 18 de abril depositó huevos no fertilizados, afuera del agua en una bolsa de plástico; los huevos eran

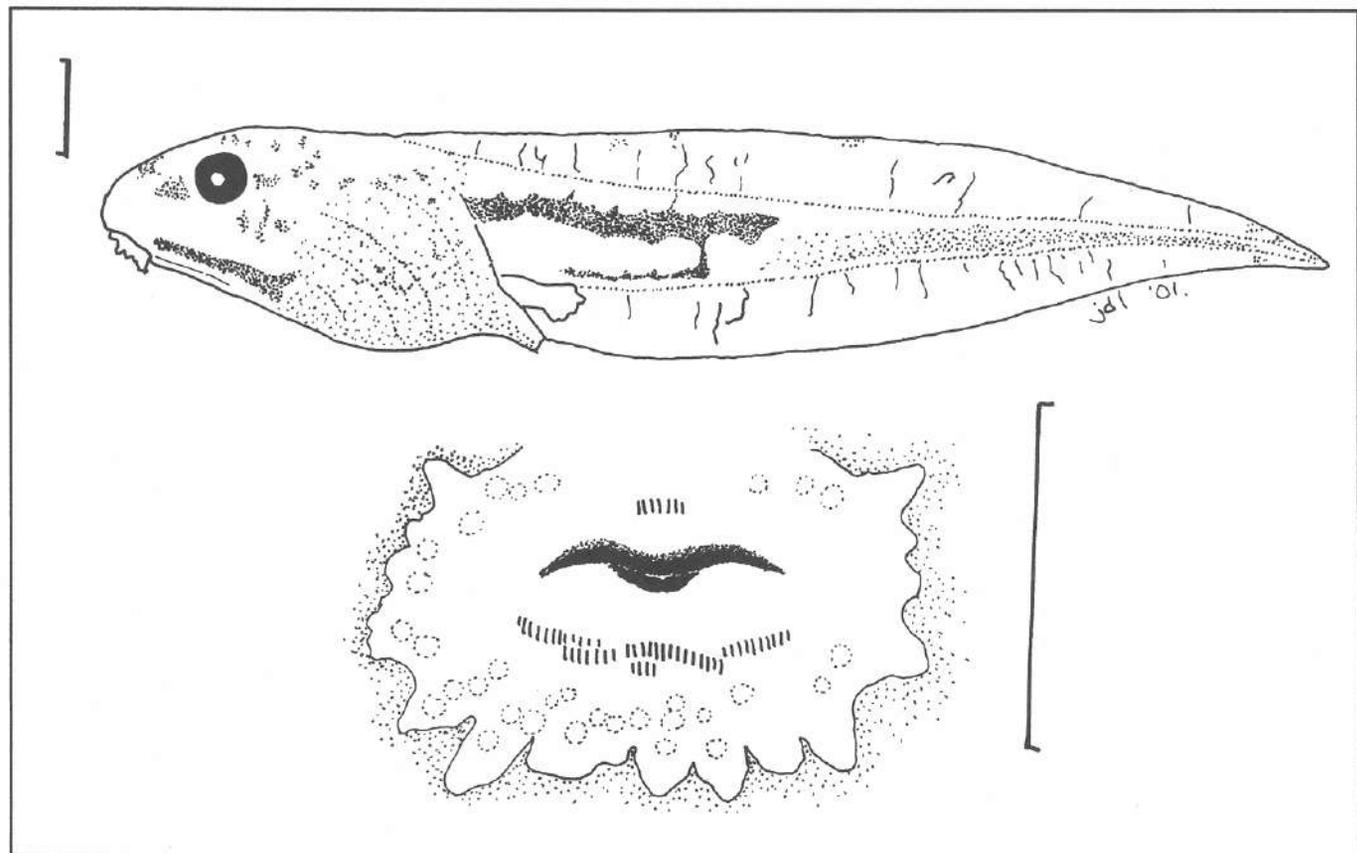


Figura 1. (Arriba) renacuajo de *Sphaenorhynchus carneus*, (bajo) detalles del disco oral. ICN 45635. Escala arriba 2 mm, bajo 1 mm.

verde pálido antes de ser preservados. No obstante, cuatro meses después cada huevo presenta un punto café en líquido preservativo.

Material examinado: Lote ICN 45635, 73 individuos, Amazonas: Leticia: Lago Yahuaraca.

Sphaenorhynchus dorisae (Goin)

Tamaño moderadamente grande, 39.8 mm de longitud total (véase Tabla 2 para variación). Cuerpo macizo, de aspecto ligeramente deprimido aunque globular en dimensiones (BH/ AC = 0.9), ovalado anteriormente en aspecto dorsal y lateral, que ocupa menos de 1/3 de la longitud total. Ojos de tamaño mediano, no protuberantes (ED = 1.5, ED/ BH= 0.2, ED/ AC = 0.2), dorsolaterales

Tabla 1. Variación en dimensiones de larvas de *Sphaenorhynchus carneus* por estadios, entre paréntesis el promedio cuando N ³ 3. E= estadio de Gosner (1960), N= número de ejemplares; unidades y otras abreviaturas de acuerdo con la sección de Materiales y métodos.

E	N	LC	ALL	TL%	HC
25	4	5.1-5.6 (5.4)	14.8-17.6 (15.8)	65.9	3.3-3.6 (3.5)
26	7	6.4-8.3 (7.3)	19.1-25.4 (22.3)	67.4	3.7-4.5 (4.2)
27	4	6.8-8.0 (7.4)	20.4-26.7 (24.5)	69.5	4.0-4.9 (4.5)
28	7	7.4-8.2 (7.9)	14.0-26.7 (22.6)	62.4	4.4-5.3 (4.7)
29	3	8.4-8.7 (8.5)	29.1-30.0 (29.7)	71.2	4.7-5.1 (4.9)
30	2	8.3-9.7	28.9-31.0	70.0	5.1-5.8
31	2	8.7-9.8	27.5-30.7	70.0	4.9-5.3
32	3	9.4-11.0 (10.2)	31.6-34.1 (32.7)	68.8	5.2-6.5 (5.7)
33	3	10.5-11.0 (10.6)	28.3-37.4 (33.7)	68.0	5.7-6.4 (6.2)
34	3	11.2-11.5 (11.3)	38.3-39.5 (38.8)	70.8	6.6-7.1 (6.9)
35	11	10.7-12.0 (11.5)	37.5-41.7 (39.8)	71.1	6.5-7.4 (7.0)
36	5	12.0-12.7 (12.4)	41.5-46.0 (43.3)	71.3	6.9-8.0 (7.4)
37	3	11.5-13.0 (12.3)	41.8-46.1 (43.8)	72.0	7.2-8.0 (7.5)
38	2	13.4-14.1	45.6-47.4	70.4	7.9-8.4
39	1	14.5	48.9	70.3	7.6
40	5	12.2-13.4 (12.8)	37.3-50.0 (45.3)	71.5	7.0-7.8 (7.5)
41	2	12.7-13.3	46.4-51.3	73.3	6.4-7.4
42	2	11.6-14.3	44.8-46.4	71.5	6.1-6.4
43	1	13.9	40.1	65.3	5.3
45	1	12.6	16.9	25.2	4.2

* Uno de los individuos con cola incompleta

Tabla 2. Variación en dimensiones de larvas de *Sphaenorhynchus dorisae* por estadios; entre paréntesis el promedio cuando N \neq 3. E= estadio de Gosner (1960), N= número de ejemplares; unidades y otras abreviaturas de acuerdo con la sección de Materiales y métodos

E	N	LC	ALL	TL%	HC
26	4	4.5-5.3 (5.0)	14.4-15.6 (14.9)	66.8	2.6-3.0 (2.8)
27	5	5.0-5.5 (5.2)	14.4-17.1 (16.0)	67.3	2.6-3.2 (2.9)
28	8	5.1-5.8 (5.4)	14.3-19.1 (17.1)	67.7	2.7-3.2 (3.0)
29	2*	5.9-6.0	18.4-19.3	68.6	3.2-3.4
30	6	5.8-6.8 (6.3)	15.8-22.1 (19.7)	68.0	3.2-3.9 (3.4)
31	6	6.4-7.1 (6.7)	19.6-27.7 24.1	71.8	3.4-4.3 (3.8)
32	3	6.9-7.4 (7.1)	20.9-23.9 (22.3)	68.1	3.1-3.9 (3.6)
33	5	6.9-7.4 (7.1)	18.3-23.6 (23.0)	69.1	3.8-4.3 (4.0)
34	14	6.7-7.8 (7.4)	18.2-25.7 (24.1)	69.4	3.7-4.3 (4.1)
35	9	7.0-7.9 (7.5)	22.7-25.9 (26.2)	70.3	3.9-4.6 (4.2)
36	5	7.6-8.5 (7.9)	25.0-27.0 (26.0)	69.6	4.3-5.0 (4.6)
37	2*	8.2-8.5	23.0-28.0	66.5	4.7-5.2
38	3	8.3-8.6 (8.4)	27.3-30.3 (29.2)	71.1	4.7
42	1	9.2	15.2	39.5	3.3

(DIO = 4.1, DIO/ AC = 0.5); narinas ovaladas, más bien pequeñas (ND = 0.5), dorsolaterales (IN/ AC = 0.5), ubicadas mucho más cerca del ojo que del extremo rostral (O-R = 3.2, O-N: 1.4, N-R = 1.8); espiráculo sinistral, largo, casi completamente adpreso al cuerpo, orientado posterodorsalmente y ubicado en el tercio posterior del cuerpo (RS/ LC = 0.7), al nivel de la línea media de la musculatura caudal; tubo cloacal largo y medial. Cola larga (TL = 28.3, 71.1% de la longitud total), tan alta como el cuerpo (TH/ BH = 1.0), de profundidad y dimensiones muy variables, tanto entre estadios como dentro de éstos; la aleta ventral más alta que la dorsal pero la altura máxima se encuentra a diferentes distancias del extremo corporal, por lo que tiene un aspecto casi simétrico (DH = 1.8, DDH = 12.9, VH = 2.3; DVH = 10.0); musculatura poco desarrollada (BTW = 3.2, BTMH = 4.2); ápice caudal agudo, no filamentosos.

Disco oral anteroventral, poco prominente (TDO = 2.0, TDO/ AC = 0.3), sin escotaduras, bordeado por una hilera de papilas pequeñas, cilíndricas, desordenadas, muy pigmentadas y diferentes a las de las otras especies, colocadas en los bordes laterales y ventral del disco oral; hay

una interrupción medial de las papilas en el labio inferior que da paso a una proyección del mismo, similar al "brazo labial" de *Scarthyla goinorum* y otra estructura con el mismo nombre registrada para algunas especies del grupo *rostrata* de *Scinax*, sobre el que se ubica la hilera P3; papilas submarginales presentes en un individuo. Fórmula dental 2 (2)/3 (1), el espacio en A2 tan grande como el pico córneo superior y un espacio de 5 o 6 dentículos en P1 (Fig. 2); en un individuo existe también un espacio grande en P2.

En vida los renacuajos se caracterizan por su vientre blanco anteriormente y rosado posteriormente y la presencia de puntos café (no líneas) sobre las aletas, que son de color rosa translúcido, además de puntos o motas separadas café sobre la musculatura caudal. El iris es blanco-plateado, algunas veces con tenues reticulaciones grisáceas. En preservativo, la musculatura caudal se torna crema y las punteaduras, café rojizo. El dorso está fuertemente moteado de café oscuro con una mancha en forma de pala color sepia, mientras que el vientre mantiene un tinte rosáceo; el vientre posterior y el tubo anal son rosado fuerte. En algunos individuos jóvenes se evidencian

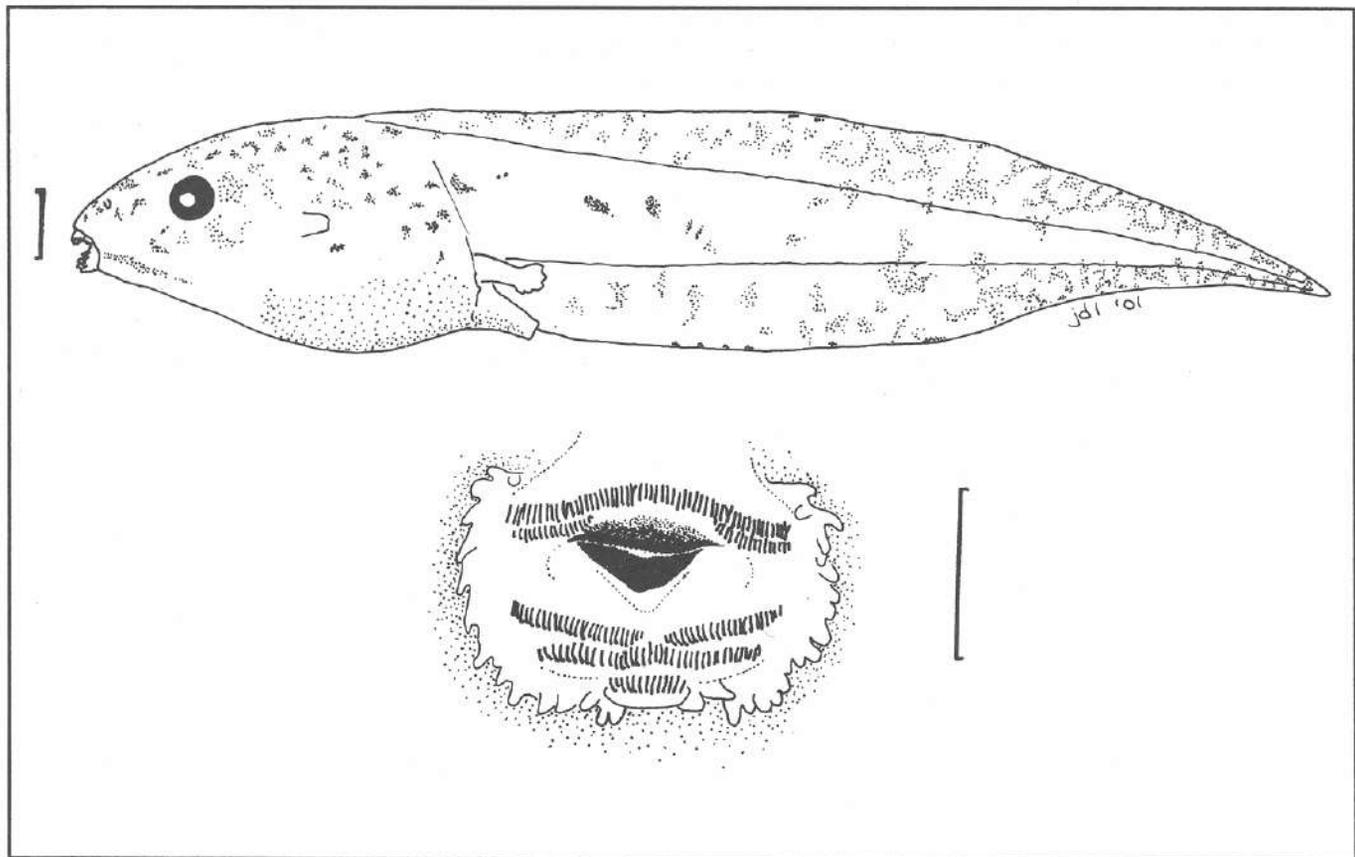


Figura 2. (Arriba) renacuajo de *Sphaenorhynchus dorisae*, (bajo) detalles del disco oral. ICN 45612. Escala arriba 2 mm, bajo 1 mm.

franja estrecha rosa pálido en vivo, similares a las de *S. carneus*, pero son perfectamente distinguibles por el tamaño y constitución. Si bien recolectamos esta especie en todos los sitios donde recolectamos las otras dos, fue mucho más común en las áreas de varzea de Yahuaraca, así como entre el buchón aledaño al gramalote. Una larva mantenida en cautiverio a temperatura ambiente (30°, aproximadamente) desde el estadio 33 de Gosner completó su metamorfosis en seis días.

Material examinado: Lotes ICN 45612, 70 individuos, ICN 45615, un individuo, Amazonas: Leticia: Quebrada Yahuaraca; e ICN 45617, 4 individuos, Amazonas: Puerto Nariño: Lagos de Tarapoto.

Sphaenorhynchus lacteus (Daudin)

Renacuajos moderadamente grandes, 40.0 mm de longitud total, con variaciones notorias en las dimensiones dentro de estadios (Tabla 3) y entre sitios de colección. Cuerpo robusto, tan alto como ancho (BH/ AC = 0.9), en

aspecto dorsal levemente deprimido y ovalado en aspecto lateral, que corresponde a la tercera parte de la longitud total. Ojos de tamaño medio, no protuberantes (ED = 1.7, ED/ BH = 0.3, ED/ AC = 0.2), dorsolaterales (DIO = 4.3, DIO/ AC = 0.6); narinas ovaladas, pequeñas (ND = 0.5), ubicadas dorsolateralmente (IN/ AC = 0.6), con una pequeña inclinación anterior, casi equidistantes del ojo y el extremo rostral (O-R = 3.0, O-N = 1.6, N-R = 1.4); espiráculo dispuesto posteriormente (RS/ LC = 0.7), sinistral, largo, adpreso al cuerpo salvo en su extremo posterior, orientado posterodorsalmente, casi al nivel de la línea media de la musculatura caudal; tubo cloacal largo y medial. Cola fuerte, larga (TL = 27.5, 69% de la longitud total), muy vistosa y de líneas pronunciadas, ligeramente más alta que el cuerpo (TH/ BH = 1.2), de aspecto asimétrico a pesar de las dimensiones similares de las aletas (DH = 2.4, VH = 2.6; DDH = 10.3, DVH = 9.5), la musculatura moderadamente desarrollada (BTW = 3.6, BTMH = 4.2), y terminada normalmente en un filamento delgado y corto, aunque de apariencia muy variable (Fig. 3).

Disco oral anteroventral, pequeño, (TDO = 2.2, TDO/AC = 0.3), no emarginado, bordeado por dos hileras de papilas: la exterior con papilas muy grandes y triangulares, espaciadas, interrumpida anteriormente por un espacio equivalente a A1; la hilera inferior de papilas pequeñas, casi esféricas. Pico córneo superior en forma de meseta, casi cuadrado, muy amplio y robusto, muy finamente aserrado; pico inferior en forma de V abierta. Fórmula dental 2/3 (1), la hilera P3 pequeña, en el centro del

labio pero no colocada sobre ninguna estructura particular; el espacio en P1 es estrecho, de aproximadamente 4 denticulos, P2 es tan larga como P1 (Fig. 3).

