

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXVIII

JUNIO DE 2004

NÚMERO 107

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DÍAZ-PIEDRAHITA



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Botánica (Botany)		- La ciencia de simular propiedades de materiales [The science of material properties simulation]	
- Revisión taxonómica del género <i>Canavalia</i> DC. (Leguminosae-Papilionoideae) en Cuba [Taxonomic review of the Cuban <i>Canavalia</i> DC. (Leguminosae-Papilionoideae) genus]		<i>Alvaro L. Morales</i>	253
<i>Ángela Beyra Mutos, Grisel Reyes Artiles, Laura Hernández Valdés & Pedro Herrera Oliver</i>	157	- Propiedades estructurales y magnéticas de aceros Fe-Mn-Al, "Fermanal" [Structural and magnetic properties of Fe-Mn-Al, "Fermanal" steels]	
- A new species of <i>Zephyranthes</i> Herb. s. l. (Amaryllidaceae, Hippeastreace), with notes on the genus in Colombia [Una nueva especie de <i>Zephyranthes</i> Herb. s.l. (Amaryllidaceae, Hippeastreace) con notas sobre el género en Colombia]		<i>G. A. Pérez Alcázar</i>	265
<i>José Luis Fernández-Alonso & Jeroen P. Groenendijk</i>	177	Zoología (Zoology)	
- Obtención de variedades de café con resistencia durable a enfermedades, usando la diversidad genética como estrategia de mejoramiento [New coffee varieties with lasting resistance to pathologies, obtained through use of genetic diversity as a strategic for improvement]		- <i>Conspicuum thatcheri</i> n. sp. (Trematoda: Dicrocoeliidae) de <i>Oryzomys caliginosus</i> (Rodentia, Mammalia) del departamento de Valle, Colombia [<i>Conspicuum thatcheri</i> n. sp. (Trematoda: Dicrocoeliidae) of <i>Oryzomys caliginosus</i> (Rodentia, Mammalia) from Valle department in Colombia]	
<i>Germán Moreno Ruiz</i>	187	<i>C. Rívilas, F. Caro, H. Carvajal & I. Vélez</i>	275
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)		- Una especie nueva de <i>Anadia</i> (Reptilia: Sauria: Gymnophthalmidae) para el noroccidente de la cordillera Oriental de Colombia [A new species of <i>Anadia</i> (Reptilia: Sauria: Gymnophthalmidae) for the northwestern of the eastern Colombian mountain range]	
- La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria [Hydro-climatology in Colombia: a synthesis from interdecadal to diurnal scale]		<i>José Vicente Rueda-Almonacid & José Rances Caicedo</i> ..	281
<i>Germán Poveda</i>	201	- A new <i>Eleutherodactylus</i> (Anura, Leptodactylidae) from Marahuaka Tepui, Amazonas, Venezuela [Una especie nueva de <i>Eleutherodactylus</i> (Anura, Leptodactylidae) de Marahuaka Tepui, Amazonas, Venezuela]	
Ecología (Ecology)		<i>Oswaldo Fuentes & César L. Barrio-Amorós</i>	285
- Diversidad taxonómica y ecológica de la entomofauna micófaga en un bosque altoandino de la cordillera Oriental de Colombia [Taxonomic and ecologic diversity of mycophagous entomofauna in a high andean forest of the easter colombian mountain range]		Notas (Notes)	
<i>Eduardo C. Amat-García, Germán D. Amat-García & Luis G. Henao-M.</i>	223	- Primer registro de una serpiente del género <i>Amastridium</i> Cope, (Serpentes: Colubridae), para Sudamérica [First record of the genus <i>Amastridium</i> Cope, (Serpentes: Colubridae) for South America]	
- Herbivoría en una gimnosperma endémica de Colombia, <i>Zamia encephalartoides</i> (Zamiaceae) por parte de <i>Eumaeus</i> (Lepidoptera: Lycaenidae) [<i>Eumaeus</i> (Lepidoptera: Lycaenidae) herbivory on an endemic Colombian gimnosperma]		<i>José Vicente Rueda-Almonacid & José N. Rueda-Martínez</i> ...	291
<i>Favio González</i>	233	- Reconocimiento de nematodos fitopatógenos en plátanos dominico hartón (<i>Musa AAB Simmonds</i>), África, FHIA-20 y FHIA-21 en la granja Montelindo, municipio de Palestina (Caldas), Colombia. [Recognition of phytopathogenic nematodes in dominico "harton" plantains (<i>Musa AAB Simmonds</i>) Africa, FHIA-20 and FHIA-21 in the Montelindo plantation, Palestina township (Caldas), Colombia]	
Física (Physics)		<i>Óscar Adrián Guzmán-Piedrahita & Jairo Castaño-Zapata</i>	295
- Cotas a nueva física por medio de operadores efectivos de dimensión seis [Effective operators of dimension-six: application to the new physics]		Constitución de la Academia [Members of the Academy].....	303
<i>Roberto Martínez & Diego Torres</i>	245	Publicaciones de la Academia [Publications of the Academy] ...	305

REVISIÓN TAXONÓMICA DEL GÉNERO *CANAVALIA* DC. (LEGUMINOSAE-PAPILIONOIDEAE) EN CUBA

por

Ángela Beyra Matos, Grisel Reyes Artilles, Laura Hernández Valdés* & Pedro Herrera Oliver**

Resumen

Beyra, A., G. Reyes, L. Hernández & P. Herrera: Revisión taxonómica del género *Canavalia* DC. (Leguminosae-Papilionoideae) en Cuba. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (107): 157-175, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se presenta una monografía del género *Canavalia* DC. en Cuba con información sobre taxonomía, nomenclatura, sinonimia, distribución geográfica, ecología y descripciones morfológicas de las ocho especies representadas en la flora cubana. Se incluyen claves dicotómicas para diferenciar las especies, y se comentan aspectos referentes a la subdivisión del género en subgéneros y sus representantes en Cuba. Se brindan datos sobre la historia natural y cultural del género en el mundo, y se relaciona la filogenia con los patrones de distribución de las especies de *Canavalia* a la luz de la hipótesis Boreotropical y el registro fósil de leguminosas. Se adjuntan ilustraciones y mapas de distribución.

Palabras clave: Leguminosae, Papilionoideae, *Canavalia*, Descripción taxonómica, Cuba.

Abstract

A taxonomic monograph on *Canavalia* genus in Cuba is presented with information about taxonomy, nomenclature, synonyms, geographical distribution, ecology and morphological description of eight species represented in the Cuban flora. Keys to the Cuban species as well as subgenera represented in Cuba are included. Some general aspect in the natural and cultural history of *Canavalia* are further outlined. The phylogeny and distribution pattern of the species of *Canavalia* and its continental parents are discussed in the light of the Boreotropical hypothesis and the legume fossil record. This work contains illustrations and maps of distribution.

Key words: Leguminosae, Papilionoideae, *Canavalia*, Taxonomic description.

* Centro de Investigaciones de Medio Ambiente de Camagüey (CIMAC). Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Cisneros 105 entre Pobre y Angel, Camagüey C.P. 70100, CUBA. Teléfono: (053) (032) 296349. Fax: (053) (032) 298268. E-mail Address: abeyraes@yahoo.com.mx

** Instituto de Ecología y Sistemática. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Carretera de Varona km 3 1/2, Capdevila, Boyeros, Apartado Postal 8029, C.P. 10 800, Ciudad de la Habana, CUBA. E-mail Address: botanica.ies@ama.cu

Introducción

El género *Canavalia* tiene aproximadamente 60 especies pantropicales (R.H. Maxwell, 1998, Com. pers.), con concentración neotropical, ya que alrededor de 37 especies se distribuyen en el área neotropical, y alrededor de 15 especies en el área paleotropical, mayormente en el área oriental del Océano Índico y porción occidental del Océano Pacífico; unas pocas especies se distribuyen en Hawaii y solamente una especie, *C. rosea*, es pantropical, la cual constituye un elemento común en playas y vegetación litoral. Sin embargo, hay al menos 4 especies que se han cultivado como forraje y alimento. Así, *C. ensiformis* se cultivó en América como alimento en la etapa precolombina (Sauer, 1964; Sauer & Kaplan, 1979; D'Arcy, 1980; Aymard & Cuello, 1991). La especie *C. rosea* y probablemente otras especies de *Canavalia*, especialmente las cultivadas, forman parte de la flora que está a la deriva al ser llevadas por las corrientes marinas (R.H. Maxwell, 1998, Com. pers.).

La importancia del género *Canavalia* para la alimentación animal se concentra en el alto contenido de proteínas asimilables (27%-29%) que posee en sus hojas, flores, frutos y semillas (Wolff & Kwolek, 1971) y por los diversos usos que se le han dado desde épocas muy antiguas (NAS, 1979; Sauer & Kaplan, 1979). El género *Canavalia* se ha clasificado junto a *Galactia* como promiscuo y efectivo debido a que nodulan de una manera efectiva con un rango amplio (Date & Halliday, 1980). Por otra parte, las especies de *Canavalia* están incluidas entre los pocos granos o semillas de leguminosas, junto a *Lathyrus sativus* y especies de *Mucuna* que contienen toxinas tales como alcaloides y aminoácidos no proteicos en niveles que plantean un problema a la humanidad. Afortunadamente, ninguno de estos cultivos es de importancia económica fundamental. Los mismos sirven como forraje, abonos verdes, y se usan en la alimentación humana sólo en caso de extrema pobreza, lo cual significa que las propiedades venenosas se unen a otros problemas y el efecto combinado puede ser severamente nocivo (Johns, 1994).

La ubicación del género *Canavalia* dentro de la subtribu *Diocleinae* está sustentada por caracteres tales como folíolos y cáliz eglandulares; estilo terete; inflorescencias por lo general nodosas; bractéolas presentes; semillas con hilo linear; presencia del aminoácido canavanina; y número cromosómico de $2n=22$ (Lackey, 1981).

El objetivo de este trabajo es presentar las especies de *Canavalia* descritas hasta hoy para la flora cubana con una descripción de su tratamiento taxonómico, distribución, ecología y estado de conservación.