En vida las larvas tienen el cuerpo púrpura oscuro, moteado de plateado en los flancos y dorado en ocasiones (son las larvas más oscuras de las tres especies). La gula es gris clara con pecas café y blanco; el vientre es morado oscuro. El iris es amarillo intenso. En preservati-

Tabla 3. Variación en dimensiones de larvas de *Sphaenorhynchus lacteus* por estadios; entre paréntesis el promedio cuando N³ 3. E= estadio de Gosner (1960), N= número de ejemplares; unidades y otras abreviaturas de acuerdo con la sección de Materiales y métodos

E	N	LC	ALL	TL%	HC
25	5	4.1-7.2 (5.0)	12.0-14.3 (13.3)	66.1	2.2-4.4 (2.8)
26	6	5.6-7.9 (6.5)	15.7-25.1 (19.5)	66.2	3.2-4.6 (3.8)
27	7	6.3-9.1 (8.0)	20.5-29.0 (24.6)	67.6	3.8-5.2 (4.5)
28	4	8.1-10.6 (9.7)	26.3-32.3 (30.1)	68.6	4.3-6.3 (5.5)
29	2	10.2-10.4	33.1-33.8	69.1	5.7-5.8
30	1	9.4	30.0	68.7	5.2
31	2*	11.0-11.5	30.8	64.3	6.4
32	2	10.6-12.0	34.3-38.1	68.8	6.0-6.6
33	1	10.8	36.6	70.5	6.1
34	3	11.5-12.0 (11.7)	37.8-39.0 (38.6)	69.6	6.6-7.3 (6.9)
35	5*	10.9-13.2 (12.1)	38.5-41.3 (40.0)	71.4	5.8-7.8 (6.4)
36	4	13.2-14.4 (14.0)	42.0-49.3 (47.3)	71.0	8.0-9.1 (8.6)
37	1	14.6	48.5	70.0	8.4
38	3	13.8-14.3 (14.1)	42.1-50.5 (47.5)	70.1	7.2-8.7 (8.0)
39	1	14.4	52.0	72.3	8.2
40	2	13.4-15.2	50.3-51.5	71.9	7.1-8.0
41	1	13.9	48.1	71.1	6.4
42	1	14.1	54.6	74.3	7.7
44	1	17.6	39.2	55.2	6.3

* Uno de los individuos con cola incompleta

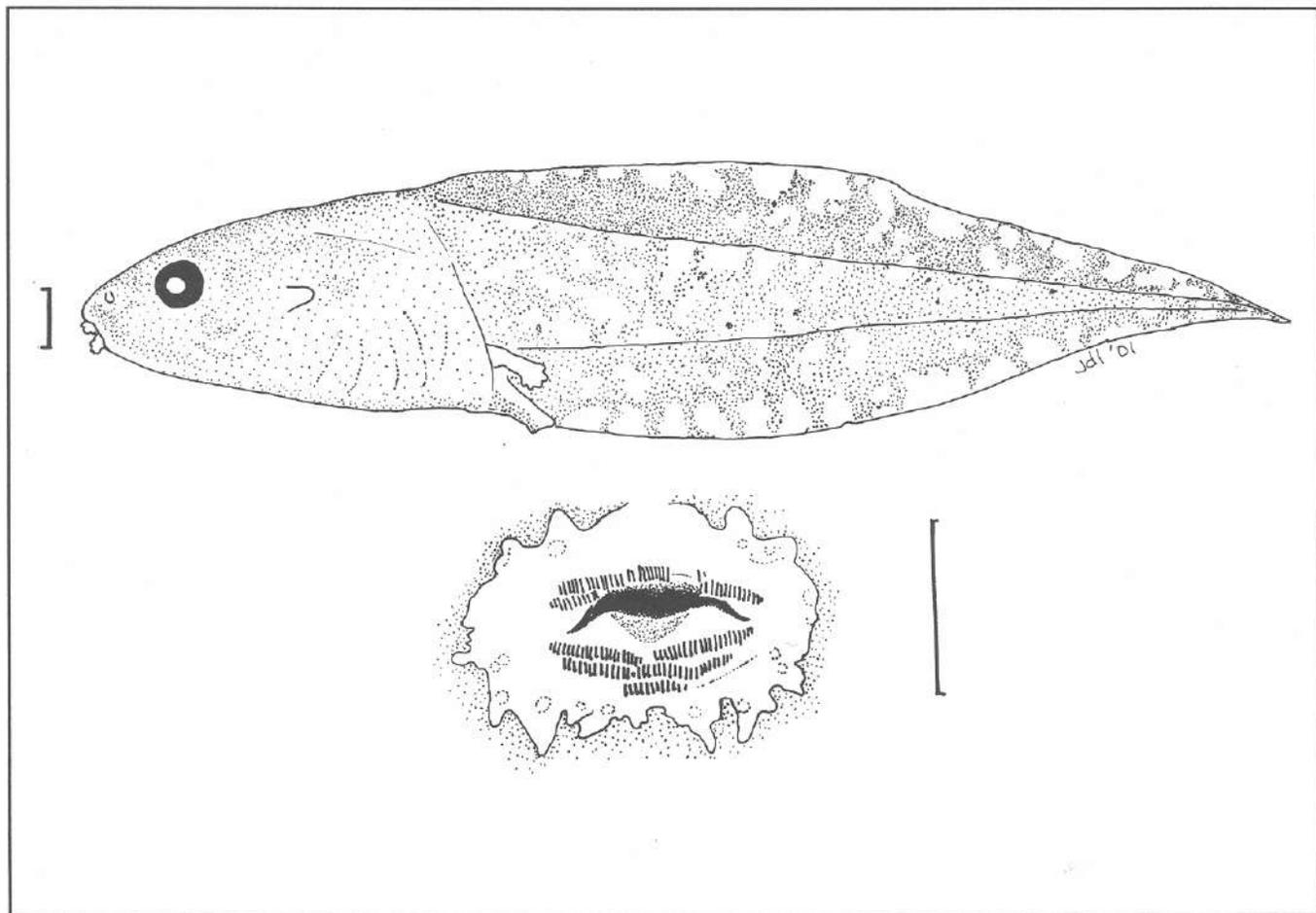


Figura 3. (Arriba) renacuajo de *Sphaenorhynchus lacteus*, (bajo) detalles del disco oral. ICN 45627. Escala arriba 2 mm, bajo 1 mm.

vo, el dorso es crema, fuertemente moteado de café, se evidencia una franja café oblicua desde el borde posterior del ojo hacia el flanco ventral. El vientre posterior es crema translúcido y anteriormente es rosado translúcido con crema y algunas motas café. El tubo anal anteriormente y las barras de la cola se tornan café. Esta coloración es muy similar, tanto en gama como en patrón a la de las larvas de *Hyla lanciformis*, pero se diferencian a simple vista por el tinte púrpura del cuerpo en *Sphaenorhynchus lacteus* (versus negro o café muy oscuro en *H. lanciformis*), su forma globular (deprimido en *H. lanciformis*) y la posición del disco oral (ventral en *H. lanciformis*), además del color rojizo en las barras de la cola (vs. negro en *H. lanciformis*). Dado que en varias ocasiones se recolectaron larvas grandes de *H. lanciformis*

Tabla 4. Regeneración de la cola en las tres especies de *Sphaenorhynchus* colombianas dentro del material examinado. E = estadio, N = número de ejemplares, TL = longitud de la cola, R = longitud de la cola regenerada. Dimensiones en milímetros.

E	S. carneus			S. dorisae			S. lacteus		
	N	TL	R	N	TL	R	N	TL	R
40				1	32,6	24,6			
37	1	17,0	14,6						
35							1	27,5	14,0
34	2	16,1	11,9						
33	1	14,9	11,5	1	23,1	17,9			
32				1	22,4	23,1			

junto con larvas de *S. lacteus*, y ambas, además del patrón, comparten el tamaño moderadamente grande, la constitución fuerte y la reducción en longitud de la hilera de dentículos P3, creemos que podrá existir una mezcla de especímenes en la breve reseña de la larva de *S. lacteus* hecha por **Rodríguez & Duellman** (1997) y su descripción de color corresponde a un individuo de *H. lanciformis*.

Material examinado: Lotes ICN 45625, 2 ejemplares, ICN 45626, 2 ejemplares, Amazonas: Leticia, carretera Leticia a Tarapacá, Km 2, base militar, estación piscícola Corpoamazonia; ICN 45627, 19 ejemplares, finca Magally, Km 4; ICN 45630, 7 ejemplares, ICN 45632, 22 ejemplares, Leticia, Quebrada Yahuaraca; e ICN 45634, 5 ejemplares, Amazonas: Puerto Nariño: Lagos de Tarapoto.

Discusión

Previas a este trabajo, únicamente existen descripciones detalladas de *Sphaenorhynchus orophilus*, además de los apuntes breves hechos por **Rodríguez & Duellman** (1994) sobre *S. dorisae* y *S. lacteus*. Sin embargo, es evidente que *S. orophilus* no es una especie representativa del género y difiere tanto en morfología como en ecología de las especies tratadas por nosotros. **Altig & McDiarmid** (1999), con base en las descripciones de *S. orophilus* proponen que *Sphaenorhynchus* forma parte del gremio ecomorfológico léntico y béntico; no obstante, en las tres especies amazónicas los renacuajos se encuentran pegados a las raíces de vegetación flotante (buchón) y bajo películas de algas filamentosas, nunca en el fondo; además, hemos coleccionado las tres especies conviviendo en el mismo microhábitat de "charcos" desde 0.5 m de profundidad hasta 5 u 8 m de profundidad (en los Lagos, al borde del gramalote), el cual comparten, excepto en los bosques de tierra firme, con larvas de *Scarthyla goinorum* (a diferencia de lo registrado por **Duellman & De Sá**, 1988), entre otras especies. Todos los sitios de muestreo fueron abundantes en predadores —náyades de Odonata y peces—, lo cual, probablemente, se manifiesta en la alta incidencia de mutilaciones en las colas (15% de las larvas de *S. carneus* y *S. lacteus* examinadas, mientras que sólo hay un 6% de larvas mutiladas en *S. dorisae*), especialmente en estadios inferiores de desarrollo (estadios 25 – 32 de **Gosner**, 1960). Las mutilaciones pueden regenerarse aceptablemente y la regeneración es distinguible puesto que carece de pigmentación, pero difícilmente alcanza su tamaño original (Tabla 4).

El resto de la descripción de **Altig & McDiarmid** (*op. cit.*) concuerda casi completamente con nuestras observaciones sobre las especies grandes (*S. dorisae* y *S. lacteus*), salvo que ambas tienen las narinas más cerca del ojo que del extremo rostral. Es de resaltar la particularidad de *S. carneus*, que siendo casi la mitad de las otras especies, posee narinas tan grandes como las de ellas; además, sólo tiene una hilera anterior de dentículos y casi la cuarta parte de las larvas carece de hilera P3. Más interesante es el hallazgo de una proyección en el labio inferior de *S. dorisae*, que bien podría ser llamada "brazo labial" como se ha hecho con *Scarthyla goinorum* y los *Scinax* del grupo *rostrata*. La anatomía interna de estas estructuras se encuentra actualmente bajo estudio por el primer autor, pero existe una fuerte sospecha de que no son homólogas para los tres grupos.

Durante nuestras colecciones trabajamos en cuerpos de agua de los kilómetros 2 (Estación Piscícola de Corpoamazonia), 4 (canal en la finca Magally) y 4.4 de la carretera Leticia – Tarapacá, los Lagos de Tarapoto, Lagos de Yahuaraca y el bosque aledaño a la Quebrada Yahuaraca. Los primeros tres sitios corresponden a tierra firme y los restantes, a varzea. Aunque *Scarthyla goinorum* no llega a bosques de tierra firme, la comunidad de renacuajos en todos estos sitios parece la misma y el núcleo consiste en *Hyla haraldschultzi*, una a tres especies de *Hyla* del grupo *leucophyllata* (*H. bifurca*, *H. leucophyllata* y *H. triangulum*), *Scarthyla goinorum*, *Scinax garbei* y las tres especies de *Sphaenorhynchus*. Otras especies coleccionadas en estos sitios incluyen *Hyla brevifrons*, *H. lanciformis*, *H. leali*, *H. microderma*, *H. parviceps*, dos especies de *Hyla* no identificadas y *Scinax ruber*.

Agradecimientos

La División de Investigaciones – Sede Bogotá (DIB) de la Universidad Nacional de Colombia proporcionó financiación parcial para este proyecto (803649). La Sede Leticia de la Universidad Nacional de Colombia y su director, Germán Palacio, nos acogieron durante nuestra permanencia en la zona. La ayuda logística de Carlos Pinto, Gabriel Ruiz, Héctor Cuello, Pablo Palacio, Santiago Duque, Senecio Migua y especialmente, Héctor (Sancocho) Castillo, fue muy importante para nuestras colecciones. Los permisos de colección y transporte del material fueron otorgados por Jorge Canchala. Finalmente, agradecemos a la gente de la comunidad Jitoma y Huitoto del Km 11 por su hospitalidad.

Bibliografía citada

Altig, R. & R. W. McDiarmid. 1999. Diversity/ Familial and generic characterizations, pp. 295-337, En **McDiarmid, R. W. & R.**

- Altig (eds.) Tadpoles/ The Biology of Anuran Larvae. University of Chicago Press.
- Altig, R., R. W. McDiarmid, K. A. Nichols & P. A. Ustach. 1998. A key to the anuran tadpoles of the United States and Canada. Contemporary Herpetology Information Series (2): 1-53.
- Ardila-Robayo, M. C. & P. M. Ruiz-Carranza. 1997. Herpetología (Anfibios/ Reptiles), pp. 255-264. En Zonificación Ambiental para el Plan Modelo Colombo-Brasilero (Eje Apaporis-Tabatinga: PAT). Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.
- Crump, M. 1974. Reproductive strategies in a tropical anuran community. University of Kansas, Museum of Natural History, Miscellaneous Publication (61): 1-68.
- Duellman, W. E. 1978. The biology of an equatorial herpetofauna in Amazonian Ecuador. Museum of Natural History, University of Kansas, Miscellaneous Publication (65): 1-352.
- Duellman, W. E. & M. L. Crump. 1974. Speciation in frogs of the *Hyla parviceps* group in the upper Amazon Basin. Occasional Papers, Museum of Natural History, University of Kansas (23): 1-40.
- Duellman, W. E. & R. O. De Sá. 1988. A new genus and species of South American hylid frog with a highly modified tadpole. Tropical Zoology 1: 117-136.
- Duellman, W. E. & J. R. Mendelson III. 1995. Amphibians and reptiles from northern Departamento Loreto, Peru: taxonomy and biogeography. University of Kansas Science Bulletin 55: 329-376.
- Gosner, K. L. 1960. A simplified table for staging anuran embryos and larvae with notes on identification. Herpetologica 16: 183-190.
- Hero, J-M. 1990. An illustrated key to tadpoles occurring in the Central Amazon rainforest, Manaus, Amazonas, Brasil. Amazoniana 11: 201-262.
- Hödl, W. 1977. Call differences and calling site segregation in anuran species from Central Amazonian floating meadows. Oecologia 28: 351-363.
- Rodríguez, L. O. & W. E. Duellman. 1994. Guide to the frogs of the Iquitos Region, Amazonian Peru. University of Kansas, Natural History Museum, Special Publication (22): 1-80, pls. 1-12.

LA CORTEZA DE QUILLAY (*QUILLAJA SAPONARIA* MOL.), UN RECURSO DE LA FARMACOPEA INTERNACIONAL

por

Gloria Montenegro^{1,2}, Raúl C. Peña¹ & Bárbara N. Timmermann²

Resumen

Montenegro, G., Peña, R. C., & B. N. Timmermann. La corteza de quillay (*Quillaja saponaria* Mol.), un recurso de la farmacopea internacional. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 25(96): 421-427, ISSN 0370-3908.

La corteza de quillay es un recurso de la farmacopea internacional. Se entregan los antecedentes farmacognósticos para una caracterización de la droga que se obtiene de *Quillaja saponaria* Mol.

Palabras claves: *Quillaja saponaria*, corteza de quillay, Chile, anatomía, farmacopea.

Abstract

The bark of quillay (*Quillaja saponaria* Mol.), a resource of the international pharmacopoeia. Historical pharmacological knowledge is evaluated to provide a characterization of the drug derived from *Quillaja saponaria* Mol.

Key words: *Quillaja saponaria*, bark, Chile Anatomy, pharmacopoeia.

Introducción

Quillaja saponaria Molina o quillay, es un árbol de las Rosaceae de Chile. El nombre *Quillaja* viene del vernáculo *quillai* que es una modificación de la palabra *quillean*, que significa lavar. El nombre coloquial hace referencia a la saponinas detergentes presentes en la cor-

teza. Es un árbol siempreverde delgado, erecto de 15 m. De alto con ramas péndulas. Las hojas verdes ovales de 2-4 cm long. y de 1-2,5 cm de ancho, márgenes ligeramente dentados y que se hacen casi enteros hacia la base. Flores blanquecino-ebúrneas estrelladas, de una 1-1,5 mm de diámetro; se producen libremente en los extremos de las ramas durante octubre a enero (Mayo a Junio en el hemisferio

1 Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ciencias Vegetales, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Av. Vicuña Mackenna 4860, Casilla 306, Santiago-22, Chile

2 Department of Pharmacognosy and Toxicology, College of Pharmacy, The University of Arizona, Tucson 85719 U. S. A.

norte) (Fig 1). El fruto un polifolículo constituido por 5 lóbulos bivalvos coriáceos (1,3 cm de largo) que maduran en el otoño, mide unos 2-5 cm de diámetro. Las semillas numerosas, comprimidas, de 5-7 mm de largo, 1-2 mm de ancho, terminadas en alas membranáceas de 6-7 de largo y 4-5 mm de ancho.

El árbol, *Quillaja*, es resistente al frío, soporta inviernos crudos. Es tolerante a suelos adversos y soporta condiciones de sequía pero se ve mucho mejor cuando se le da irrigación regular de profundidad o cuando se planta en un prado. Las plantas jóvenes tienden a ser arbustivas y necesitan poda ocasional cuando joven pero eventualmente forman árboles angostos, casi columnares que son ideales para confines angostos. Otro uso es para un seto alto.

Junto con sus características ornamentales el quillay posee varias virtudes adicionales (Anónimo 1995). Una que se puede explotar mientras todavía posee características ornamentales es que este árbol es atractante para insectos benéficos. Cornflower Farms of Elk Grove, California ha estado comercializando este árbol como una "Planta de insectos Beneficiosos", que atrae al jardín insectos tales como neurópteros, sírfidos (*Scaeva pyrastris*, *Eupeodes volucris*, *Metasyrphus* spp., *Melanostoma*), cochinelidos y avispas (Bugg 1992).