Materiales y Métodos

Las técnicas utilizadas corresponden a las empleadas clásicamente en taxonomía vegetal. Se analizaron en detalle las colecciones del género *Canavalia* existentes en herbarios del país (HAC, HAJB, HACC), y en herbarios extranjeros (F, NY, MO, S, G, GH, UC, A, BM, P, W, US, SING, y WIS). Los acrónimos de estos herbarios, especificados entre paréntesis, están de acuerdo con el Index Herbariorum (Holmgren, *et al.*, 1990).

La delimitación de las especies de *Canavalia*, aplicando el concepto filogenético de especie (Nixon & Wheeler, 1990), se efectuó usando las diferencias morfológicas estables observadas en los especímenes de herbario para distinguir cada especie. Es decir, se estimaron las especies por las divergencias morfológicas cualitativas, tanto de caracteres vegetativos como reproductores observadas en los especímenes de herbario, lo cual ayudó a completar y a enriquecer las descripciones taxonómicas de cada especie con caracteres útiles en la clasificación, así como también las claves dicotómicas para identificar rápidamente las mismas. Igualmente, las mediciones de los caracteres morfológicos cuantitativos ayudaron a completar dichos datos y a la delimitación de la variabilidad de las especies, incluyendo los valores máximos y mínimos, utilizando además los números aleatorios del programa NTSYS-pc (Rohlf, 1993) para el muestreo de las mediciones en los especímenes de herbario. Así, durante el muestreo se midieron los 110 especímenes revisados.

Los datos relativos a las localidades ecótopos y altitudes fueron considerados para este estudio. Además se hicieron salidas de campo con la finalidad de recolectar muestras con flores y frutos, así como actualizar datos de ecología y distribución.

Se actualizó la nomenclatura según la literatura taxonómica reciente revisada para este género (D'Arcy, 1980; Polhill, 1981; Lackey, 1981; Proctor, 1984; Howard, 1988; Liogier & Martorell 1982; Liogier 1985; Liogier, 1988; Lourteig, 1988; Wiersema, 1990; Aymard & Cuello, 1991; Lewis & Polhill, 1998; Kajita *et al.*, 2001).

Los especímenes recolectados se depositaron en el Herbario del Centro de Investigaciones de Medio Ambiente, CIMAC del CITMA en Camagüey (HACC).

Se llevó a cabo la producción electrónica de los mapas de distribución geográfica de *Canavalia* en el territorio cubano, los cuales se elaboraron a partir de la base de datos de especímenes, obtenida de las localidades inventariadas por especie de las diferentes fuentes documenta-

les (colecciones de herbario, literatura especializada, monografías, etc.), las cuales fueron georeferenciadas en mapas electrónicos utilizando la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (GIS).

La nomenclatura sobre formaciones vegetales y tipos de suelos consideradas en este estudio, es la publicada en el Nuevo Atlas Nacional de Cuba (Instituto de Geografía ACC e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, 1989), en los Mapas de Vegetación Actual y Suelo respectivamente, a escala 1:1 000 000.

Se realizó además una evaluación de todas las especies de *Canavalia* presentes en la flora cubana, basada en los criterios B y D de la UICN (1994) que sustentaron la proposición de categorías de amenaza de extinción.

Tratamiento Taxonómico

Canavalia. DC., Prodr. 2:403.1895, Mém. Légum.: 375. 1826; Adans., Fam. Pl. 2:325, 531. 1763, como *Canavali* emend.; Sauer, Brittonia 16:106-181 1964. nom. Conserv.

SPECIES TYPICA: *Canavalia ensiformis* (L.) DC. Vs *Dolichos ensiformis* L. (*Canavali* Adans.).

Clementea Cav., Anales Ci. Nat. 7:63. 1804.

Malocchia Savi, Nuovo giorn. Lett. (Ser. 3):113. 1824, nom. Superfl.

Wenderothia Schldl. Linnaea 12:330. 1838.

Neurocarpum Hook. & Arm., Bot. Beechey Voy. 286. 1838.

Lianas lignificadas o hierbas perennes, unas pocas especies cultivadas como anuales, similar en hábito a los subarbustos erectos de *Phaseolus*. Tallos rastreros o trepadores, robustos, mayormente pubescentes. Hojas alternas pecioladas, pinnado-trifolioladas, folíolos de 7-30 X 5-20 cm; lámina entera, cartácea o coriácea, completamente glabra en unas pocas especies, pero generalmente con pelos aplicados o ascendentes sobre ambas superficies foliares, más esparcidos sobre el ápice que sobre la porción basal, con lámina comúnmente ovada y acuminada, pero además elíptica, obovada, oblonga, lanceolada o combinaciones de éstas, así como oblongo-circulares, con nervadura pinnada; folíolos laterales a menudo ligeramente asimétricos; pecíolos más cortos o de igual longitud que el folíolo terminal; estípulas pequeñas, deciduas e inconspicuas, no estriadas, lanceoladas u oblongas, a veces espalonadas e hinchadas debajo, estipelas pequeñas, deciduas; peciólulos

de 5-7 mm de longitud, muy raramente glabros, generalmente con pelos ascendentes.