El otro atributo tiene que ver con las sustancias presentes en la corteza que ha causado tanto revuelo médico como también ha puesto a la planta en las listas de plantas tóxicas. *Quillaja saponaria* está catalogada en *Poisonous Plants of California* (Fuller & McClintock 1986) debido a los glicósidos de saponinas tóxicas. Estas toxinas afectan típicamente a los animales de sangre fría pero si el tracto gastrointestinal de sangre caliente ha su-



Figura 1. Detalle de la flor de *Quillaja saponaria* Mol. (Original de M.-T. Eyzaguirre)

frido una injuria ello puede absorberse. Las plantas que contienen saponinas son típicamente amargas al gusto y también a veces al ramonear. Es la corteza de *Quillaja* que contiene la saponina y no existe antecedente de cualquier tóxico conocido asociado con ella. En los estudios médicos recientes es esta misma saponina la que ha sido determinada con este potencial. La saponina QS-21, derivada de la corteza de *Q. saponaria*, ha mostrado gran potencial como un coadyuvante para un número de vacunas. Desgraciadamente ésta ha provocado la caída de las poblaciones nativas del árbol en Chile y ha despertado un interés como cultivo mayor agrícola (San Martín & Briones 1999).

Los principales mercados para la saponina y corteza actualmente son Estados Unidos, India, Argentina y Dinamarca para la primera y EE UU., Japón, Alemania y Holanda, en orden de importancia para la segunda. Una estimación de los valores de exportación de corteza asciende a 4.062 millones US\$ FOB para la corteza y 16.700 de US\$ FOB para la saponina. Una proyección de las tendencias de exportación podría moverse entre 1.000 y 1.200 ton., históricamente el promedio fue de 783 toneladas. Para el período, es decir hasta el 2002 en corteza y ninguna para la saponina (Vermeil de Conchard 1998).

Material y Método

Las muestras, de corteza de quillay, adquiridas en el comercio minorista local se sometieron a las técnicas ya descritas en (Montenegro et al. 1999). Las preparaciones se conservan en el Laboratorio de Botánica, Departamento de Ciencias Vegetales, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Santiago-22, Chile.

Farmacognosia (Jackson & Snowdon 1968) (Fig. 2)

Un polvo rosado con un sabor desagradable y gusto acre, es fuertemente estornutatorio.

Los caracteres diagnósticos son:

a) Las abundantes fibras que aparecen aisladas o, más generalmente, en grupos asociados con los radios medulares en sección longitudinal tangencial. Las fibras individuales son de perfil irregulares con paredes lignificadas de grosor variable y presentando un lumen desigual; frecuentemente torcidas y las fibras adyacentes en un grupo que es entrelazada para formar una masa compacta.

b) Los cristales de oxalato de calcio característicos, que son muy abundantes (Fig. 3); se presentan frecuentemente como prismas alargados grandes algunos cristales menores aparecen como cúbicos o en forma de pastillas.

Los cristales generalmente se encuentran diseminados y los mayores generalmente fragmentados.

c) El tejido criboso y los radios medulares del floema. Los tubos cribosos son grandes y de paredes delgadas y ocasionalmente exhiben áreas cribosas en las paredes transversales. El parénquima floemático posee paredes delgadas y a veces ligeramente perforado en las paredes radiales; las células frecuentemente contienen gránulos de almidón u ocasionalmente grandes prismas de oxalato de calcio y muchos de ellos llenos con una sustancia amorfa parda pálida. Los radios medulares son generalmente multiseriados, como se ve en sección longitudinal tangencial, y se encuentran ocasionalmente asociadas con

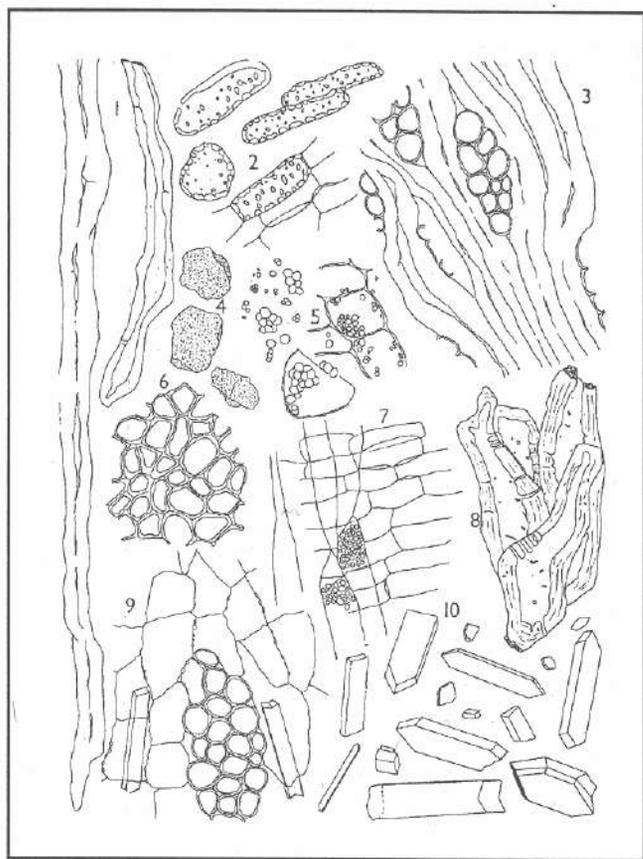


Figura 2. Esquema de las características morfológicas diagnósticas en el polvo de corteza de *Quillaja*. 1. Porciones de fibras aisladas. 2. Esclereidas pequeñas con paredes delgadas y perforaciones amplias. 3. Parte de un grupo de fibras y radios medulares en sección longitudinal tangencial. 4. Fragmentos de cuerpos pardos amorfos. 5. Gránulos de almidón, algunos incluidos en el parénquima. 6. Súber en vista superficial. 7. Tubos cribosos, áreas cribosas de un radio medular en sección longitudinal radial. 8. Esclereidas mayores con paredes gruesas y pocas punteaduras. 9. Parenquima floemático y parte de un radio medular en sección longitudinal tangencial y 10. Cristales de oxalato de calcio (x 300).

los tubos cribosos y el parénquima floemático, pero más comúnmente aparecen asociadas con los grupos de fibras; las células poseen paredes delgadas.

d) Las esclereidas de dos tipos se encuentran a veces. Aquellas de un tipo son bastante pequeñas, de perfil cuadrado o rectangular u oval y tienen paredes que son estriadas no definidas y atravesados por unos pocos poros bastantes pequeños. Ambos tipos de esclereidas aparecen aisladas o más frecuentemente en pequeños grupos.

e) Los gránulos de almidón bastante abundantes; estos son pequeños, simples o esféricos aunque unos pocos gránulos son compuestos y se encuentran hasta de cuatro o más; se encuentran diseminados o más frecuentemente como masas compuestas en el parénquima.

f) Los fragmentos escasos de súber pardo rojizos compuestos de células irregulares con paredes moderadamente gruesas y que poseen un contenido pardo amorfo

g) Los fragmentos angulares bastante largo de materia parda amorfa.

Fitoquímica

Quil A

Es una mezcla de varios componentes, que se resuelven en HPLC de fase reversa (Kensil et al. 1991). La Quil

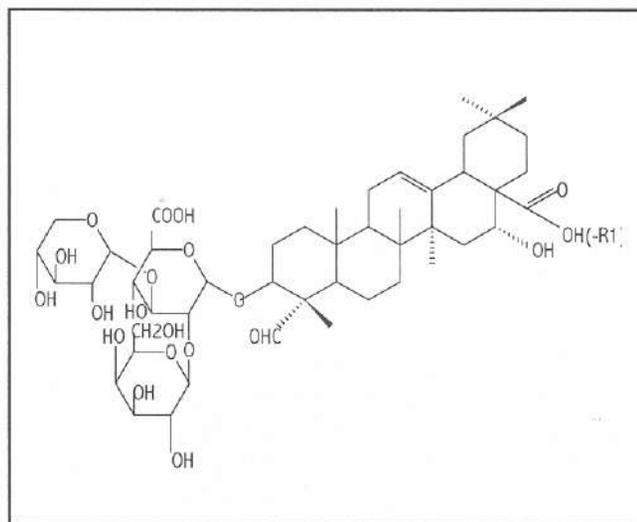


Figura 3. Estructura de la saponina de *Quillaja saponaria* QS-L1. En una fracción anteriormente informada QS21, en la posición R1 se encontraba glicosidada (Redibujada de Hong-Soeb So et al. 1997). Un Glicósido del ácido quillájico con ácido glucurónico, xilosa y galactosa

A es la base de la tecnología ISCOM (Morein et al. 1984), un coadyuvante poderoso con características peculiares v.g. la capacidad de estimular tanto la inmunidad celular como la humoral (Kamstrup et al. 2000)

QS-21

Un grupo danés en colaboración con el Departamento de Ingeniería de nuestra universidad ha estado investigando la posibilidad de obtener producto de mayor homogeneidad. Sin embargo, la variabilidad intraespecífica todavía es notable. Y la composición definida es un paso inicial para la introducción de estas sustancias en la producción de vacunas para uso humano.

La base de datos EAFUS (1995) (nombre derivado del acrónimo "Everything" Added to Food in the United States: literalmente, todo lo que se agrega a los alimentos en los EE.UU.) del Center for Food Safety and Applied Nutrition (CFSAN) dependiente de la FDA consigna dos productos con estudios toxicológicos a saber el "extracto de Quillaja" (Chem. Abstract. Nr. 068990-67-0) y la corteza de "Quillaja saponaria" (CAS Nr. 977002-27-9).

Los estudios de la parte no triterpénica son escasos. Sin embargo, Steinbeck et al. (1995) aislaron el glicósido 4-metil-7-hidroxifitalido y otros compuestos, que pueden dar cuenta de la toxicidad de los productos sin purificar

Se fraccionó por separación consecutiva sobre tres diferentes sistemas de fase reversa HPLC QH-B. Ocho compuestos se aislaron y sus estructuras se elucidaron principalmente por análisis de glúcidos NMR espectroscopía. Las estructuras consistían de derivados de ácido quillájico con dos trisacáridos en C-3, β -D-Galp-(1 \rightarrow 2)- $[\alpha$ -L-Rhap-(1 \rightarrow 3)]- β -D-GlcpA y β -D-Galp-(1 \rightarrow 2)- $[\beta$ -D-Xilp-(1 \rightarrow 3)]- β -D-GlcpA, y un tetra- o pentasacárido en C-28, β -D-Xilp-(1 \rightarrow 4)- $[\beta$ -D-Glcp-(1 \rightarrow 3)]- α -L-Rhap-(1 \rightarrow 2)- β -D-Fucp y β -D-Apif-(1 \rightarrow 3)- β -D-Xilp-(1 \rightarrow 4)- $[\beta$ -D-Glcp-(1 \rightarrow 3)]- α -L-Rhap-(1 \rightarrow 2)- β -D-Fucp. Estos compuestos estaban sustituidos con un grupo acilo en O-3 u O-4 del residuo de fucosa, que se ligan al azúcar del C-28 del ácido quillájico.

Se obtuvo una fracción de saponinas de *Q. saponaria* por separaciones consecutivas de tres sistemas de fase reversa en HPLC. Ocho compuestos aislados con sus correspondientes estructuras consistentes en derivados del ácido quillájico sustituido con dos trisacáridos diferentes C-3, β -D-Galp-(1 \rightarrow 2)- $[\alpha$ -L-Rhap-(1 \rightarrow 3)]- β -D-GlcpA y β -D-Galp-(1 \rightarrow 2)- $[\beta$ -D-Xilp-(1 \rightarrow 3)]- β -D-GlcpA, y un tetra- o pentasacárido en C-28, β -D-Xilp-(1 \rightarrow 4)- $[\beta$ -D-Glcp-(1 \rightarrow 3)]- α -L-Rhap-(1 \rightarrow 2)- β -D-Fucp y β -D-Apif-(1 \rightarrow 3)- β -D-Xilp-(1 \rightarrow 4)- $[\beta$ -D-Glcp-(1 \rightarrow 3)]- α -L-Rhap-(1 \rightarrow 2)- β -D-Fucp. Es-

tos compuestos se sustituyen ulteriormente con O-3 u O-4 de un residuo de fucosa, el que está ligado a un azúcar en C-28 del ácido quillájico. Se aislaron tres saponinas nuevas de extracto comercial de corteza de *Q. saponaria*. Estos compuestos se obtuvieron por degradación de productos de saponinas mayores en este extracto cuando se trataban con álcali fuerte. Los compuestos se caracterizaban, usando principalmente espectroscopía de NMR, espectrometría de masa y métodos químicos, como ácido quillájico 3-O- β -D-galactopiranosil-(1 \rightarrow 2)- β -D-glucopiranosidurónico, 3-O- α -L-ramnopiranosil-(1 \rightarrow 3)- $[\beta$ -D-galactopiranosil-(1 \rightarrow 2)]- β -D-glucopiranosidurónico y 3-O- β -D-xilopiranosil-(1 \rightarrow 3)- $[\beta$ -D-galactopiranosil-(1 \rightarrow 2)]- β -D-glucopiranosidurónico, respectivamente (Guo et al. 1998, Nyberg et al. 2000).

Un derivado 3, 28 O-bisglicosídico del ácido quillájico el QS-7 es afín a QS21; con algunas diferencias un grado superior de glicosilación y una unidad acilo graso mucho más corta. Estas diferencias se correlacionaban con una actividad lítica menor contra eritrocito de cordero (Kensil et al. 1998).

De las cuatro fracciones obtenidas por Kensil et al. - (1991) QS7, QS17, QS18 y QS21 - un grupo del Instituto de Biotecnología de Corea obtuvo una saponina purificada nueva que denominaron QSL1 (Fig. 3), y reanalizaron la restante ya conocidas, resultando la menos tóxica la fracción 21 (Hong-Soeb So et al. 1997). La subfracción QS-L1 aumenta la respuesta inmune humoral y celular al antígeno de superficie del virus de la hepatitis B. La toxicidad de esta fracción es menor que las de fracciones ya conocidas de la literatura. A diferencia de las anteriores precisa de la administración del antígeno precipitado con sales de aluminio. Las fracciones de Kensil et al (1991) poseían propiedades coadyuvantes aún en ausencia de tal activación.

Farmacología

El desarrollo de vacunas

La investigación de vacunas está progresando en dos direcciones: el desarrollo de cepas vivas atenuadas y el perfeccionamiento de las vacunas actuales mediante adición de coadyuvantes. El efecto deseable de aumentar

Esta mezcla se diseñó cuidadosamente y se demostró inducía una muy fuerte respuesta anticuerpos, respuesta celular inmune efectora fuerte (TH1 primariamente) y respuestas DTH, como también de ella clase I de MHC restrictivas a CTL (células T citolíticas). Este coadyuvante mientras es claramente más potente que alumbre es también más reactogénico. Sin embargo es todavía compatible con

el uso diseminado en humanos, sea para la prevención de enfermedades graves, o imprevisibles actualmente (paludismo, HIV...) o para el tratamiento de infecciones ya establecidas o enfermedades no infecciosas, tales como hepatitis B crónica, infecciones HPV crónicas, y cáncer.

El complejo inmunostimulante (ISCOM) es una formulación de vacuna que combina una presentación multimérica de antígeno con un coadyuvante incorporado. Posee una estructura de caja compuesta de saponinas de *Quillaja*, colesterol, fosfolípidos, y proteína. Típicamente, ISCOMs poseen simetría icosaédrica, de 30-40 nm de diámetro, y se compone de subunidades anulares 12-nm.

El procedimiento de preparación de ISCOMs comprende la disolución de las proteínas anfipáticas en detergentes preferentemente no iónicos, adición de saponinas de *Quillaja*, colesterol, y fosfatidilcolina. En presencia de proteínas anfipáticas, se forman las partículas ISCOM por remoción del detergente. Si no hay proteína (antígeno) en la mezcla, se forma la matriz ISCOM. Los componentes exclusivos de la matriz ISCOM son los glicósidos de *Quillaja* con una afinidad única al colesterol facilitando la estabilidad del complejo.

Los antígenos portados por ISCOM inducen una respuesta inmune aumentada, celular, reacción de hipersensibilidad retardada, y respuesta linfocito T citotóxica bajo la restricción MHC clase I. Las expresiones aumentadas de las moléculas MHC clase II también han sido ponderadas en inmunización primaria como también de repetición con ISCOMs.

Las formulaciones experimentales de vacuna ISCOM han inducido inmunidad protectora contra un número de microorganismos comprendiendo virus incluyendo retrovirus, parásitos y bacterias en varias especies, incluyendo primates.

Actividad coadyuvante y toxicidad de los glicósidos Iscom

Está bien establecido que los iscoms funcionan eficientemente como un sistema antígeno y protector inmune ha sido evocado contra una variedad de agentes infecciosos. La saponina coadyuvante de *Q. saponaria* es responsable de la actividad inmunoestimulante fuerte exhibida por iscom. Sin embargo, para poder usar los iscoms en vacunas para humanos es necesario determinar las propiedades inmunológicas y la toxicidad de los componentes químicamente definidos. Así, se ha determinado la actividad coadyuvante y toxicidad de los componentes aislados de *Quillaja*, como también formuladas en partículas, a saber la

matriz iscom. Los componentes purificados de *Quillaja* y las formulaciones de matrices iscom se examinan por su actividad coadyuvante en un sistema modelo ratón consistente en un antígeno contra el virus de la influenza y saponinas de *Quillaja*. Se demostraba que un componente de *Quillaja*, denominado QH-C, como componente libre o en una matriz iscom, posee una actividad coadyuvante potente, pero poca o ninguna toxicidad al nivel de dosis ensayado. Además, QH-C en la forma de matriz iscom no induce reacciones locales en el sitio de la inyección. Así, los iscoms que contienen el componente QH-C, sin toxicidad, más una actividad coadyuvante potente, puede resultar útil en formulaciones coadyuvantes para uso humano (Rönnerberg et al. 1995). Estudios desarrollados con la formulación QH703 para estudios en humanos había mostrado que los Iscoms administrados endonasalmente inducen respuestas secretorias IgA en pulmones y membranas mucosas v. g. en el tracto genital (Morein et al. 1998).

Aislamiento y cuantificación de los glicósidos y lípidos de Iscom

En los iscom, las copias múltiples del antígeno anexas por interacción hidrofóbica a una matriz que está constituida por saponinas triterpénicas de *Quillaja* y lípidos. Así, el iscom presenta el antígeno en una forma multimérica en una partícula pequeña con un coadyuvante incorporado resultando una formulación antigénica altamente activa. Behboudi et al. (1995, 1999) habían diseñado un procedimiento de extracción con la mezcla de cloroformo-metanol-agua para aislar las saponinas triterpénicas y los lípidos libres o incorporados en la matriz iscom. Los triterpenoides de la fase triterpénica se cuantifican usando orcinol ácido sulfúrico detectando sus cadenas hidrocarbonadas y por HPLC. El colesterol y la fosfatidilcolina en la fase lipídica se cuantifican mediante HPLC y métodos colorimétricos comerciales para colesterol. La separación y recuperación de los triterpenoides y lípidos en sus respectivas fases es prácticamente completa. Estos métodos deben ser útiles para adecuar constituyentes definidos en vacunas prospectivas iscoms. Las fracciones A y C de las saponinas de *Quillaja* poseen capacidades diversas de estimulación de citoquinas proinflamatorias, incluyendo IL2-alfa. La eficacia de la IL-12 (interleukin 12) como un coadyuvante de la administración parenteral en asociación con diversos tipos de inmunógenos ha sido igualmente demostrado en modelos tumorales. La vacunación con el mutante péptido p53 asociado con QS21 y IL-12 ratón curado tumor Meth A establecido (heterocigoto para el p53 mutado) (Noguchi et al. 1994).

La inmunidad de los coadyuvantes para las vacunas de la influenza son los siguientes:

- optimizar la presentación de antígeno, promoviendo una mejor estimulación de la célula T helper para incrementar los títulos de anticuerpos neutralizantes sistémicos contra virus,
- mejorar los anticuerpos neutralizantes en secreciones mucosas (IgA), que son la primera barrera contra la infección de influenza,
- inducir respuestas CTL, que pueden ayudar al clearance de virus, y
- desarrollar una respuesta inmune más prolongada a los virus (es decir, protección permanente).

Los coadyuvantes QS-21 (de la fracción 21 de *Q. saponaria*) (Kensil et al. 1991) y el PCPP (poli-di (carboxilatofenoxi)fosfazeno) (Payne et al. 1995) ya han sido descritos en la literatura como coadyuvantes potentes para diversas vacunas en los modelos animales correspondientes probados. Para evaluar su tolerancia y eficacia en humanos, ambos coadyuvantes, cuando se agregan a la vacuna clásica de la influenza actualmente comercializada, ha sido probada en pruebas clínicas de fase I.

QS-21, extraída de la corteza de quillay, pertenece al grupo de las saponinas, que es conocido por sus propiedades coadyuvantes, pero también por sus efectos laterales cuando se emplea como preparación cruda. Aquila Biopharmaceuticals, Inc. (USA) ha desarrollado un proceso de cromatografía líquida que separa las fracciones de Quil A que poseen toxicidad variable y poder coadyuvante. QS-21, una de estas fracciones, se ha demostrado segura y efectiva en animales (Kensil et al 1991). Kensil et al. (1995) han reclamado una patente para el proceso de "saponina modificada de *Q. saponaria*" para la Cambridge Biotech Corp. Solicitud número: 5443829.

En prueba de fase I, se observó un efecto coadyuvante limitado, no dosis-dependiente, para la cepa A/H3N2 después de la inyección de la vacuna de influenza QS-21-coadyuvada. Un año más tarde, la revacunación con la vacuna QS-21-coadyuvada de la cepa actual recomendada, se observaba un efecto de estimulación importante tanto para A/H3N2 como para B, de este modo este estudio sugiere que QS-21 puede ser de interés en el desarrollo de vacunas con un esquema de administración de doble dosis (Bouveret Le Cam et al. 1995).

SBAS2: SmithKline Beecham adjuvant system 2: se basa en la asociación de Monofosforil Lípido A(MPL)-una forma detoxificada del Lípido A, la fracción activa del LPS purificado de la bacteria *Salmonella* Minnesota, QS21 (una fracción purificada de saponina extraída de *Q. saponaria*), y un lípido registrado en emulsión en agua.

Agradecimientos

Este artículo fue financiado parcialmente por los proyectos Fondecyt 1980967 (G. Montenegro) y National Health Institute (NIH) 2 U01 TW 00316 08 (B. N. Timmermann).

Bibliografía

- Anónimo 1995. Trees of San Marcos Growers <http://smgrowsers.com/quilsap.htm> con acceso 9.9.2000
- Behboudi, S., Morein, B & Rönnerberg, B. 1995. Isolation and quantification of Quillaja saponaria Molina saponins and lipids in ISCOM matrix and ISCOMs. Vaccine 13, in press.
- Behboudi, S, Morein B, & Villacres-Eriksson MC. 1999. Quillaja saponin formulations that stimulate proinflammatory cytokines elicit a potent acquired cell-mediated immunity. Scand. J. Immunol. 50(4): 371-377.
- Bouveret Le Cam N.N, Ronco, J, Francon, A, Blondeau, C., & Fanget, C. 1995 Adjuvants for Influenza Vaccine <http://www.pasteur.fr/applications/euroconf/vaccins-abstracts.html> con acceso el 9/9/2000.
- Bugg, R. L 1992. H7abitat manipulation to enhance the effectiveness of aphidophagous hover flies (Diptera: Syrphidae). Pan-Pacific Entomologist 63: 60-64 como citado en URL <http://www.sarep.ucdavis.edu/NEWSLTR/v5n2/sa-11.htm> Con acceso 9.9.2000.
- E A F U S 1995. <http://vm.cfsan.fda.gov/~dms/eaufus.html> Con acceso 9.9. 2000.
- Fuller, T & McClintock, E. 1986. Poisonous Plants of California. UC Press.
- Guo S, Kenne L, Lundgren LN, Ronnberg B & Sundquist BG 1998. Triterpenoid saponins from Quillaja saponaria. Phytochemistry 48(1): 175-80.
- Hong-Soeb So, Yoon, H.-S, Choi D.-Y, Kwon Y.-S, Sung H.-H, Lee T.-G, Park, E.-S, Cho H.-S, Lee B.-M, Cho, J. M. & Ryu, W.-S. 1997. Effect of a novel saponin adjuvant derived from Quillaja saponaria on the immune response to recombinant hepatitis B surface antigen. Mol. Cells 7: 178-186.
- Jackson BP & Snowdon DK. 1968. Authentication of some plants materials employed as medicinal agents J & Churchill Ltd, 104 Glovester.
- Kamstrup, S., San Martin, R., Doberti, A., Grande, H., & Dalsgaard, K. 2000. Preparation and characterization of quillaja saponin with less heterogeneity than Quil-A. Vaccine 18: 2244-2249.
- Kensil, C. R., Patel, U., Lennick, M., & Marciani, D 1991. Separation and characterization of Saponins with adjuvant activity from *Quillaja saponaria* Molina cortex. J. Immunol. 146: 431-37.
- Kensil, C. A., Soltysik, S. & Marciani, D.J. 1995 Antiviral Agents Bull. Oct., U. S. patents <http://www.bioinfo.com/aabnov95uspats.html> Con acceso 22.12.2000.
- Kensil CR, Wu JY, Anderson CA, Wheeler DA, & Amsden J. 1998. QS-21 and QS-7: purified saponin adjuvants. Dev. Biol. Stand. 92: 41-47.

- Montenegro, G, Peña R C, Mujica, A.-M, González L, & Timmermann B N 1999 Posibilidades de un control botánico analítico de la hierba de San Juan *Hypericum perforatum* L. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 23(8): 450-460.
- Morein, B, Sundquist, B, Höglund, S, Dalsgaard, K, & Osterhaus, A. 1984. Iscom, a novel structure for antigenic presentation of membrane proteins from enveloped viruses. Nature 308: 457-460.
- Morein B, Villacres-Eriksson M, & Lovgren-Bengtsson K. 1998. Iscom, a delivery system for parenteral and mucosal vaccination. Dev. Biol. Stand. 92: 33-39.
- Noguchi, Y., Y.-T. Chen, & Old, L.D. 1994. A mouse mutant p53 recognized by CD4+ and CD8+ T cells. Proceedings of the National Academy of Science; USA 91: 3173-3175.
- Nyberg NT, Kenne L, Ronnberg B, & Sundquist BG 2000. Separation and structural analysis of some saponins from *Quillaja saponaria* Molina. Carbohydr. Res. 12; 323(1-4): 87-97.
- Payne, L. G. et al. 1995. Water-soluble phosphazene polymers for parenteral and mucosal vaccine delivery. In Vaccine Design: The subunit and adjuvant approach, Powell, MF, Newman, MJ. (eds), Plenum Press, New York 1995, pp. 473-93.
- Rönnberg, B., Fekadu, M. & Morein, B. 1995. Adjuvant activity of non-toxic *Quillaja saponaria* Molina components for use in ISCOM matrix. Vaccine 13: 1375-1382.
- San Martín, R. & Briones, R. 1999. Industrial uses and sustainable supply of *Quillaja saponaria* saponins. Economic Botany 53: 302-311.
- Steinbeck, C., Schneider, C., Rotscheldt, K & Breitmaier, E. 1995. A 4-Methyl-7-Hydroxyphthalide Glycoside and Other Constituents From *Quillaja Saponaria* Molina. Phytochemistry 40: 1313.
- Vermeil de Conchard, P. 1998. Estudio de mercado de la corteza y saponina de quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) y perspectivas de desarrollo futuro. Tesis de Ingeniero agrónomo, Universidad de Chile (Resumen). Ciencias forestales 12-13(1-2): 120-129.

EL COMPORTAMIENTO DE ALGUNOS ARTRÓPODOS COLOMBIANOS Y EUROPEOS Y SU SIGNIFICADO EVOLUTIVO¹

por

Helmut Sturm²

Resumen

Sturm, H.: El comportamiento de algunos artrópodos colombianos y europeos y su significado evolutivo. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **25(96):** 429-433, 2001. ISSN 0370-3908.

Con base en observaciones directas, se comenta el comportamiento de varias especies de artrópodos, especialmente insectos. Se muestra como los insectos tropicales presentan actitudes muy interesantes, muchas veces únicas y que garantizan su supervivencia. De ello se infiere una interacción directa entre el comportamiento y la evolución.

Palabras clave: Comportamiento, Colombia, Insectos.

Abstract

Based on direct observations of various species of arthropods, especially insects, show that tropical insects have very interesting, frequently unique, displays that guarantee their survivorship. From this a direct interaction between behavior and evolution is inferred.

Key words: Behavior, Colombia, Insects.

Me complace presentar a ustedes algunas de mis impresiones y de mis observaciones científicas realizadas en Colombia. Agradezco al presidente de la Academia, Profesor Dr. Luis Eduardo Mora quien hizo posible esta conferencia y me encanta volver a ver a muchos de mis amigos de la Universidad Nacional, con quienes compartí excursiones inolvidables. Los casi cuatro años pasados

en Colombia y los recuerdos que conservo de esta estancia ocupan mayor espacio en mi memoria que el tiempo vivido en Europa.

Quiero referirme a tres aspectos particulares. El primero es de tipo personal e histórico; el segundo es puramente científico; las excursiones a los diferentes biotopos de

¹ Conferencia dictada en el recinto de la Academia el 18 de octubre de 2000.

² Universidad de Hildesheim, Alemania.

Colombia, tan ricos y variados, me sirvió de estímulo para adelantar investigaciones en el campo del comportamiento de los artrópodos. El tercer aspecto es bastante breve y alude a un tema mas o menos filosófico.

Empiezo por el aspecto histórico y personal. Hace unos 45 años conocí en la Universidad de Mainz (Alemania) a un joven colombiano que preparaba su tesis doctoral y asistía a las clases de los profesores Weber y Troll. Era, como es de suponer, el actual presidente de la Academia Dr. Mora. Como consecuencia de la visita del profesor Weber a Colombia en 1953 y del paso del Dr. Mora por Mainz se habían establecido nexos entre ésta ciudad y Bogotá. Un colega botánico, el Dr. Stefan Vogel y yo como zoólogo, aprovechamos tal circunstancia y con subvenciones de la Deutsche Forschungsgemeinschaft, la Fundación Ibero-Americana y la Universidad Nacional de Colombia, pudimos, durante un año, hacer investigaciones en diferentes biotopos del país. Como es obvio se presentaban dificultades; tal el caso de una caja de aluminio bastante grande, que necesitaba cuatro personas para ser movida y que hizo la ruta Hamburgo - Santa Marta dos veces, porque que el cónsul alemán en Santa Marta olvidó reclamarla. Nosotros la recibimos con dos meses de retraso. En líneas generales, ese año quedó en mi memoria como el más intenso y más rico en toda mi vida (que completa 72 años). Hoy quiero recordar los nombres de tres personas que entonces nos cooperaron ampliamente. Se trata de los profesores Leopold Richter, Jesús M. Idrobo y Roberto Jaramillo. La cooperación se reanudó cuando el Dr. Mora hizo posible mi permanencia en Colombia durante dos años (1967- 1969), tiempo dedicado a la enseñanza y la investigación. En esta oportunidad conté con el apoyo, tanto del Akademisches Auslandsamt de Alemania como de la Universidad Nacional de Colombia. Mi hijo Michael tenía dos años cuando llegamos y aprendió pronto el español; Matthias nació en Bogotá y aun causa sorpresa en Alemania por su lugar de nacimiento y por ignorar completamente la lengua española.

La cooperación continuó a través de nuevas visitas en los años 1985, 1987 y 1989. El centro de mis investigaciones, durante este período, era la región paramuna, para mi uno de los biomas mas interesantes, debidos, entre otros factores, a la acción combinada del clima tropical húmedo y a la altitud. Aparte de muchos trabajos de tesis, resultaron tres publicaciones sumarias: **Sturm & Rangel** (1985), **Mora & Sturm** (1994) y **Sturm** (1998). Ojalá que estas investigaciones puedan continuarse.

En la segunda parte de esta charla quiero presentar algunas observaciones sobre el comportamiento de un grupo de animales que me ha fascinado desde hace cin-

cuenta años. Se trata del grupo de los artrópodos, y en particular de los insectos. La mayor parte de mis observaciones fueron hechas en Colombia, donde el clima tropical ha producido una gran diversidad, no sólo de géneros y especies, sino de comportamientos altamente desarrollados e impresionantes.

1. Iniciamos con un tipo de comportamiento bastante sencillo, observado en la selva tropical cerca de Villavicencio. En las hojas de una planta ubicada mas o menos a un metro del suelo, encontré manchas elípticas de aproximadamente 6 mm de largo y similares al excremento de un ave. Correspondían en realidad a un cucarrón de la familia Curculionidae. Cuando se le acercaba cualquier objeto por encima, el cucarrón pasaba al otro lado y viceversa. Todo parece indicar que este cucarrón cada noche hace un nuevo hueco para alimentarse y allí se resguarda durante el día.

2. Continuamos con el comportamiento sexual de una especie del grupo (clase) Arachnida, que incluye por ejemplo los subgrupos (ordenes) Escorpiones, Araneae, Opiliones y Acari. Se trata de Araneae pequeños del orden Schizomida y de unos 6 mm de largo. La especie vive bajo piedras en lugares abiertos. Los animales fueron encontrados al oriente del Hospital Militar en Bogotá. La especie fue descrita como *Trithyreus sturmi*, pero hace unos pocos años pasó al genero *Surazomus*. Algunos ejemplares, fijados en alcohol, se conservan en la colección del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional.

El macho puede reconocerse por un botón posterior. Con su primer par de patas, que funcionan como antenas, el macho hace oscilaciones rápidas. Si la hembra está dispuesta a aparearse, se queda mas o menos en el mismo punto y gira hacia el macho. Este muestra su botón a la hembra, y ella engancha sus quelésceros al botón. Tal vez, el macho segrega en los fosos del botón una sustancia que atrae a la hembra. El espermátforo queda fijado al suelo por un pedúnculo y contiene un par de cámaras con túbulos llenos de espermatozoides. Los dos hilos pegantes del espermátforo sirven probablemente para facilitar la conducción de los dos tubos con los espermatozoides. Consecuentemente, el *receptaculum seminis* de la hembra es también un órgano par. En líneas generales, es éste un comportamiento avanzado con preludeo, contacto especial de macho y hembra, incorporación únicamente de la parte con espermatozoides del espermátforo y estructuras pares en los receptáculos de la hembra.

Este comportamiento es un ejemplo de la transmisión indirecta de esperma y de la cooperación de macho y hem-

bra. En contraste, en Collembola y Diplura (grupos de insectos ápteros que usan también la transmisión indirecta de esperma), generalmente no se presenta contacto directo entre los machos y las hembras. Los machos depositan espermátóforos impares, mucho más sencillos, y no necesitan la presencia de las hembras como estímulo.

Los siguientes ejemplos se refieren a los insectos, el grupo más grande de seres vivos, tanto por el número de especies como de géneros. Son más de novecientas mil las especies descritas, pero con seguridad el número de especies actualmente vivientes supera los dos millones.

3. Quiero mencionar un grupo que estoy investigando desde hace 50 años. Se trata de los Archaeognatha, insectos apteros muy primitivos, aparentemente ubicados muy cerca del origen de la clase de los insectos. Los adultos tienen una longitud corporal de alrededor de 10-12 milímetros. En los Machilidae el comportamiento de apareamiento es bastante complicado y parcialmente único. El preludio de *Machilis germanica* comienza por contactos entre el macho y la hembra; ella muestra su disposición a aparearse acercándosele. El macho previamente fija un hilo formado por las células secretorias del pene y pone allí tres goticas de esperma; la hembra recoge las goticas con su ovipositor. Es un carácter exclusivo, en esta transmisión indirecta de esperma, el que el macho esté ligado por el hilo extendido entre el suelo y su pene. La transmisión indirecta del esperma por medio de hilos secretados se presenta en muchos grupos de artrópodos, pero en esos casos el hilo queda fijado entre dos puntos extracorporales.

Dentro de los Archaeognatha hay al menos otros dos comportamientos de transmisión de esperma. El género *Petrobius* de la familia Machilidae desarrolló una transmisión del esperma casi directa. Los machos ponen el esperma en el ovipositor de la hembra o muy cerca de él, gracias a que tienen un pene notoriamente prolongado.

Un tercer tipo de transmisión de esperma es el desarrollado en la familia Meinertellidae, que cuenta con dos géneros (*Meinertellus* y *Neomachilellus*) y muchas especies en Colombia. Se trata de la transmisión indirecta de espermátóforos que se pegan en el suelo. El macho lleva la hembra a cuevas y la conduce hacia el espermátóforo. La hembra recoge - como en *Surazomus* - únicamente la parte superior del espermátóforo, que es la que contiene el esperma. También en este caso de transmisión indirecta el macho es muy activo.

En líneas generales, se puede decir que estos insectos, primitivos (entre comillas), han desarrollado posibilida-

des de comportamiento muy diferentes, lo cual implica, la presencia de un sistema nervioso muy desarrollado y de una alta capacidad evolutiva.

4. En el paso de Resina, arriba de Neiva, encontré celdillas de una abeja formadas de resina. Las celdillas habían sido construidas por una abeja de la subfamilia Euglossinae (*Euglossa longipennis*) y constituyen un claro ejemplo de la protección de las crías contra enemigos. Eso se comprobó al cortar longitudinalmente una celdilla. La cámara con la larva constaba de una capa gruesa de resina con pedazos de corteza. La apertura tenía una cubierta triple formada por sendas capas de resina y pedazos de corteza, protección necesarios ante el gran número de parásitos existentes en los trópicos. Para determinar la especie de estas abejas llevé algunas celdillas. Pocos días después, durante la noche, emergió un adulto de la celdilla usando sus fuertes mandíbulas. El ruido fue tan intenso que me despertó. A pesar de la fuerte cubierta protectora, parte de las celdillas estaba infestada de pequeños himenópteros de la familia Chalcididae y del género *Monodontomerus*.