Inflorescencias axilares, racemosas, o flores en pares o en pequeños grupos a lo largo del raquis, el cual está engrosado en los puntos de inserción, portando 2 a 6 flores pediceladas, cada una con dos bractéolas deciduas en la base del cáliz; flores comúnmente resupinadas, mayormente grandes, a menudo más bien de textura gruesa con pétalos de 1.5-6.0 cm de longitud, vistosos, púrpura-violeta, a rosados o blancuzcos. Cáliz de 8-25 mm, tubular en la base, bilabiado, verde generalmente con manchas purpúreas, con escasos a densos pelos aplicados o ascendentes; labio inferior con tres lóbulos pequeños; labio superior truncado o con dos lóbulos grandes unidos a lo largo del borde superior, a veces brevemente rostrado.

Estandarte obovado, reflexo, con un par de aurículas y callosidades a lo largo de la vena media en el subgénero *Canavalia*, o las callosidades ausentes en el subgénero *Wenderotia*, no representado en Cuba; alas libres, estrechas, ligulares, obtusas, auriculadas en la base arriba de la uña; quilla más ancha que las alas, incurva, obtusa o rostrada, auriculada, a menudo torcida. Estambres 10, generalmente monadelfos o pseudomonadelfos, con el estambre vexilar más o menos libre (el vexilar libre en la base y connado arriba con los demás, raramente completamente libre), los demás filamentos fusionados; anteras uniformes versátiles; ovario sésil puberulento, multiovulado; estilo delgado, incurvo, glabro; estigma pequeño terminal.

Legumbre de (6) 10-40 (50) cm de longitud y (1) 1.5-5 (8) cm de ancho, linear a oblonga, los costados paralelos o ligeramente a fuertemente incurvas, aplanadas o infladas, indehiscente o dehiscente, a veces con dehiscencia explosiva, 2-valvar, las valvas coriáceas, longitudinalmente acostillada a lo largo de ambas suturas y con costillas adicionales próximas a la costilla ventral, en la mayor parte de las especies (1-3 costillas extras situadas a 3-6 mm de la sutura ventral).

Semillas de 7-35 mm de longitud, en número de (1-) 4-15, enclavadas en un endocarpo papiráceo, forma de la semilla ovoide, elipsoidal o reniforme, comprimida, hilo linear de 4-35 mm de longitud, gris o negro, generalmente rodeado por un reborde pardo, con un apéndice funicular pequeño, papiráceo, persistente, testa de color blanco, pardo, (variegado con blanco), rojo, negro o verde.

PALINOLOGÍA: **Ferguson & Skvarla** (1981), caracterizaron el polen de *Canavalia* como heteropolar, oblato, con endexina gruesa, tectum casi entero, grueso, y

estratificación de la pared no especializada dentro de la tribu como un todo.

NÚMERO CROMOSOMÁTICO: $n=11$ (Goldblatt, 1981); $2n=22$.

CARACTERES CITOLÓGICOS: presencia de cristales epidérmicos pareados (Lackey, 1981).

TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN: El género es pantropical con aproximadamente 60 especies. (R.H. Maxwell, 1998, Com. pers.).

El género *Canavalia* está subdividido en 4 subgéneros (Sauer, 1964; Gillett *et al.*, 1971; Fantz, 1976; Aymard y Cuello, 1991)

Subgénero *Catodonia* propio del Nuevo Mundo.

Subgénero *Wenderotia* propio del Nuevo Mundo.

Subgénero *Canavalia* del Viejo y Nuevo Mundo.

Subgénero *Maunaloa* endémico de Hawaii.

En Cuba el género *Canavalia* sólo está representado por los subgéneros *Catodonia* y *Canavalia*.

CLAVE PARA LAS ESPECIES CUBANAS DE CANAVALIA

1 a. Inflorescencia con cada nudo subtendiendo de 3-6 flores; dientes inferiores del cáliz largos y curvos, unidos en una estructura en forma de mandíbula; labio superior del cáliz comúnmente plegado en el margen; costado superior convexo o llanamente cóncavo, sin giba o constricción, no apiculado en el ápice (Fig. 1); legumbre sin costillas extras 1. *C. nitida*.

1 b. Inflorescencia con cada nudo subtendiendo de 2 a 3 flores; dientes inferiores del cáliz desunidos; labio superior del cáliz con márgenes no plegadas, costado superior constricto por detrás, no apiculado o ligeramente apiculado en el ápice (Fig. 2); legumbre con cada valva teniendo costillas a lo largo de ambas suturas y una costilla extra más cerca de la costilla ventral, cuya distancia en milímetros varía según las especies 2.

2 a. Semillas pequeñas de hasta 11 mm de longitud, negras en seco 2. *C. microsperma*.

2 b. Semillas de hasta 18-35 mm de colores rojo, rojo vino, pardo-rojizo, pardo, pardo oscuro jaspeado, blanco, color marfil, o blanco-variegado con pardo, o verde olivo 3.