5. Un grupo de insectos ápteros, con una diferenciación morfológica semejante a la de los Archaeognatha es el de las lepismas, que seguramente conocen ustedes y que en Alemania se encuentran en casi todas las casas. El nombre científico del grupo es Zygentoma. Un representante de este orden, que vivió hace 35 millones de años, fue incluido en una familia propia (Lepidothrichidae). Hace unos cuarenta años se encontró una especie reciente de la misma familia en las selvas del norte de California: (*Tricholepidion gertschi*). De esta última pude recolectar y observar algunos ejemplares. Era obvio mi interés en el comportamiento de esta especie y especialmente en el apareamiento. Con su secreción, el macho forma una fina red de hilos en el fondo y pone un espermátóforo en este tejido. La hembra recoge todo el espermátóforo con su ovipositor. Este comportamiento es similar en todas las especies del orden Zygentoma, un contraste con los Archaeognatha, en los cuales hay al menos tres tipos diferentes de transmisión del esperma y - en el caso de los Meinertellidae - con espermátóforos que se fijan directamente al suelo. En este caso, la hembra no recoge todo el espermátóforo; recoge únicamente la parte superior, que es la que contiene el esperma.

6. La hembra de un cucarrón de la familia Chrysomelidae (subfamilia Cassidinae: *Omaspides specularis*) pone un paquete de huevos en el envés de una hoja de *Ipomoea*. Encontré varias hembras de esta especie en una selva cerca Tumaco. Unos 30 huevos estaban fijados al nervio medio de una hoja de *Ipomoea* por estilos

delgados. Aparentemente, el cucarrón resguardó los huevos, que poseen tapitas con bacterias simbióticas. Al acercarse un objeto, la hembra se movía hacia allí para proteger el paquete. Antes de la eclosión de las larvas, la hembra perfora los nervios principales de la hoja. Con ello logra que la parte distal de la hoja adquiera una posición vertical, disminuyendo el riesgo de desprendimiento de los juveniles. Si la hembra no los protege, en un lapso de 24 horas, los huevos son comidos por hormigas del género *Crematogaster*. Durante la noche, las larvas se separan para comer, pero se reagrupan después de corto tiempo, también sin la hembra. Encontré una hembra con 9 larvas grandes que estaban empupando. Algunas de las pupas fueron parasitadas por himenopteros. Esto significa, una vez más, que la lucha por sobrevivir alcanza su máximo en los trópicos.

7. La siguiente observación se refiere a un comportamiento desarrollado en conexión con la alimentación. Las larvas de moscas de la familia Mycetophilidae (*Orfelia andina* y *O. colombiana*) producen una red con hilos pegantes para alimentarse. Encontré tales redes debajo de las salientes de algunas piedras y en lugares húmedos, por ejemplo en la Sierra de La Macarena y en bosques arriba de Neiva y de Sogamoso. La larva se encuentra en una red de hilos, no pegantes, que se extienden en dirección mas o menos horizontal y tiene, en estado desarrollado, una longitud de unos 3 cm, una cabeza minúscula y grandes glándulas para la secreción de los hilos. La larva produce, además de los hilos horizontales, unos 20 hilos pegantes y verticales, que sirven para que se fijen en ellos los animales pequeños.

Entre otros, hay dos problemas para la larva: como se producen los hilos pegantes y como puede la larva acercarse a la captura?. Para la producción de hilos pegantes hay dos métodos: (a) Empezar con un hilo fino que se fija a un hilo horizontal que se rompe pocos segundos más tarde. Después, el peso del hilo pendiente ayuda a alargarlo. (b) La segunda posibilidad es la de producir primero una gota transparente y relativamente pesada que ayuda a la prolongación del hilo. En ambos casos se necesita un tiro vertical hacia abajo.

Para acercarse a la captura la larva tiene que pasar generalmente por varias bifurcaciones de la red horizontal con el fin de encontrar el hilo pegante en el cual ha quedado atrapada la presa: a pesar de que su cerebro es menor de un milímetro cúbico no tiene ningún problema en encontrar el hilo con la presa. Después come la parte de la red situada encima de la presa (una manera de *recycling*) y finalmente devora la presa. El desarrollo de la pupa se hace dentro de la red horizontal.

Moscas de la misma familia se encuentran en cuevas de una costa de Nueva Zelandia. Ellas son capaces de producir, en un órgano situado en la parte posterior del cuerpo, una luz verde fría. Las larvas de otra especie de la familia viven entre la corteza y el tronco de árboles caídos.

8. El último ejemplo de comportamiento que voy a presentar constituye una forma sorprendente de protección contra enemigos realizada por las orugas de dos especies de mariposas (*Pyrrhopyge phidias* L. y *P. charybdis* Dbl., familia HesperIIDae). Encontré las orugas de estas especies en las hojas del arbusto *Vismia baccifera* (L.) Tr. et Pl. (Guttiferales/ Theales: Hypericaceae) arriba de Villavicencio (ca. 1400 m). Las orugas habían cortado pedazos ovales de las hojas y vivían protegidas bajo esta tutela. Para averiguar como lo hacían, saqué algunas orugas y las puse sobre una hoja sin refugios. Con la ayuda de sus glándulas bucales produjeron en la superficie de la hoja hilos de seda necesarios para tenerse. Poco después empezaron a cortar un pedazo oval de la hoja, utilizando la longitud de su cuerpo como una especie de arco de círculo (compás). Cerca del nervio principal de la hoja y en dirección paralela las orugas cortaron únicamente el tejido superior de la hoja haciendo así un eje para doblar el pedazo; luego comprobaron si el pedazo podía moverse. Quedaba el problema de como doblar el platillo. La oruga lo hizo con la ayuda de hilos de sus glándulas bucales. La parte anterior de su cuerpo se movía en forma rítmica entre el pedazo cortado y el nervio principal de la hoja, produciendo cada vez un nuevo hilo y aprovechando una propiedad de los hilos: en el aire ellos se contraen; el efecto, es que el pedazo se levanta y finalmente se pone sobre el resto de la hoja por encima del nervio principal. En esta forma la casa está casi completa; después el borde del pedazo doblado se fija mediante hilos al resto de la hoja y el arco de la apertura queda reforzado por hilos interiores en dirección transversal.

También se probó si el instinto de la oruga está adaptado también a vencer obstáculos. Se colocó una aguja para impedir el levantamiento del pedazo, pero el animal encontró una solución; cortó la parte retenida del pedazo y siguió tendiendo hilos. Las orugas salen de su casa por corto tiempo para comer y tienen que construir nuevas viviendas cuando la anterior resulta demasiado estrecha por el crecimiento de su cuerpo. Al no disponer de hojas, utilizaron el papel de la etiqueta para esconderse.

En otro lugar vi la casa de otra especie de oruga que había hecho dos cortes en ambos lados del nervio medio de una hoja y que había construido una casa estrecha pero alta. Sería interesante averiguar la técnica utilizada para unir los dos pedazos mediante hilos secretados.

Imagino que ustedes se preguntan porque he insistido en ejemplos relativos al comportamiento. Hay varias razones para eso. Aquí presento cuatro:

- Existen pocas publicaciones sobre el comportamiento de los artrópodos. Generalmente los zoólogos matan los ejemplares capturados para conservarlos y describirlos.

- Existen muchos tipos de comportamiento en los trópicos. La mayoría son muy interesantes y muchas veces únicos. La lucha por la supervivencia de una pluralidad de animales alcanza su máximo en los trópicos; a pesar de ello, existen muy pocas descripciones exactas y detalladas de los distintos tipos de comportamiento.

- No se requiere un equipo complicado para observar el comportamiento; la mayoría de las veces es suficiente mantener los ojos bien abiertos, aprovechar una cámara fotográfica, tener papel y lápiz y – lo más importante – tener mucha paciencia.

- En muchos casos, el comportamiento es un complemento necesario para entender las características de la morfología.

Estoy dispuesto a colaborar, por ejemplo, con estudiantes que estén interesados en este tipo de estudios y podría empezar por enviarles copias de mis publicaciones.

Hay sin duda una interacción entre comportamiento y evolución. Los cambios en el comportamiento, junto con las adaptaciones a ciertos factores originadas en el medio ambiente, pueden favorecer ciertas líneas de la evolución. Quiero demostrarlo con dos ejemplos propios del medio ambiente páramo.

El primer ejemplo se refiere a una especie de insectos del orden Phasmatodea: *Autolyca bogotensis*. La especie vive generalmente entre piedras en el bosque montano. En el páramo de Monserrate la misma especie se ha adaptado a vivir bajo el abrigo de hojas muertas de *Espeletia grandiflora*. En esta condición los insectos comen porciones grandes del interior de su abrigo. En consecuencia, se pueden encontrar cavernas amplias en las que viven mas que treinta ejemplares, desde muy jóvenes hasta adultos; lo sorprendente es que nunca comen la capa mas externa. Así, están totalmente encerrados y mas o menos seguros. La adaptación en este caso es también una adaptación al alimento o sea a preferir hojas muertas con un alto contenido de resinas.

El segundo ejemplo se refiere a un roedor, *Agouti taczanowskii*. En el páramo de Chingaza este roedor empieza a tumbar troncos de *Espeletia grandiflora* para co-

mer la médula. También en este caso el animal ingiere las resinas de la planta. Sería interesante observar en que forma tumba y abre los troncos. Ojalá no se tumben troncos de frailejones en gran escala.

Finalmente me refiero al aspecto filosófico. Detrás de los diferentes comportamientos y de las diferentes estructuras existe, para mi, un orden trascendente, una idea que prevalece desde el comienzo de nuestro sistema solar y del universo. Las leyes naturales, que en los orígenes del universo aparentemente eran las mismas de la actualidad, abarcaron todas las posibilidades que vemos realizadas en los reinos de las plantas y de los animales. Estas posibilidades pudieron desarrollarse tal como lo vemos hoy día en nuestro planeta, merced a las condiciones favorables que presentaba y presenta la tierra verbi gratia: presencia de agua, una atmósfera rica en oxígeno (al menos durante la segunda parte del desarrollo), temperaturas que facilitaron la existencia de seres vivos, combinación oportuna de elementos químicos, y no en último término, una distancia favorable a nuestro astro central, el sol. Pensándolo bien, debemos nuestra existencia a una casualidad extrema. No tuvimos la posibilidad de contribuir en nada para establecer las leyes naturales y nuestra propia existencia. Esto debe hacernos modestos y agradecidos. La conclusión, para mi, es que antes de nuestro mundo existe una última causa, una idea amplia, un garante que muchos llaman Dios.

Literatura

- Sakagami, S.F. & Sturm, H. 1965. *Euplusia longipennis* (Friese) und ihre merkwürdigen Brutzellen aus Kolumbien (Hymenoptera: Apidae). - *Insecta Marsumurana* 28 (1): 83-92 + Tables XI-XVI. Japan.
- Sturm, H. 1955. Beiträge zur Ethologie einiger mitteldeutscher Machiliden. - *Zeitschrift für Tierpsychologie* 12(3): 337-363.
- _____. 1957. Gehäusebauverhalten einer Hesperidenraupe. - *Verhandl. Deutsche Zool. Gesellschaft, Graz 1957*: 259-262.
- _____. 1961. Brutpflege bei dem Käfer *Omaspides specularis* Er. (Cassidinae, Chrysomelidae). *Zoologischer Anzeiger* 166 (1/2): 8-26, Leipzig.
- _____. 1973*. Fangespinnste und Verhalten der Larven von *Neoditomyia andina* und *N. colombiana* (Diptera, Mycetophilidae). - *Zoologischer Anzeiger* 191 (1/2): 61-86.
- _____. 1973b. Zur Ethologie von *Trithyreus sturmi*, Kraus (Arachnida, Pedipalpi, Schizopeltidia). - *Zeitschr. für Tierpsychologie* 33: 113-140; Berlin/Hamburg.
- _____. 1989. Zur Entwicklung und zum Paarungsverhalten zentralamazonischer Meinertelliden (Machiloidea, Archaeognatha, Insecta). - *Amazoniana* VIII (4): 447-473, Kiel.
- _____. 1990. Contribución al conocimiento de las relaciones entre los frailejones (*Espeletiinae*, *Asteraceae*) y los animales en la región del páramo andino. - *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 17(67): 667-685.

PALABRAS PRONUNCIADAS POR EL PRESIDENTE DURANTE LA SESION SOLEMNE REALIZADA EL 22 DE AGOSTO

En nombre de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, deseo, ante todo, presentar el más cordial saludo de bienvenida y nuestros más reconocidos agradecimientos por acompañarnos en esta Reunión especial, con la cual la Corporación celebra un nuevo aniversario de su restablecimiento definitivo, al promediar la década de los años 30 del pasado siglo XX, en cumplimiento de disposiciones emanadas del Congreso y de la Presidencia de la República, de esa misma época.

Me refiero a la Ley 19 de 1929, que ordena restablecer la Academia Nacional de Ciencias fundada en 1826 por el General Francisco de Paula Santander, quien por entonces, ejercía la Presidencia de la República. Me refiero también, a la Ley 34 de 1933 que reconoce a la Academia, ya entonces denominada Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, como cuerpo consultivo del Gobierno Nacional; sobre todo en lo concerniente a la organización y fomento de los estudios de Ciencias en los establecimientos oficiales de Educación y a la calidad de su enseñanza, en todos los niveles del sistema educativo.

Una y otra ley, reglamentada luego; por el Decreto 1218 de 1936, emanado de la Presidencia de la República; a raíz de cuya ratificación entraron en vigencia plena las disposiciones de las Leyes a que he hecho referencia. Además, mediante el mismo Decreto, el Gobierno Nacional de entonces, designó a los primeros Miembros Numerarios quienes de inmediato dieron comienzo a su meritoria labor.

Ya entonces, gracias a las contribuciones de los Académicos fundadores y a su decidida voluntad de servicio, a favor de la promoción del conocimiento científico, fue posible realizar acciones preliminares para implementar la institucionalización de la Ciencia Moderna de Galileo y de Newton en nuestro medio, tras el

transcendental propósito de lograr su inserción definitiva dentro del marco de valores y quehaceres intelectuales de nuestra sociedad.

A título de homenaje a su memoria y en reconocimiento a la labor por ellos cumplida, permítanme, recordar sus nombres, en esta reunión, cuando se celebra el sexagésimo quinto aniversario del restablecimiento definitivo de la Academia. Fueron ellos: los Académicos de Número: Jorge Álvarez Lleras, Jorge Acosta Villaveces, Antonio María Barriga-Villalba, Alberto Borda Tanco, Julio Carrizosa Valenzuela, Víctor Eduardo Caro, Luis Cuervo Márquez, Federico Lleras Acosta, Ricardo Lleras Codazzi, Luis María Murillo, Enrique Pérez-Arbeláez, Darío Rozo, Rafael Torres Mariño, Calixto Torres Umaña, y César Uribe Piedrahita.

Insignes compatriotas quienes desde su juventud, se dieron a la tarea de enriquecer el conocimiento científico, en sus respectivas disciplinas. Ya entonces varios de ellos se ocuparon del estudio sobre fenómenos característicos de los entornos locales, regionales y globales de nuestro país; mientras otros adelantaban estudios, en busca de soluciones, a los problemas de diferente índole; algunos derivados del interactuar de la sociedad con nuestro entorno natural de suyo complejo y frágil; aunque repleto de singulares potencialidades. Cabe asimismo destacar las contribuciones relacionadas con el mejoramiento de la calidad de la enseñanza de las Ciencias y con la organización de Estudios Universitarios de Ciencias. Tal el caso de Don Julio Carrizosa Valenzuela, notable Ingeniero y Maestro, Exministro de Educación y Ex-Rector de la Universidad Nacional a quien se debió el restablecimiento de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional, en 1946. Es decir, sesenta años después de haber sido clausurada, en 1986, su antecesora, la primera Facultad de Ciencias, del país, cuyo establecimiento

to coincidió con la fundación de la Universidad Nacional, en 1867.

Con el restablecimiento de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional, se abrieron nuevamente las puertas de la Universidad a las nuevas promociones de jóvenes que motivados por su vocación, optaran por complementar en las aulas universitarias su formación académica en disciplinas de las Ciencias fundamentales. Con este propósito se introdujeron también metodologías y procedimientos didácticos por entonces novedosos en nuestro país. Así, durante los primeros años de estudio los estudiantes deberían demostrar haber asimilado los principios científicos generales de cada disciplina científica y aprendido a interrelacionar críticamente tales conceptos básicos, a través de la participación en Seminarios y, en particular, en los diálogos espontáneos con sus maestros y/o en el análisis y confrontación de los conceptos de cara a las peculiaridades de realidades concretas de nuestro medio. Todo también con el objetivo de promover el interés y fortalecer la vocación de los alumnos por los estudios científicos.

Más adelante, los estudiantes participarían en los procesos de búsqueda de soluciones a problemas, primero sencillos, a manera de ejercicios; luego, cada vez de mayor grado de complejidad y, finalmente, en trabajos relacionados con la creación de nuevos conocimientos, bajo la dirección y cooperación de sus profesores.

Desafortunadamente, para la Ciencia y para Colombia, también esta vez, muy pronto, la nueva Facultad de Ciencias desapareció. Las nuevas Facultades de Ciencias que surgieran pocos años después ajustaron su organización y metodologías al modelo tradicional; más tarde complementado mediante los llamados estudios de postgrado, en el intento de imitar el modelo de formación avanzada de las Universidades norteamericanas y europeas.

Por lo mismo, en los días que nos alcanzan ha sido preocupación permanente de los Miembros de la Academia, inspirados en el ejemplo de sus propias experiencias, en la de los Miembros fundadores y, en general, en la tradición histórica de la Academia, la adopción de iniciativas programáticas, que permitan alcanzar los objetivos centrales para los cuales fuera establecida la Institución.

O sea, trabajar de consumo con la comunidad científica nacional e internacional; con las instituciones científicas y educativas nacionales, de todos los niveles; con las Academias Nacionales que conforman el Colegio Máximo; con los Capítulos, regionales de la Academia y, con las Asociaciones científicas, entre otros, en la promoción de la Ciencia y de la formación académica en sus diferen-

tes disciplinas. Todo nuevamente tras el propósito de lograr la inserción definitiva de la Ciencia en nuestra cultura. Pero no a título simplemente formal o de quehacer marginal, sino como componente vital e indispensable para profundizar en el conocimiento sobre nosotros mismos, de nuestra dinámica social, de nuestro devenir histórico; como también tras el empeño de identificar los principios y leyes que regulan la compleja y frágil realidad del medio tropical húmedo que nos sirve de apoyo y sustento.

Así podremos identificar y aprovechar sus potencialidades sin agotarlas irreversiblemente y en perjuicio de las nuevas generaciones que habrán de sucedernos. Para ello tenemos que crear los conocimientos, inventar los métodos y formas adecuadas para su utilización. Es decir, desarrollar un marco de referencia para el desarrollo y bienestar de nuestra sociedad de inspiración endógena, es decir, sin tener que recurrir a paradigmas foráneos.

Por lo mismo, nos hemos comprometido en la realización de programar para robustecer nuestra capacidad científica nacional; conscientes que, de otra manera, se mantendría indefinidamente la posición de desventaja con respecto a los países poseedores de una elevada capacidad científica y de mayores conocimientos, aún en referencia a nuestro propio país; vale decir: a nuestros propios problemas, a nuestros propios recursos y potencialidades. Posición de desventaja determinante a la postre de la condición de consumidores de productos foráneos industriales, alimenticios, medicinales, entre otros.

Equiparar la noción de desarrollo a la de simple "crecimiento económico lineal", ha sido otra de las consecuencias de tal situación. Confusión que ha conducido a la explosión demográfica, al crecimiento caótico de nuestras ciudades, al deterioro ambiental y con ello a la escasez alimentaria, y sobretodo del agua, al deterioro de las fuentes de energía, a la contaminación del ambiente, y, en fin, a la agudización de las situaciones caóticas que afectan a los países en desarrollo, cada vez con mayor intensidad.

De estas reflexiones al igual que de las exposiciones, debates y conclusiones de la Conferencia Mundial de la Ciencia, resulta evidente la decisiva importancia que corresponde a los conocimientos científicos que los países en desarrollo logren crear en referencia a sus propias realidades locales, regionales y nacionales para superar la condición de desventaja en la que se encuentran sometidos, a pesar de sus potencialidades y recursos.

De allí el empeño de la Academia Colombiana de Ciencias por redoblar los esfuerzos para estimular en nuestro

medio la creatividad científica y la difusión de los conocimientos ya logrados, a través de sus publicaciones, en particular, sobre nuestra realidad natural.

Del mismo modo, quisiéramos que la Academia en colaboración con otras instituciones académicas y universitarias continúe adelantando acciones dirigidas a mejorar la calidad de la enseñanza de las Ciencias. De tal manera que contribuyan a fortalecer la Capacidad Científica Nacional, la misma que luego permita crear los conocimientos aplicables, entre otros, a solucionar acertadamente nuestros problemas económicos, de la salud, de la alimentación y del medio ambiente, en general. El programa interinstitucional que adelantan la Universidad de Caldas, la Academia Colombiana de Ciencias y el Centro de Investigaciones del Café, dirigido a la generación de capacidad científica en los campos de la Biología Tropical Andina, sea quizás un ejemplo de las acciones que nos hemos propuesto adelantar.

Por lo mismo, pensamos que el mejoramiento de la calidad de la enseñanza, mediante el fomento de la creatividad, debe extenderse a todos los niveles de nuestro sis-

tema educativo. Es decir, comenzar, por el nivel primario, donde debería fortalecerse la curiosidad natural y espontánea de los niños originada en el "asombro" que suscita la contemplación de objetos o fenómenos desconocidos. Estrategia que luego debe extenderse, hacia los niveles secundarios y universitarios, mediante la metodología de la confrontación de los conceptos científicos principios, leyes generales de las diferentes disciplinas, de las Ciencias, con nuestra multidiversa realidad tropical. Es decir, la metodología que podría también describirse como metodología de la contextualización, inspiradora de asombro y promotora de la curiosidad y como tal, promotora del escudriñamiento, cada vez más profundo e inteligente de la realidad.

Eh ahí Señoras y Señores: otro fundamental desafío que debemos abordar y solucionar: para mejorar sustancialmente la calidad de la educación y, en consecuencia, elevar la calidad de la enseñanza y el aprendizaje de las Ciencias, mediante la promoción de la creatividad sin tener que esperar para lograrlo, cursar estudios especializados de postgrado.

INFORME PRESENTADO POR DON JOSE A. LOZANO, SECRETARIO DE LA CORPORACIÓN, SOBRE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE EL AÑO ACADÉMICO 2000-2001

A continuación se resumen las actividades adelantadas por la Corporación durante el año académico estatutario comprendido entre el 20 de agosto de 2000 y el 19 de agosto de 2001.

Sesiones

a.- Junta Directiva. La Junta Directiva sesionó de manera ordinaria en once oportunidades, y extraordinariamente en dos ocasiones. En estas reuniones tomó las decisiones necesarias para el funcionamiento de la Academia.

Se renovó el contrato No. 020 de 1999 y se firmaron dos más, el No. 019 y 026 de 2000 para administrar proyectos de seis sedes de la Universidad Nacional.

Para poder cumplir con los compromisos adquiridos con la Universidad se contrató a la ingeniera Doña María Elvira García y a Don José Jaime Sierra como contador.

Se firmó con el Ministerio del Medio Ambiente, por intermedio de la SECAB, el contrato de consultoría 079-002/00 para la elaboración de "Guías de formulación de proyectos de gases de efecto invernadero (GEI)".

Se renovaron los contratos de arrendamiento de servidor y de mantenimiento de la red interna de computadores y de elementos satélites.

La Junta nombró, como miembros del Comité Editorial, para el periodo 2000-2002 a los académicos Víctor S. Albis, Diógenes Campos, John D. Lynch, Jairo Mojica y Augusto Rivera.

b.- Sesiones ordinarias. En las reuniones ordinarias celebradas los terceros miércoles de cada mes, se dictaron las siguientes conferencias:

Septiembre 20: Don José A. Lozano y Klaus Shutze, del Instituto von Humboldt "Formación Investigativa-participativa- Diagnósticos ambientales municipales"

Octubre 18: Don Helmut Sturm "El comportamiento de algunos artrópodos colombianos y europeos y su significación evolutiva".

Noviembre 15: Doña Inés Bernal de Ramírez ¿Qué pasa con la enseñanza de la Química en los niveles preuniversitarios en Colombia?.

Febrero 21: Debate propuesto por la Comisión de Candidaturas sobre "condiciones y requisitos para aceptación de candidatos".

Marzo 21: Don John D. Lynch "Una enciclopedia electrónica de las ranas de Colombia".

Abril 18: Don Pablo Leyva, director del IDEAM "Experiencias de Articulación Instituto Oficial - Sistema Educativo".

Mayo 16: Don Pedro Prieto "Junturas Joseph, de superconductores de alta temperatura crítica".

Junio 20: Don Víctor Albis "Variaciones sobre las sumas de cuadrados en las tonalidades finita, modular, polinómica y $p(x)$ -ádicas".

c.- Sesiones especiales.

Durante la sesión Solemne Estatutaria del 25 de agosto, se presentó el estudio de fondo, a cargo de Don Santiago Díaz Piedrahita titulado "Relaciones de Humboldt con Colombia y con Caldas"

En sendas sesiones especiales se posesionaron nueve académicos correspondientes, quienes, presentaron los respectivos trabajos científicos preparados especialmente para la ocasión:

Septiembre 29: Don José Luis Fernández Alonso: "Salvías y mastrantos colombianos. Taxonomía, distribución y conservación de la Familia Labiatae en Colombia"

Noviembre 23: Don Leonardo Puerta Llerena: "Obtención y caracterización de un nóvel alérgeno mediante tecnología del DNA recombinante", sesión realizada en Cartagena.

Febrero 14: Doña Elizabeth Castañeda del Gordo: "De la epidemiología a la ecología: tras el hábitat de *Cryptoococcus neoformas*".

Febrero 28: Don Jaime Bermejo Barrera: "Aportación de la Química Verde a la gran farmacia de la naturaleza".

Marzo 28: Don Pablo Elías Buritica Céspedes "Descubriendo ancestros de los uredinales".

Abril 25: Don Alvaro Jaramillo Robledo: "Climatología de la región andina de Colombia; microclima y fenología del cultivo del café"

Mayo 23: Don Carlos Alberto Andrade Amaya: "La circulación oceánica superficial en la cuenca de Colombia - Mar Caribe".

Julio 6: Don Jesús Olivero Verbel: "Activación de neutrófilos por pesticidas organoclorados" y Don Eduardo Alberto Egea Bermejo: "Polimorfismo genético del MHC, una herramienta de estudio en la epidemiología molecular de algunas enfermedades emergentes del Caribe Colombiano: HB-HTL VII", sesión realizada en Cartagena.

Julio 11: Don John James Pipoly III: "Un nuevo modelo estratégico para el manejo de los recursos bióticos en zonas de conservación y desarrollo integral (ICAD)"

Fue exaltado a Miembro de Número Don Guillermo Páramo Rocha. En la ceremonia de posesión, el 27 de junio, presentó su trabajo "Modelos matemáticos y paradigmas míticos: acción y fatalidad".

El 23 de noviembre se creó oficialmente el capítulo del Caribe de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, con sede en la ciudad de Cartagena. Este capítulo cuenta con cuatro miembros correspondientes de nuestra Academia y tres más se posesionaron el 7 de septiembre. Los siete académicos tienen residencia en Cartagena, Barranquilla y Santa Marta.

Participación en actividades nacionales e internacionales

El 23 y 24 de noviembre se reunieron en Cartagena representantes de las Academias de Ciencias de los países que conforman el Gran Caribe para constituir la Comunidad Científica del Caribe, CCC. Esta reunión, fue coordinada por la Academia Colombiana de Ciencias, y su presidente Don Luis Eduardo Mora Osejo, fue elegido presidente de la Junta Directiva de la CCC.

La Academia Colombiana de Ciencias continuó su afiliación y participación en el Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU), el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP), la Federación Latinoamericana de Academias de Ciencias (FELAC), el Comité sobre Ciencia y Tecnología en países en Desarrollo y Red Internacional de Biociencias (COSTED-IBN), la Academia de Ciencias del Tercer Mundo (TWAS), la Fundación Internacional para la Ciencia (IFS) y la Unión Internacional para la Investigación del Cuaternario (INQUA). En este año se afilió a la Unión Internacional de Historia y Filosofía de la Ciencia (IUHPS) y su representante fue elegido miembro de la Junta Directiva.

A nivel nacional forma parte del Colegio Máximo de Academias, es miembro de la Fundación Pro-Sierra Nevada de Santa Marta, miembro de la Junta Directiva de la

Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia, y preside el Comité Directivo de la Red Colombiana de Formación Ambiental.

Durante este período varios miembros participaron en su carácter de académicos o de representantes oficiales de la Academia en numerosas actividades. Algunas de ellas se mencionan a continuación.

El Presidente de la Academia Don Luis Eduardo Mora Osejo participó, entre otros, en los siguientes eventos:

Continuó su participación en las reuniones convocadas por el ICFES para estudiar las recomendaciones de UNESCO sobre Educación Superior. En estas reuniones sustentó y amplió los conceptos que presentó por escrito y que fueron publicados en la Revista No. 92.

Participó en varias reuniones de manejo de ecosistemas y de ecología de páramos, convocadas por la CAR y el Ministerio del Medio Ambiente.

En el mes de abril dictó una conferencia en CORPOICA y fue invitado como conferencista a la inauguración del Posgrado de la Universidad Nacional en Leticia.

Durante la Conferencia de la Red Internacional de Derechos Humanos de las Academias, celebrada en París, entre el 11 y el 14 de mayo, el 12 de mayo presentó su ponencia ante la Red. Tres días después en la Universidad de Guissen, Alemania, presentó su conferencia sobre "Arquitectura de los árboles".

El día 5 de junio participó en el evento programado por el Ministerio del Medio Ambiente para celebrar el "Día Mundial del Medio Ambiente".

Los días 21 y 22 de junio participó en el Congreso Nacional organizado por la Universidad de los Andes sobre "Educación Superior, Desafío Global y Respuesta Nacional".

El 28 de junio dictó la conferencia "Un modelo de estrategias integradas para la generación de capacidad científica creativa en los alumnos de los diferentes niveles del sistema educativo colombiano" dentro del Seminario sobre "Grandes Temas de Nuestro Tiempo" que se desarrolló en la Universidad de Caldas en Manizales. Al día siguiente visitó CENICAFE para evaluar las posibilidades de usar sus laboratorios en las prácticas de la carrera de Biología Tropical propuesta por el presidente de la Academia, aceptada por la Universidad de Caldas y aprobada por el ICFES. Los representantes de CENICAFE, la Universidad de

Caldas y la Academia firmaron un acta en la que se comprometen a prestar su colaboración para la implementación y Desarrollo de la carrera de Biología Tropical en la Universidad de Caldas.

Participó en la reunión sobre conocimiento científico organizada por la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Nacional, en donde dictó su conferencia "El conocimiento y las conclusiones de la conferencia mundial de la ciencia. Sobre su papel para el logro de la sostenibilidad y armonía entre la sociedad y la naturaleza".

Por solicitud de las universidades Nacional de Colombia y de Nariño presentó un proyecto para establecer un Observatorio de Alta Montaña, de Ecología y Medio Ambiente, en el departamento de Nariño.

Don Moisés Wasserman participó en numerosas actividades nacionales e internacionales entre las que se pueden mencionar el Congreso Internacional de Medicina Tropical que se realizó en Cartagena en agosto de 2000 y la reunión de la Red Latinoamericana de Biología en Santiago de Chile, en agosto de 2001. Representa a la Academia en las reuniones de Junta Directiva de la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia.

El Secretario, Don José A. Lozano, representó a la Academia en varios eventos:

Dictó la conferencia "Formación investigativa participativa - diagnósticos ambientales municipales" en el VII Congreso Interamericano de medio Ambiente,

CIMA 2000, en Cartagena.

Como delegado de la Academia y Presidente de la Red Colombiana de Formación Ambiental, presidió las reuniones del Comité Directivo de la Red Colombiana de Formación Ambiental y la especial celebrada el 6 y 7 de marzo en la que se hizo una revisión de las actividades desarrolladas y por desarrollar

Participó en la reunión de creación del capítulo del Norte de Santander de la Sociedad Colombiana de Geología, como conferencista central.

Participó como conferencista invitado en el VII Congreso Nacional de Profesores y III Internacional de profesores de Ciencias, que se realizó entre el 11 y el 14 de agosto, en Santiago de Chile.

Los días 3 y 4 de Mayo Doña Inés Bernal de Ramírez y Don Gonzalo Correal Urrego participaron en el II Encuentro de Egresados Indígenas, organizado por la Universidad Nacional.

Don Víctor Albis fue miembro del comité organizador y participó en la Primera Conferencia Iberoamericana de Matemática Computacional, entre el 25 y 27 de julio.

Don Jorge Arias de Greiff representa a la Academia en las reuniones de la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos, COPUOS, que convoca la Cancillería.

El 31 de julio se realizó una reunión conjunta de las academias de Historia y Ciencias para la celebración del bicentenario del viaje de Alejandro von Humboldt y Amado Bondpland a América.

La Academia está desarrollando, conjuntamente con la Universidad del Quindío, el proyecto sobre Sismicidad Histórica de Colombia que dirige el académico Don Armando Espinosa.

La Academia apoyó económicamente y a través de los académicos participó en la organización y realización de los siguientes eventos:

- XII Congreso Colombiano de Química
- VIII Congreso Latinoamericano de Botánica y II Congreso Colombiano de Botánica.
- VIII Congreso Colombiano de Geología.
- VI Simposio Colombiano de Ictiología

La Academia contribuyó económicamente a la impresión del No. 2 Vol. 2 de la Revista de Educación en Ciencias.

Defunciones

La Academia lamenta la pérdida del miembro Honorario Don Luis Duque Gómez, del Académico Numerario Padre Carlos Eduardo Acosta y de los miembros correspondientes Don Víctor Manuel Patiño y Don Richard Evans Schultes.

Actividades de las comisiones y grupos

El señor presidente designó a los académicos Eduardo Brieva, Carlos Corredor y Eduardo Posada como miembros de la Comisión Permanente de Candidaturas para el periodo 2000 - 2002.

La Corte constitucional envió a la Academia una consulta sobre la Ley 22 de 1984 que reglamenta el ejercicio de la profesión de la Biología. Para resolver esta consulta el señor presidente creó una comisión presidida por él y constituida por los Académicos Don Carlos Corredor, Don Augusto Rivera, Don Orlando Rangel y Don Polidoro Pinto.

La presidencia también constituyó el Comité de Derechos Humanos que quedó integrado por los académicos Moisés Wasserman, Hernando Groot y Guillermo Páramo. Este comité se reunió por primera vez el 23 de marzo.

El Comité de Educación llevó a cabo varias reuniones y organizó, conjuntamente con la Asociación de Facultades de Ciencias el foro sobre "Capacitación in situ - Una estrategia para la construcción de la capacitación científica en Colombia", en el que participaron como conferencistas Don Luis Eduardo Mora, Don Carlos Corredor y Don José A. Lozano.

Existen otros grupos y comités de la Academia o en los que participa institucionalmente por delegación del señor Presidente, entre los que se encuentran:

Don Thomas van der Hammen coordina el Comité de Investigación del Cuaternario (INQUA).

Don Humberto Rodríguez coordina el Grupo de Trabajo de Gases de Invernadero.

Don Michel Hermelin representa a la Academia en el Comité Nacional de Prevención de Desastres.

Estos y otros grupos permanentes u ocasionales tratan de promover el mejoramiento de la calidad de la investigación y de la enseñanza de las ciencias.

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 la Sesión Solemne, realizada el 25 de agosto, se entregó el Premio a la Obra Integral de un Científico, correspondiente al año 2000, a Don Hernando Groot Liévano.

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 Andrés Villaveces, se entregó el 18 de agosto durante la clausura del Congreso Colombiano de Matemáticas.

En este año la convocatoria se realizó en el área de Biología.

Biblioteca Luis López de Mesa

La Academia mantiene su biblioteca "Luis López de Mesa". Sus volúmenes se incrementan principalmente a

través del canje que recibe por las publicaciones propias. Además la Academia continúa suscrita a diez títulos de revistas científicas.

Se pueden consultar en la página electrónica de la Academia 3.200 registros de libros y las referencias bibliográficas de los más de 1000 artículos publicados en la Revista de la Academia.

Se desempeña como jefe de la Biblioteca, Don Jorge A. Brieve ex decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional y le colabora como asistente Doña Eloisa Bernal

Publicaciones

El Director de la Revista, Don Santiago Díaz es el responsable directo de las publicaciones de la Academia. Actualmente Don Polidoro Pinto ayuda a Don Santiago Díaz en el cumplimiento de sus obligaciones de Editor.

Se publicaron y distribuyeron los números 92, 93, 94 y 95 de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

La lista de canje cuenta con 508 direcciones así: 118 en Colombia, 194 en América y 196 en Europa y resto del mundo.

La Academia publicó y distribuyó los siguientes libros:

Colección Jorge Alvarez Lleras, de monografías científicas

“Erupciones históricas de los volcanes colombianos”, de Armando Espinosa Baquero.