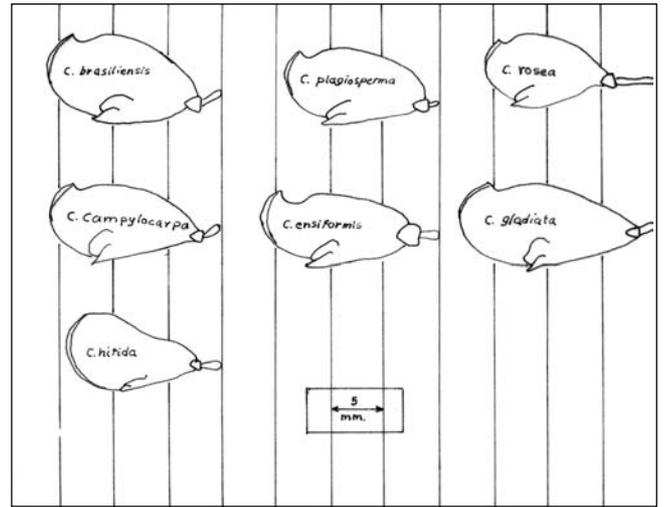


Figura 1. Contorno del cáliz en las especies cubanas de *Canavalia*.

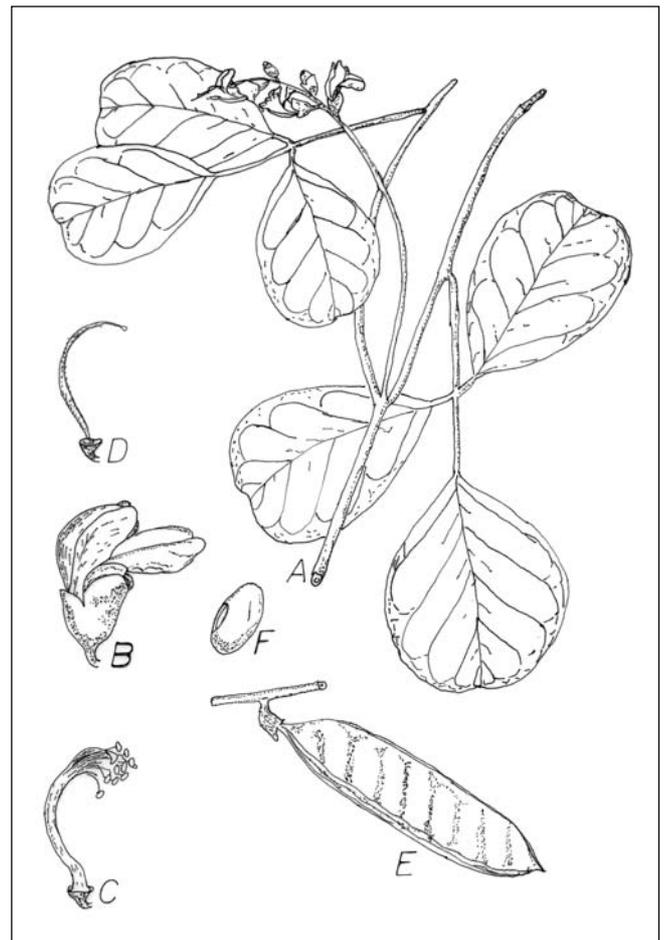


Figura 2. *Canavalia rosea* (SW.) DC 46018 (HAJB).- A, Hábito (X 1/2); B, Flor (X 1 1/2); C, tubo estaminal (X 1 1/2); D, Gineceo (X 1 1/2); E, Legumbre (X 1/2); F, semilla (X 1).

- 3 a. Legumbres mayores, con dimensiones de hasta 40 X 5 cm, más anchas hacia la porción próxima al ápice 3. *C. gladiata*.
- 3 b. Legumbres mayores, con dimensiones de hasta 15-35 X 3.6 cm, más o menos de igual anchura de la base al ápice 4.
- 4 a. Legumbre a menudo fuertemente incurva, encorvada en semicírculo, amarillo brillante en material fresco y pardo-oscuro en seco 4. *C. campylocarpa*.
- 4 b. Legumbre generalmente más o menos recta, nunca incurva ni encorvada en semicírculo, tostado-pálida, a pardo-oscuro en material seco y fresco 5.
- 5 a. Cáliz con labio superior ligeramente apiculado en el ápice 6.
- 5 b. Cáliz con labio superior no apiculado en el ápice ... 7.
- 6 a. Legumbre linear-oblonga con la costilla extra situada a 5 mm de la costilla ventral; semillas color marfil o blancas 5. *C. ensiformis*.
- 6 b. Legumbre oblonga con la costilla extra situada a 6 mm de la costilla ventral; semillas color olivo, pardo o pardo-rojizo 6. *C. brasiliensis*.
- 7 a. Folíolos ovados, obtusos y brevemente apiculados; legumbre de 25 X 4 cm; semillas de hasta 26 mm de longitud, oblicuas, elipsoidales, con la base bruscamente adelgazada, pardo claro o blancas jaspeadas con pardo, hilo de 11 mm 7. *C. plagiosperma*.
- 7 b. Folíolos anchamente obovados u orbiculares, apicalmente redondeados o emarginados, anchamente cuneados, redondeados o truncados en la base; legumbre de 7-15 X 2-2.5 cm; semillas de 12-18 mm de longitud, ovoides a subglobosas, no oblicuas con la base no bruscamente adelgazada; pardas con jaspeaduras más oscuras, con listas amarillo pálido a casi negro, hilo de 7 mm 8. *C. rosea*.

Subgénero 1. *Catodonia*.

SPECIES TYPICA: *Canavalia nitida* (Cav.) Piper

Catodonia Sauer in Brittonia 16:106-181. 1964. Tipo: *Canavalia nitida* (Cav.) Piper.

Clementea Cav., Anal. Ci. Nat. 7:63. 1804. (As genus) tipo: *C. nitida* Cav. Non *Clementea* Cav. 1803.

Monodon E. Mey., Comm. Pl. Afr. Austr. 149. 1835. (As section) Tipo: *C. monodon* E. Mey. (*C. bonariensis* Lindl.).

Clementea (Cav.) Piper, Contr. U.S. Nat. Herb. 20:558. 1925. (As section).

Diplegma Piper, Contr. U.S. Nat. Herb. 20:558. 1925. (As section) Tipo: *C. parviflora* Benth.

Inflorescencia nudosa con cada nudo subtendiendo de 3-6 flores. Cáliz cartáceo, venas prominentes; dientes inferiores del cáliz largos y curvos, unidos en una estructura en forma de mandíbula (Fig. 1); labio superior del cáliz no apiculado en el ápice, comúnmente plegado en el margen, costado superior convexo o llanamente cóncavo sin giba o constricción. Estandarte excediendo las alas y quilla, obcordiforme, no apiculado; lámina auriculada en la base encima de la uña. Alas no retorcidas. Quilla obtusa. Legumbre glabrescente, sin costillas extras; hilo casi igualando o la mitad del contorno de la semilla.

Este subgénero comprende 7 especies que se distribuyen en las Antillas y Sudamérica, 1 especie además naturalizada en Sudáfrica y Reunión. En Cuba este subgénero sólo está representado por la especie *Canavalia nitida*.

1. *Canavalia nitida* (Cav.) Piper, Contr. U.S. Natl. Herb. 20 (14): 562. 1925.

TYPUS: "*Clementea nitida* Cav., Anal. Ci. Nat. 7:64. 1804. (seed from Cuba, cultivated by Canavilles in Madrid, 1803, lectotype, illustration, t. 47, accompanying original description)."

Bas. *Clementea nitida* Cav. Anal. Ci. Nat. 7:64. 1804.

Sin.: *Canavalia cubensis* Griseb., Mem. Amer. Acad. 8:178. 1861.

Sin.: *Canavalia rusiosperma* Urban, Symb. Antill. 1:473. 1900.

Sin.: *Canavalia bahamensis* Britt., Bull. N.Y. Bot. Gard. 4:119. 1905.

Sin.: *Canavalia ekmanii* Urban, Repert. Sp. Vov. 15:317. 1918.

Enredadera con tallos trepadores o rastreros, los tallos viejos a veces de 10 cm de espesor, cerca de la base, glabros, o las ramas jóvenes escasamente pubescente. Folíolos comúnmente de 5-8 (11) X 2.5-3.5 cm; oblongo-elípticos u ovados, abruptamente acuminados en un ápice obtuso corto, coriáceos, pubescencia de tricomas cortos, blancos, muy esparcidos sobre el peciólulo, ambas superficies de la lámina glabras y con venación finamente reticulados y ligeramente realizadas.

Inflorescencia en racimos más largos que las hojas que lo subtienden, de 5-25 cm de longitud, pedicelos de 2-4 mm de longitud. Cáliz de hasta 13 mm de longitud; pubescencia muy corta, blanca, muy esparcida, labio superior del cáliz más largo que el tubo, costado superior llanamente convexo, no apiculado, hendido en la anthesis; dientes inferiores del cáliz unidos en una base común, en forma mandibular, de 2 mm de longitud, el diente más inferior de 1 mm de longitud, subulado, excediendo los agudos lóbulos laterales.

Flores con pétalos púrpura brillante o rojizo, estandarte de alrededor de 2.5 cm de longitud.

Legumbre linear-oblonga, comprimida, de 10-25 X 4-5 cm, ligeramente inflada, paulatinamente e irregularmente dehiscente, pardo-oscuro, bicarinada, esto es, cada valva con una sola costilla a lo largo de la sutura ventral, sin costillas extras; semillas suborbiculares o elípticas, carmesí o de color rojo vino muy oscuro de 20 X 16-20 mm, 16-17 mm de espesor, no comprimidas, no boyantes, pero impermeables al agua por al menos un año y medio. Hilo negruzco, linear, generalmente de 15-20 mm de longitud, raramente 5 mm más corto o más largo.

FENOLOGÍA: Flores todo el año de enero a diciembre, frecuentemente desde junio a agosto.