“Contribuciones al estudio comparativo de la conductancia y de la transpiración foliar de especies de plantas del páramo”, de Luis Eduardo Mora-Osejo.

“Estudio Limnológico de los recursos hídricos del parque de piedras blancas”, de Gabriel Roldan, J.A. Posada & J.C. Gutiérrez.

“Fitoplancton de los Lagos Andinos del Norte de Sudamérica (Colombia)” de John Donato.

Colección Julio Carrizosa Valenzuela, de textos universitarios

“Fundamentos del Análisis complejo de una variable”, de Jairo Charris, Rodrigo de Castro & Juanario Varela.

“Principios de la Cristalografía” de Juan de Dios Várela.

Gaceta

Se publicaron 12 números de la Gaceta, editada por Don Víctor Albis quien además coordina las publicaciones electrónicas.

Publicaciones en medio electrónico

En la página electrónica de la Academia se encuentran la Revista, la Gaceta y tres libros en versión electrónica, información sobre la Biblioteca, grupos de trabajo y proyectos de investigación.

La Academia publicó, en CD-Room, la “Enciclopedia de ranas de Colombia”

En el servidor de la Academia de Ciencias se colocará la página WEB de la Academia de Historia.

La Biblioteca Luis Angel Arango, en su biblioteca virtual, colocó el libro de Humboldt publicado por la Academia.

LA SITUACIÓN DE LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA EN EL MUNDO EN DESARROLLO*

por

Luis Eduardo Mora-Osejo, Dr.rer.nat.¹

La situación social y económica del llamado mundo en "desarrollo" produce cada vez, mayor preocupación de los círculos académicos, no sólo en los países afectados, sino en todo el orbe.

Dentro del marco de tal situación, crece el consenso que entre los problemas más importantes por solucionar, figura el de alcanzar un nivel de calidad de vida que a la vez sirva de apoyo a la preservación de la **dignidad humana**. Sin discriminaciones por razones económicas o sociales y sin que ello implique la desaparición o deterioro de las **culturas tradicionales regionales o locales** sino, por el contrario, lograr que tales culturas se enriquezcan y contribuyan a la creación de un modelo de **desarrollo endógeno**.

No podemos dejar de tener en cuenta que cualquiera que sea el país o región o sociedad en la cual se introduzcan **tecnologías foráneas indiscriminadamente**; tales tecnologías mantienen su naturaleza extraña a la cultura local y, por consiguiente es limitada su la contribución a la solución de los problemas básicos que afectan esa sociedad. De allí que para alcanzar un desarrollo auténtico, necesariamente, el patrón en que se apoye debe estar firmemente enraizado en los valores culturales, en la historia y en las tradiciones propias; enriquecidas por la **dinámica de los impulsos que hayan surgido o surjan a su interior** a lo largo del proceso histórico de la sociedad. De lo contrario, se rompen los nexos en que se apoya la **solidaridad social**. La sociedad se **fragmenta** y acaba por desaparecer su **identidad cultural**.

En todas las sociedades los valores culturales se transforman, en cuanto están sujetos a una dinámica, propia que evoluciona a través del tiempo; al igual, que las tecnologías que utilizan para interactuar con sus respectivos entornos naturales o sociogeográficos históricos. Sin que los cambios impliquen la desaparición del **patrón fundamental de la identidad cultural** de la respectiva sociedad.

En Europa; cambiaron las formas de producción económica, a raíz de la llamada "revolución industrial"; sin embar-

go, se mantuvo el patrón fundamental de la cultura europea, lo cual permitió que allí se produjera un **desarrollo endógeno**.

La visión del mundo surgida de las culturas de los llamados países desarrollados, particularmente, en razón del enorme impacto causado por los grandes avances tecnológicos, se ha expandido por todo el orbe. Simultáneamente, las tecnologías diseñadas en los mencionados países se han propagado por todo el mundo, dizque tras el objetivo de incrementar la producción y solucionar problemas industriales y económicos, sin que sus promotores se hubieran detenido a pensar acerca de su grado de **adecuación al medio biofísico y sociogeográfico**; menos aún en su **impacto en las culturas tradicionales** y sus consecuencias positivas o negativas para la sociedad de los países del mundo en desarrollo, como Colombia.

El Japón transformó su sistema productivo a lo largo del siglo pasado a través de la **importación de tecnologías generadas en Europa**. Pero el Japón no perdió su identidad cultural durante este proceso. Esto indica que lo decisivo es la **selección** y los **criterios bajo los cuales** se produce la introducción de tecnologías foráneas, al igual que la reflexión a cerca del impacto que produzcan sobre las tecnologías tradicionales; dada la significación que ello reviste para la cultura regional o local. Por lo mismo, las tecnologías tradicionales no deberían ser reemplazadas, así porque sí, esto es, indiscriminadamente, por tecnologías foráneas.

Por lo mismo, los nuevos modos de **producción económica**, sin previa discriminación de las tecnologías y además inspirados en la **ética utilitarista** pueden conducir a **cambios sociales traumáticos**; sobre todo, si no se ha previsto el tiempo suficiente y se ha reflexionado en los procedimientos de adaptación de la organización social a las nuevas condiciones que, como es de esperar, van a surgir de los nuevos modos de producción.

Sin embargo, el impacto de los avances del desarrollo tecnológico de los países industrializados es de tal mag-

* Lectura pronunciada en el Instituto Colombiano Agropecuario ICA, en Tibaitatá el 29 de marzo de 2001.

¹ Presidente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

nitud, que ni siquiera los deterioros del ambiente por ellos causados en los propios países de origen, hace pensar a nuestras sociedades y a sus dirigentes, sobre la necesidad de no adoptarlos **indiscriminadamente**, es decir, sin sujeción a una "**política de transferencias tecnológicas** que tenga en cuenta sus impactos culturales y sobre el complejo y frágil entorno natural tropical.

Otro hecho que no se suele tener en cuenta, es la relación cada vez más estrecha en los países industrializados entre la Ciencia y la Tecnología. La Tecnología se torna cada vez, mas y más, científica, al punto que nuevas tecnologías serían impensables sin contar con el conocimiento científico fundamental previo. Las fronteras entre los avances del conocimiento científico y de las tecnologías que lo aprovechan se tornan cada día más difíciles de distinguir. Desde luego, sin que ello signifique que Ciencia y Tecnología sean la misma cosa.

El acercamiento de la Ciencia y de la Tecnología aproxima paralelamente, cada día mas, la **invención** con la **innovación** y a ésta con la producción económica y la respectiva comercialización. Así la Ciencia y la Tecnología se han convertido en **instrumentos de poder político y económico**. Por eso en los países industrializados las políticas y el apoyo en todos los órdenes a la Ciencia y la Tecnología se han convertido en preocupación fundamental de los gobiernos de turno de esos países que luchan por **ampliar los mercados** para sus productos tecnológicos.

En cambio, en los países en desarrollo, los recursos y el **apoyo oficial** para el desarrollo de la Ciencia y de la Tecnología, propias, **son cada vez más escasos**.

Resulta, por consiguiente, urgente convencer a los dirigentes sobre el papel fundamental del conocimiento científico y tecnológico. Sobretudo, en mi opinión, del **conocimiento contextualizado en nuestra realidad** para generar procesos y modelos de **desarrollo endógenos** que se fundamenten en los nuevos conocimientos logrados sobre nuestra realidad a través del apoyo concedido a la Ciencia y a la Tecnología y que permitan también seleccionar adecuada y cuidadosamente las **políticas de transferencia tecnológica**.

Mientras tanto, continúa **ampliándose la brecha** que separa a los países llamados desarrollados y a los países en desarrollo, en particular, en lo que concierne a la capacidad científica y tecnológica. Así en Colombia en la Ciencia es todavía poco lo que ha podido realizarse para que algún día llegue a ser elemento esencial de nuestra cultura y pueda disfrutar de un ambiente propicio para su desarrollo y fortalecimiento.

Somos pocos todavía quienes estamos convencidos que detrás de la agudización de los problemas que se ciernen sobre nuestra sociedad, está nuestra **débil capacidad científica**; debilidad que no nos permite insertarnos en el **mundo del conocimiento**. Sobre todo, del conocimiento de nuestras realidades, del medio natural que nos sustenta, de nuestros problemas y sobre todo de los conocimientos necesarios para solucionarlos.

La contaminación de la atmósfera que nos rodea ha alcanzado niveles críticos. La pobreza y la miseria han aumentado en los países en desarrollo.

Ahora como nunca antes es necesario que surja en nuestra sociedad un marco científico que se fundamente en nuestras realidades naturales, biofísicas, sociogeográficas concretas.

Se requieren **marcos científicos y técnicos** que sin ignorar el **conocimiento universal** o los surgidos en otros contextos, privilegien la búsqueda creadora de nuevos conocimientos contextualizados en nuestra realidad y con recursos intelectuales y prácticos independientes.

Debemos tener siempre presente que los **contextos tropicales** como el nuestro, exigen explicaciones y manejos propios, de acuerdo con los resultados obtenidos de la investigación y la creación de conocimientos científicos contextualizados, susceptibles de devenir en **paradigmas endógenos** en cuanto demuestren su validez general y su poder explicativo.

Por fortuna ya disponemos de algunos ejemplos que ilustran este acerto. Así, el principio de **autosostenimiento de los ecosistemas de las selvas amazónicas**, en **suelos muy pobres en nutrientes**, mediante el autoreciclaje de nutrientes minerales procedentes de la descomposición de la materia orgánica de las hojas y su absorción inmediata por los hongos micorrízicos presentes en los substratos. O también, el principio de la autorregulación del ecoclima del bosque altoandino nativo de la cual depende su estabilidad y permanencia por el mismo bosque, lo cual implica que no ocurra regeneración espontánea cuando han sido **devastados** por efecto de la **tumba y quema**.

Entonces ¿qué debemos hacer?

Propongo que comencemos por considerar el **mejoramiento de la calidad de la educación y el impulso a la ciencia y a la tecnología** entre las prioridades más urgentes. Puesto que si no lo hacemos no podrá alcanzarse el desarrollo de estirpe endógena y menos aún el **desarrollo sostenible**. Es decir, aquel modelo de desarrollo que ase-

gure a las generaciones venideras la disponibilidad de los recursos y la persistencia de los **sistemas de soporte de la vida** en todas sus formas. Pero para que esta propuesta sea una realidad, tendremos que hacer un gran esfuerzo para convencer a los gobernantes y a la sociedad toda, de la validez de esta tesis.

La sociedad como tal, debe contribuir a superar las desventajas en que tradicionalmente se hallan inmersas la Educación, la Ciencia y la Tecnología, en los países del "mundo en desarrollo", como el nuestro y por otro lado convencerse que sin ello el desarrollo económico y la superación de la pobreza y la miseria en los días que nos alcanzan, es prácticamente imposible.

Debemos comenzar por incrementar el conocimiento científico contextualizado en nuestra realidad natural, histórica y sociogeográfica para que algún día devenga en componente **vital de la cultura de toda la nación** y así contribuya a que desaparezca el fenómeno de **estratificación cultural**, coincidente con la de los estratos económicos en que suele dividírsela. De lo contrario, resultará difícil consolidar la unidad nacional y menos aún diseñar y poner en marcha un modelo de organización estatal idóneo y eficiente.

Desde luego, todo lo anterior implica conceder prioridad a la solución de la pregunta: ¿Cómo mejorar de manera efectiva la Educación y contribuir con ello a lograr promover la **creatividad**, y que desde ella se traduzca en mayor **disponibilidad de cerebros** capaces de crear nuevos conocimientos científicos o innovaciones tecnológicas, unos y otros, contextualizados en nuestras realidades?

Pienso, en primer lugar, que es necesario comenzar por mejorar la calidad del conocimiento que adquieran los estudiantes de los niveles primario, secundario y universitario.

Desde luego, no se trata simplemente de **ampliar la información** que reciban los alumnos en clase y que luego tengan que **repetirla de memoria** en los exámenes.

Quizás una manera de lograrlo consista en crear una **pedagogía**, recordando el momento y la manera en que se **originó la Ciencia**: La ciencia apareció en el momento en que el hombre se detuvo en la observación minuciosa de objetos del entorno, tales como el trozo de roca, una hoja o un trozo de madera o una gota de agua o una nube y, en algún momento, se **planteó preguntas** sobre los detalles observados, seguidos luego de **meditaciones y reflexiones** en busca de **explicaciones**, en el intento de **relacionar** lo observado con otros objetos o sucesos.

Paulatinamente, con el correr del tiempo, la Ciencia devino en elemento esencial de la cultura y, por consiguiente, de la sociedad. Al punto que en los días que corren, la evolución de las culturas predominantes dependen de los avances del conocimiento tradicional surgido en esos contextos y del conocimiento científico moderno. Al punto que el clima intelectual del mundo desarrollado depende cada vez más del conocimiento científico. Es también el conocimiento científico el conocimiento más valorado en las regiones y países donde se originó la ciencia y se han dado los desarrollos a que hemos hecho referencia. Es allí también, en esos países, donde la cultura y la visión del mundo dependen de la ciencia. Quizás también esto contribuya también a que su influencia se extienda por todo el orbe.

Por consiguiente, si queremos insertarnos en la **sociedad mundial del conocimiento** mediante el mejoramiento de la calidad de la enseñanza no debemos limitarnos a un determinado nivel del sistema educativo. Debemos comenzar por elevar la calidad de la educación en todos sus niveles. Tendríamos que comenzar por aceptar que cuando el aprendizaje no conduce a la captación de interrelaciones, a la conexión y al enriquecimiento de significados, el **aprendizaje resulta de bajo nivel** e incapaz de promover la **curiosidad** o despertar el **asombro**, ante fenómenos o sucesos imprevistos, por consiguiente, tampoco el espontáneo deseo de ampliarlos más y más y menos aún la **creatividad**.

Para que esto último ocurra, me parece necesario interesar a los alumnos a realizar ejecuciones de **comparaciones** de los objetos o fenómenos; de **ordenamiento** de los objetos o de los sucesos y desde los resultados habilitarlos como **puntos focales de reflexión**, que deriven, progresivamente, en **procesos de pensamiento lógico**, progresivamente complejo. Esto implica que el aprendizaje promueva la **exploración**, es decir, la realización de **renovadas observaciones**, cada vez más minuciosas reflexiones sobre los objetos y fenómenos tales que conduzcan a la **abstracción mental** y finalmente a la **conceptualización**.

Debemos tener presente que el conocimiento significativo se genera en la actividad mental, es decir, en la "**cabeza**" del investigador. Esto es, en el observar, comparar, ordenar, formular hipótesis, predecir, someter a experimentación las predicciones, analizar cualitativa o cuantitativamente la información obtenida, formular conclusiones. Por lo mismo, el encuentro con la realidad biofísica del entorno, el escudriñar críticamente los objetos y sucesos, el formular preguntas y encontrar soluciones creativas, promueven la calidad del conocimiento y del desarrollo de la inteligencia.

Por otro lado, la utilización responsable del conocimiento implica no abusar de las posibilidades de su aplicación, cualquiera que sea el campo o disciplina científica.

Al comenzar el nuevo siglo y milenio es cada vez más evidente la necesidad de preservar la vida en la tierra en todas sus formas, incluida la vida humana. Sobre todo, en nuestro entorno tropical húmedo multidiverso, frágil y complejo. Se requiere una **nueva ética** que bien podría llamarse **bioética**, cuya adopción es cada día, más urgente.

Ya el solo deterioro de nuestra **biodiversidad**, de las mas elevadas del planeta, significaría un desastre, lo propio si llegare a ocurrir la pérdida de nuestras **reservas hídricas**, o si se prosiguiera sepultando bajo el pavimento de las calles, avenidas y rascacielos de nuestras ciudades en proceso de convertirse como **megalópolis** los suelos fértiles de los cuales **depende la producción de alimentos** para nuestra población que hacia el año 2025 será en un 74% mayor que la actual y, por consiguiente, ocho veces mayor que la que sostenían los suelos de Colombia hace apenas 60 años.

UN MODELO DE ESTRATEGIAS INTEGRADAS PARA LA GENERACIÓN DE CAPACIDAD CIENTÍFICA CREATIVA EN LOS ALUMNOS DE LOS DIFERENTES NIVELES DEL SISTEMA EDUCATIVO COLOMBIANO*

por

Luis Eduardo Mora-Osejo**

Cada vez es más amplio el consenso mundial sobre la urgencia de modificar los modelos tradicionales de enseñanza de las ciencias y de adecuar las Instituciones de todos los niveles del sector educativo a los desafíos que enfrenta la humanidad al comenzar el nuevo siglo y milenio. No obstante en nuestro país, salvo pocas y meritorias excepciones, no se enseña la ciencia de manera motivante y efectiva, tal que fortalezca en el estudiante la capacidad de pensar analíticamente y se le provea de la motivación y de las herramientas para que el aprendizaje sea una actividad que perdure durante toda la vida.

Particularmente en los países llamados en desarrollo es de la mayor urgencia que la sociedad aprenda a fortalecer la capacidad científica y tecnológica, y sobre todo aprenda a utilizar el conocimiento científico y a seleccionar las tecnologías más adecuadas a las particularidades del propio entorno, de tal modo que pueda llevarse a cabo de manera efectiva y sin traumatismos la transición hacia la sostenibilidad.

Así también, nuestra sociedad podrá elaborar un marco científico que se inspire y fundamente en nuestros con-

textos geográficos culturales e históricos concretos y aprenderá a conocer sus orígenes, su evolución y el medio natural que le sirve de apoyo y sustento.

Cuando no se utiliza el marco científico que interpreta y explica las realidades de un país, sobre todo de tal complejidad como las de Colombia, de naturaleza multidiversa, pluricultural y multiétnica, equivale a navegar sin brújula por un mundo cada vez más complejo en el cual el conocimiento científico es cada vez más necesario. De lo contrario, se cae en la inveterada costumbre de imitar modelos foráneos, en todos los campos de la actividad humana incluida la Educación, inspirados en otros contextos sociales y naturales.

Las condiciones vitales del país tropical colombiano –así amazónico como andino– son tan únicas y complejas como en pocos otros lugares, y por lo tanto inducen y exigen explicaciones y manejos propios, según paradigmas endógenos que reflejen el contexto que los sustenta. El conocimiento de las realidades involucradas resulta tanto más útil y rico cuánto más se obtiene con la comprensión y autoridad de la vivencia local. De allí que

* Profesor Titular Emérito Universidad Nacional. Presidente Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

** Palabras pronunciadas en el recinto de la Universidad de Caldas en Manizales el 29 de junio de 2001.

los objetivos de nuestro sistema educativo tengan que inspirarse en esos mismos paradigmas.

Desafortunadamente, todavía en nuestro medio no se valora y reconoce cuán significativa resulta ser la realización por parte de los estudiantes, de todos los niveles de la educación, de actividades dirigidas a obtener una explicación plausible sobre la ocurrencia de un fenómeno de la realidad natural o inducidos por el hombre, en el mejoramiento de la calidad del aprendizaje y en la conversión de éste, en aprendizaje inteligente. Así las explicaciones que se obtengan sean inicialmente sencillas.