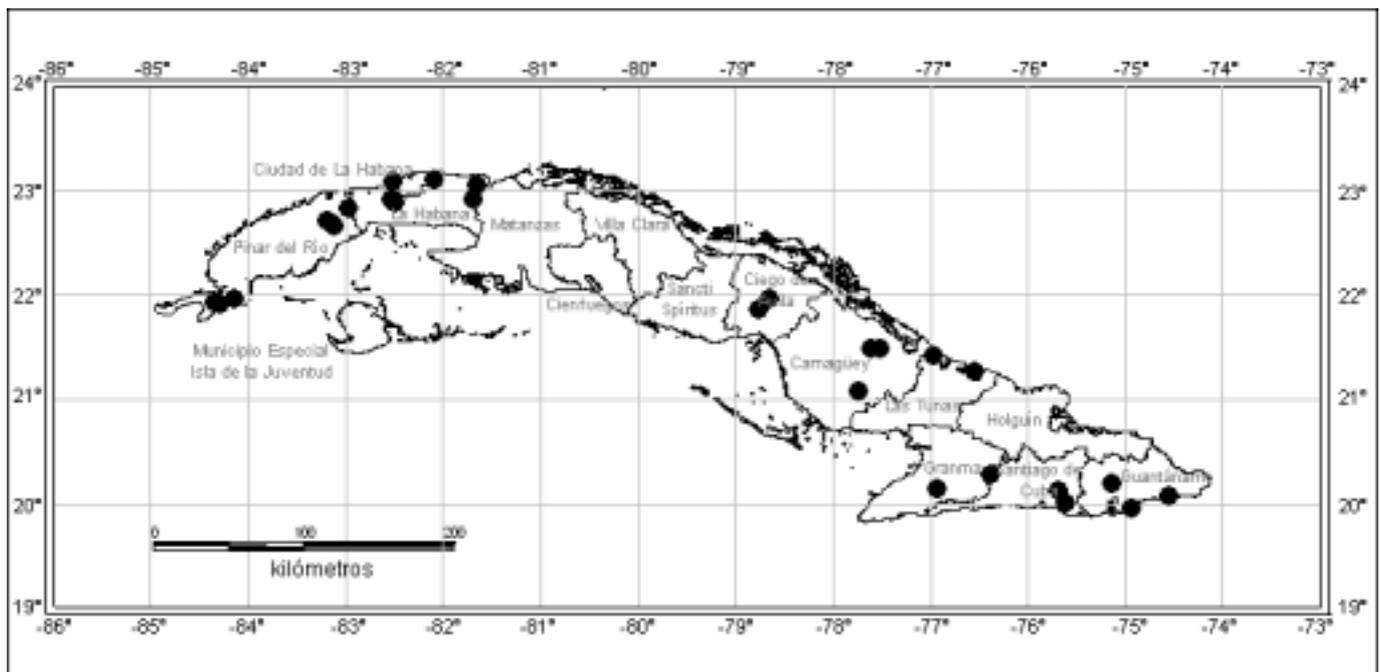
HÁBITAT: Sobre rocas secas, farallones, cerros calizos y sitios abiertos de vegetación de gramíneas o trepando sobre arbustos y árboles especialmente a lo largo de las márgenes del bosque, desde las tierras de baja altitud del bosque de galería hasta al menos 1500 m de altitud, raramente cultivada como ornamental. En Cuba, en matorral xeromorfo costero sobre carso, vegetación ruderal y segetal, bosque semidecíduo mesófilo sobre diente de perro, bosque siempreverde micrófilo, vegetación de Ciénaga, pinares de arenas blancas próximos a los manglares.

DISTRIBUCIÓN: México; Cuba; Isla Caimán; Bahamas, Haití, República Dominicana, Puerto Rico y demás Antillas Mayores excepto Jamaica; Islas Vírgenes (Santo Tomas); Islas Vírgenes Británicas (Tórtola). En Cuba Occidental, Central y Oriental (Isla de la Juventud, Pinar del Río, Ciudad de la Habana, Habana, Matanzas, Villa Clara, Ciego de Ávila, Camagüey, Las Tunas, Granma, Santiago de Cuba, y Guantánamo) (mapa 1).

NOMBRES VERNÁCULOS: “Cayajabo”, “Mate cayajabo”, “Mate colorado”

ESTADO DE CONSERVACIÓN: Menor Riesgo (LR), subcategoría de preocupación menor (lc).

MATERIAL EXAMINADO: CUBA. Isla de la Juventud: Blain 97 (F); Britton & Wilson 15126 (NY).-Pinar



Mapa 1. Distribución de *Canavalia nitida*.