Se continua con el hábito de dar mayor importancia al aprendizaje repetitivo de la información expuesta por el profesor durante el desarrollo de las clases; o la contenida en libros. De tal modo se desperdicia el gran poder de asombro y de curiosidad, particularmente de los niños, cuando de cara a la realidad observan un fenómeno o un comportamiento que a primera vista resulta inexplicable, pero que luego por sí mismos o con la ayuda de sus maestros encuentra la explicación.

Quizás por ello, la pedagogía más enriquecedora del aprendizaje sea la indagación en busca de explicaciones de hechos o fenómenos observados de frente a la realidad. Considero que es la mejor manera de dar comienzo al proceso que paulatinamente conduce a la creatividad del niño, del joven y del futuro profesional.

Esta pedagogía despierta y fortalece en los alumnos la capacidad del interrelacionar inteligente de explicaciones, de interpretaciones, de conocimientos interrelacionados, es decir, de construir en la mente, *saberes inteligentes*. Saberes inteligentes, que luego van a facilitar, cada vez más, la identificación en la naturaleza o, en general, en la realidad circundante, de fenómenos no explicados todavía y; sobretodo, cuando ya exista la suficiente experiencia y capacidad creativa, la formulación de posibles explicaciones y luego, de *hipótesis de trabajo* de donde puedan derivar predicciones sometibles a la comprobación empírica, ya sea, por observación o por experimentación.

Los conocimientos que así se logren de suyo resultan interrelacionables con otros. Tal interrelación enriquecedora del *saber inteligente*, fortalece la capacidad para lograr el *aprendizaje inteligente* y luego el propio saber y con ello la capacidad de formular nuevas explicaciones en forma de *conceptos, modelos, teorías, leyes* o aún principios. Esto conduce, indirectamente a que la sociedad en su conjunto sienta mayor estima por el conocimiento científico y acabe por incorporar la Ciencia a su cultura tradicional.

Esto permitirá que las Instituciones Educativas, en particular, las Universidades y sus egresados puedan proyectar su capacidad científica a la sociedad. Profundizar en el estudio de sus problemas, proponer soluciones y contribuir desde la realidad a forjar los nuevos paradigmas que orienten su desarrollo desde una perspectiva endógena. Así la sociedad estimará el conocimiento científico como estructura de sostén de su futuro desarrollo. El mismo desarrollo que debe tener por meta la búsqueda de plenitud de vida y satisfacción espiritual y material de los ciudadanos y de los que intervienen en el proceso investigador y creador, así como de los que lo difunden y comparten.

Así podremos incorporar la ciencia y su producto, el conocimiento, a nuestra cultura. Precisamente ahora cuando al comenzar el nuevo siglo y milenio, se considera al conocimiento como el factor de mayor relevancia para alcanzar la sostenibilidad y con ella la supervivencia de la humanidad a escala planetaria. En consecuencia, en nuestro propio caso, precisa no ahorrar esfuerzos y recursos económicos para enriquecer el conocimiento de nuestras propias realidades naturales, económicas, sociales o culturales.

Esto mismo ha sido proclamado en las conferencias internacionales recientes sobre Educación Superior (París, 1998) y en la Conferencia Mundial de la Ciencia (Budapest, 1999). En estos eventos internacionales hubo acuerdo en reconocer la necesidad de vincular la educación a los procesos de búsqueda de nuevos conocimientos.

Al comienzo de tal proceso estará el despertar curiosidad en los niños por los fenómenos de la naturaleza, curiosidad seguida por los deseos de comprender las razones por las cuales se producen tales fenómenos.

Por la misma razón, me parece que debería acogerse y poner en práctica el principio, según el cual, la Educación y la Investigación científica forman hoy en día parte fundamental del desarrollo cultural, socioeconómico y sostenible de las sociedades y las naciones.

Una de las estrategias más recomendables para poner en práctica dicha concepción, podría consistir en formular a manera de propuesta un modelo institucional para la Educación contextualizado en nuestra realidad.

Esta propuesta de modelo sería también sometida a la discusión amplia por los diferentes sectores de la sociedad con miras a contextualizarla de manera mas profunda y hacer mas viable su aplicación en las diferentes regiones del país y en las diferentes modalidades y niveles de

la educación superior. Es decir, en nuestro medio tropical, frágil y complejo y en nuestra cultura multiétnica.

Las modificaciones que se efectúen, en particular, en los enfoques metodológicos y didácticos en el nivel de la Educación Superior, deben incidir sobre los niveles secundario y primario del sistema educativo, mediante la estrategia de dar oportunidad a los Maestros de los mencionados niveles de participar paulatinamente en las actividades que se efectúen en las respectivas entidades de Educación Superior. Sobre todo, en aquellas actividades que conduzcan a fortalecer la *creatividad* y el *saber inteligente* de los Maestros de dichos niveles; de tal modo que los capacite para guiar con mayor experiencia a sus alumnos y puedan fomentar en ellos el saber inteligente y con él la creatividad.

En mi opinión, el Modelo debe contener, tres componentes esenciales, estrechamente interrelacionadas.

- a) Formación de capacidad de pensar crítica y creativamente de los estudiantes y de interrelacionar conceptos, cada vez más abstractos y complejos;
- b) A través de la contextualización de los conceptos, es decir, su confrontación mediante la observación crítica y reflexiva de la realidad, identificar vacíos de conocimiento y plantear el o los problemas para resolver;
- c) Ejercitar la capacidad de proponer nuevas explicaciones sometibles a prueba experimental o, a través de la observación. Para ello se debe contar con la orientación y ayuda de los profesores y con el apoyo de las facilidades operativas que le ofrezca la Universidad.

Poco a poco, de esta manera, se podrá alcanzar cada vez mayor capacidad crítica sobre los conceptos que constituyen el *saber consolidado* de la disciplina o disciplinas involucradas y descubrir vacíos o limitaciones en la fuerza predictiva de tales conceptos. Todo, desde luego, con ayuda y orientación de los maestros, responsables de las respectivas Cátedras, quienes de acuerdo con la elevada responsabilidad que implica el cumplimiento cabal de las tareas a ellos confiadas, deben recibir de la institución los debidos reconocimientos y estímulos.

Preocupación de los Profesores debe ser también la de asegurar paulatinamente la participación de los estudiantes en ejercicios sobre sometimiento a la prueba experimental (o a través de observaciones sistematizadas de los fenómenos) de los conocimientos ya disponibles o también de las predicciones derivables de explicaciones hipotéticas sobre éste o aquel fenómeno natural.

Todo, tras el objetivo de promover la creatividad en los estudiantes. Esto implica fortalecer la asimilación crítica de los conocimientos ya establecidos y fortalecer la capacidad de formular nuevas preguntas que lleven al estudiante a profundizar en el conocimiento y, sobre todo, a la confrontación de los conceptos, de suyo abstractos, con las realidades locales y regionales.

En todos estos procesos el estudiante debe estar motivado, orientado y ayudado por la experiencia de sus maestros de la respectiva disciplina o disciplinas relacionadas con el problema en estudio.

Los estudiantes y profesores deben acudir al enfoque y trabajo interdisciplinario cuando así lo exija la complejidad del problema que les sea sometido a estudio por sus maestros, para mejorar la calidad del aprendizaje de las disciplinas contempladas en el curriculum de la carrera escogida.

La Educación Superior y el Sistema Educativo Nacional

Por otra parte quisiera insistir en que es necesario transformar la Educación Superior tradicional, de acuerdo con las consideraciones expuestas y obtener tal calidad que le permita a la Educación Superior asumir el papel de catalizador del mejoramiento cualitativo de todos los niveles, básico y medio del Sistema Educativo colombiano.

Pienso que la concepción general y las estrategias para lograrlo, en el mediano plazo, podrían ser las siguientes:

Estructurar la Universidad en Unidades Académicas, o Cátedras, en el sentido prístino de este último vocablo. Cada Unidad o Cátedra cumplirá las funciones de Docencia, Investigación y Contextualización del conocimiento a través del estudio y solución de problemas del entorno. Estas funciones deben cumplirse en las cátedras dentro de la más estrecha interrelación e integración, es decir, bajo un enfoque sistémico, holístico e interdisciplinario.

Las Unidades o Cátedras que se conformen para cada disciplina científica operarán bajo el principio de la interactuación o cooperación de unas Unidades con otras, para constituir el Universo de saberes o "Universitas". Las cátedras tendrán la capacidad y dispondrán de las facilidades logísticas para organizar Conferencias, Talleres, Ejercicios, Seminarios, Prácticas, entre otros, en los cuales participarán integradamente Profesores y estudiantes. Además, interactuarán con el sector productivo del país, en cuyas empresas los estudiantes podrían realizar prácticas e investigaciones científicas complementarias,

relacionadas con procesos tecnológicos para la producción económica.

También podrían participar en las actividades académicas de las cátedras los *maestros* de los establecimientos educativos, de diferente índole o nivel de la región, con el objeto de familiarizarse con la metodología científica, con los procesos de creación de nuevos conocimientos: por ejemplo, a través del estudio de problemas de la región de diversa índole y grado de complejidad.

Bajo la orientación de los profesores o catedráticos universitarios de planta de la respectiva Unidad Académica o Cátedra, los maestros de los establecimientos de los niveles primario y secundario desarrollarán actividades dirigidas a la asimilación, comprensión e interrelación de los conceptos, es decir, a la construcción del "**saber inteligente**". El mismo que les permitirá confrontar los conceptos con fenómenos de la realidad local y regional y en la medida que aumente el grado de madurez intelectual, adquieran la capacidad de interrelacionar conceptos, plantear y resolver problemas. En síntesis, si esto se cumple, se habrá contribuido a inducir la capacidad de crear soluciones a problemas o explicaciones desconocidas de fenómenos naturales o sociales, a la par que los profesores de los niveles básico y medio mejorarán la calidad de su formación y estarán mejor preparados para cumplir con la función docente.

Así también se podrán formar maestros para los distintos niveles del sistema educativo, con conocimientos contextualizados en la realidad, capaces de transmitir y motivar a los alumnos para que también puedan lograrlo. De igual modo, las Instituciones de Educación Superior estarán cumpliendo la responsabilidad social que les concierne en el campo de la educación.

Desde luego, el proceso de formación de los nuevos profesionales se complementará mediante la participación en Conferencias, Prácticas, Seminarios y Talleres sobre la Historia de las Ciencias, Epistemología, Humanidades, Historia de Colombia, entre otras actividades, dirigidas a la formación humanística de los futuros profesionales y profesores universitarios. De allí también la importancia de concebir a la Universidad como una *totalidad* cuyas Unidades Académicas Operativas, o Cátedras del campo de las *Humanidades* deben estar abiertas a todos los estudiantes matriculados, cualesquiera que sea la profesión que hubieran elegido.

Si se logran las metas señaladas, educadores y educandos, continuarán formulándose preguntas sobre este o aquel otro fenómeno de la realidad. El *aprender*

inteligente se convertirá en una actividad permanente, es decir, en una actividad de por vida, como se recomienda en la Declaración de la Conferencia Mundial de la UNESCO.

Programas de Educación Superior por televisión, podrán servir de complemento a lo expuesto en los puntos anteriores; pero *nunca* podrán sustituirlos; sobre todo, si se trata de programas inspirados en realidades económicas, sociales, culturales y naturales, totalmente diferentes a la nuestra.

En lo que concierne a la compleja naturaleza de nuestro entorno, no se puede equipararla con la de las Zonas Templadas de la tierra. Mas pronto que tarde, los colombianos debemos saber que la realidad natural de Colombia es, si no la más compleja, una de las más complejas y por ende más frágiles de la tierra. Totalmente diferente de la de las Zonas Templadas del planeta, así en el transcurso de la historia se hayan introducido, desde allá, la mayoría de las plantas y animales de los cuales derivamos el sustento y muchos otros usos. Pero ello no transforma nuestro entorno tropical multidiverso en un medio ni siquiera similar al de las zonas templadas del planeta.

La capacitación del Profesorado de la Educación Superior

Las Unidades Académicas Operativas Interactuantes de docencia, investigación y contextualización del conocimiento o Cátedras que conformarían la totalidad de la Universidad, deben concebirse como "Semilleros" de nuevas promociones de profesionales con capacidad *científica, crítica y creadora*. Pero también de aspirantes calificados a ingresar a la *Carrera del Profesorado Universitario*, a través de la cual, ya bajo la condición de docentes, fortalecerán sus capacidades didácticas, científicas y profesionales, y más tarde, si sus capacidades y experiencias alcanzadas, así lo permitieran, podrían ser llamados a ocupar la elevada responsabilidad de dirigir una Unidad Académica Universitaria, del campo de su especialidad, en alguna de las Universidades de la región, del país, u otros países con los que se hayan suscrito convenios de cooperación.

La formación de profesores a través de evaluaciones esporádicas, de estirpe formal, como es costumbre en muchas de nuestras Universidades; en la práctica, no han dado los resultados esperados. No podría ser de otra manera, por cuanto la formación y calificación de los docentes es un proceso complejo y paulatino, inspirado en el deseo de aprender permanente, como se deriva de las consideraciones ya formuladas. De allí la urgente necesidad

de establecer en las Instituciones de Educación Superior verdaderas "Carreras Profesorales", completamente diferentes de los simples "escalafones salariales".

Programas de Intercambio Académico:

Del grado de desarrollo y calidad que logre la Universidad y por ende las Unidades Académicas para las diferentes disciplinas científicas, sociales y naturales que la conformen, dependerá no solamente su proyección regional, sino también nacional e internacional y la creación de sistemas efectivos de intercambio de profesores y estudiantes en los niveles regional, nacional e internacional que produzcan beneficios mutuos a las instituciones involucradas.

Desde luego, se trataría de intercambios que no solamente favorecerían individualmente a estudiantes y profesores, sino a la respectiva Unidad Académica Operativa, dedicada al cultivo de un área del conocimiento determinada. Así concebidos, los intercambios contribuirán a la vigorización de la proyección de la Universidad hacia la región y a la solución de los problemas que la afecten.

Si fuere necesario, dentro del territorio de la región, las instituciones de Educación Superior, podrán establecer, en los sitios más propicios, *Estaciones*

Laboratorios o Institutos Regionales que complementen a las respectivas Unidades Académicas o Cátedras de la institución de Educación Superior Regional a la cual pertenezcan, con el objetivo de estudiar allí aspectos específicos de la región, de particular interés científico, educativo, económico y social; con apoyo en las facilidades y ventajas que ofrezca el sitio escogido para establecer la Estación, Centro o Instituto Regional.

El funcionamiento de estas instalaciones científicas regionales, y creadas, de acuerdo con las necesidades regionales, podrían optimizarse a través de Programas Nacionales e Internacionales de Cooperación y podrían así contribuir, entre otros, a solucionar el problema de financiación y alcanzar tal calidad y significado para el país que motiven a jóvenes científicos meritorios a permanecer en el país. Así también se contribuiría a solucionar el problema de la "fuga de cerebros". En estas Entidades Regionales periféricas, además, se podrían crear las facilidades necesarias para que operen a manera de "núcleos" de la Red Regional de Establecimientos de Educación Primaria y Secundaria, respectivamente.

De esta manera, los Institutos regionales, extenderán la cobertura de la Educación Superior a los munici-

pios apartados; sobre todo si, paulatinamente, se los dota de las de facilidades necesarias para este fin, además de las que dispongan para el estudio de los recursos naturales, uno de los objetivos centrales de los Institutos Regionales de la respectiva institución de Educación Superior. Desde luego, los Institutos, estarán estrechamente interrelacionadas con otros Institutos, Centros o Instituciones Regionales de diferentes sitios del país.

El mejor conocimiento de las realidades económicas, sociales y naturales de las regiones del país, logrado a través de la investigación científica, promoverá, por lo menos en el largo plazo, formas racionales para utilizar sosteniblemente el medio ambiente y el surgimiento de modos de interacción solidaria. El mejor conocimiento del medio natural y sus recursos contribuirá a crear valores culturales de origen endógeno que no solamente fortalecerán la solidaridad social, sino que contribuirán a incrementar el aprecio por la vida, incluida, desde luego, la vida humana. Amén, de los aportes al conocimiento de las llamadas "Ventajas Comparativas", de nuestro entorno natural, de tan honda trascendencia en un mundo globalizado, en el cual, como se anuncia el fortalecimiento de competitividad será factor relevante para la supervivencia de las naciones.

Así también, nuestras gentes se familiarizarán cada vez más con los conocimientos logrados a través del quehacer científico, los mismos que complementarán los saberes tradicionales. Pero la ciudadanía, en general, se compenetrará paulatinamente con el pensamiento y el comportamiento racional que, entre otros, conduce a aceptar y valorar opiniones opuestas y a resolver las controversias mediante la argumentación, sin tener que recurrir a la imposición, y menos aún, a la violencia.

Por otra parte, el fortalecimiento de la racionalidad en nuestro medio social contribuirá a lograr la meta de la democracia participativa, que supone comprender la realidad a través del pensar y de formular predicciones, lo cual enseña también a argumentar, a valorar y a aceptar opiniones contrarias acertadas. A largo plazo, esta también podría ser una estrategia para que el sistema de Educación Superior, contribuya a alcanzar esta importante meta cultural.

No sobra enfatizar que estos objetivos no se logran, simplemente, a través de *incluir más y más asignaturas* en el curriculum de la respectiva carrera, sobre los temas a que hemos hecho referencia. Es mucho más efectivo realizar el ejercicio de pensar, de examinar permanente y críticamente la realidad, cada vez con mayor profundi-

dad, valiéndose de la experiencia y madurez que, poco a poco, se logren alcanzar con el apoyo en ese atributo conatural a todo ser humano, el atributo de la curiosidad, del asombro, ante la no-explicable, en un momento dado.

El recargo de asignaturas conduce de suyo al aprendizaje superficial y a simple grabación pasajera de la información transmitida en clase también por el profesor. A diferencia del "saber inteligente" que no sólo se guarda en la memoria, sino que se enriquece a lo largo de la vida, mediante su confrontación con la realidad o con nuevos conocimientos.

El recargo en el número de asignaturas, incrementa el enciclopedismo de los planes de estudio; otras veces au-

menta los costos, disminuye la cobertura de la Educación Superior en nuestro país, sin beneficio alguno y se priva a los estudiantes del tiempo necesario para desplegar su propia iniciativa, en función de mejorar su formación profesional, y cultura general, mediante el aprovechamiento de las oportunidades que ofrezcan las Cátedras de la Institución de Educación Superior en la cual se encuentran matriculados. Por lo mismo, no se debe olvidar el principio, proclamado también en la Declaración de la UNESCO, según el cual la formación profesional crítica, científica y creadora del estudiante es uno de los objetivos centrales de la Educación Superior.