del Río: *León & Humphrey 4749* (NY); *Shafer 10527* (MO, NY); Las Martinas, *Acuña y Roig 23438* (HAC); camino de la Guásima, Rangel, *Hno. Alain 1276* (HAC); carretera a Rancho Mundito, Taco-Taco, *Acuña y Roig 23437* (HAC); Las Animas, Rangel, Taco-Taco, *Acuña y Roig 8929* (HAC); Sierra del Rosario, Loma del Salón, *Acevedo et al. 5660* (HAC); Península de Guanahacabibes, *Grupo Humboldt 26535* (HAC); Guanés, Península de Guanahacabibes, monte seco entre Valle San Juan y la costa, *Bisse y Rojas 2046* (HAJB).- **La Habana:** *Ekman 364* (S); *Ramón de la Sagra 76* (G); San Antonio de los Baños, Earle 4565 (HAC); Laguna de Ariguanabo, *León 23522* (HAC).- **Ciudad de la Habana:** Mar Santa Fe, Oeste de la Habana, León 13090 (HAC); Guanabacoa, Loma de la Jata, *Bisse y Meyer, 42050* (HAJB).- **Matanzas:** Britton et al. 88 (F, GH, NY); *Britton & Wilson 74* (NY); *Ekman 17219* (NY, S); Pan de Matanzas; cerca de Corral Nuevo, *León 12497* (HAC).- **Villa Clara:** Howard 5236 (GH, NY, UC); *Jack 7650* (A, S); Las Vegas, San Blas, *J.G. Jack 5927* (HAC).- **Ciego de Avila:** Zona Norte de Ciego de Avila, en ciénagas, *Vargas 1399* (HACC); Santa Ana, Tamarindo, Florencia, *Beyra, Barreto y Enriquez 1566* (HACC).- **Camagüey:** Shafer 587 (F, NY) Los Naturales, La Belén, Najasa, *Risco 8160* (HACC); Ulvillar del Brazo, Minas, *Herrera 929* (HACC); El Pocito, Minas, *Barreto y Enriquez 999* (HACC); Nuevas Grandes, Santa Lucía, Nuevitas, *Ávila y Enriquez 2202* (HACC).- **Las Tunas:** Manigua costera en el Socucho, Playa de Puerto Padre, *López Figueiras 24* (HAC).- **Granma:** Bartolomé Masó, estribo de la Falda Norte de la Sierra Maestra al Este del Brazón de Santana, *Bisse et al. 40347* (HAJB).- **Santiago de Cuba:** Sierra Maestra, *J. Zantovska 204* (HAC); Camino del Olimpo, Gran Piedra, Clemente y Crisogono 6551 (HAC); Gran Piedra, *Acuña, Pino y Alonso 2113* (HAC) Loma del Gato, *Trujillo y Méndez 978* (HACC).- **Guantánamo:** bosque Palenquito, Yateras, *Alain 3113* (HAC); En las Crestas del Puntón del Cuero, Imías, *Alain & Morton 5012* (HAC); Monte cerca de Monte Cristi, *Bisse 20250* (HAJB).- **Sin localidad exacta de Cuba Oriental:** *Ekman 6081* (NY, S); *Wright 139* (BM, G, GH, P, S, W).- **Sin localidad exacta:** *Rugel in 1849* (NY).

Subgénero 2. *Canavalia*

SPECIES TYPICA: *C. ensiformis* (L.) DC.

Malocchia Savi, Nuov. Giorn. Pisa 8:113. 1824. (As genus) Lectotype species, *M. ensiformis* (L.). Savi (*C. ensiformis* (L.) DC.).

Malochia E. Mey., Com. Pl. Afr. Austr. 148. 1835. (AS section) Tipo: *Dolichos emarginatus* Jacq. (*C. maritima* (Aubl.) Thouars).

Eucanavalia Benth. Ann. Wien. Mus. Naturg. 2:135. 1837. (As section) Lectotype species, *C. ensiformis* (L.) DC.

Didiplopleura Piper, Contr. U.S. Nat. Herb. 20:560. 1925 (As section) tipo: *C. anomala* Piper (*C. brasiliensis* Mart. ex Benth.).

Inflorescencia nudosa con cada nudo subtendiendo de dos a tres flores. Cáliz cartáceo, venas prominentes; márgenes del labio superior no plegadas, costado superior constricto por detrás, no apiculado o ligeramente apiculado en el ápice; dientes inferiores del cáliz desunidos. Estandarte igualando o excediendo las alas y la quilla, obcordiforme, no apiculada; lámina auriculada en la base arriba de la uña. Alas no retorcidas. Quilla obtusa. Legumbre glabrescente; cada valva con costillas a lo largo de ambas suturas y una costilla extra, más cerca de la costilla ventral que la del nervio medio del carpelo en la valva.

Este subgénero consta de 23 especies distribuidas en trópicos y subtrópicos de ambos hemisferios. En Cuba este subgénero está representado por 7 especies: *C. ensiformis*, *C. rosea*, *C. gladiata*, *C. plagiosperma*, *C. campylocarpa*, *C. brasiliensis*, y *C. microsperma*.

2. *Canavalia microsperma* Urban, Symb. Ant. 5:372. 1908.

TYPUS: "Hab. In Cuba: Ramón de la Sagra". Lectotypus: Designado aquí, acorde con Sauget & Liogier (1951), Pinar del Río, próximo a Cortés, Las Martinas, *Acuña & Roig, 17017* Abril de 1938. (HAC).

Lianas con ramas teretes más o menos estriadas, glabras. Hojas pinnado-trifolioladas; folíolos de 5-8.5 X 2.5-4 cm, cartáceo-coriáceos, glabros, oval-elípticos, ápice acuminado, plegado, muy obtuso, submarginado, la base redondeada a subtruncada, reticulados en el envés, pecíolo de 3-4 cm; peciólulo de los folíolos laterales de 3.5-4 mm de longitud, y de hasta 15 mm el del folíolo terminal. Estípulas triangulares de 1-1.5 mm de longitud, frecuentemente deciduas.

Inflorescencia de 18 cm de longitud, incluyendo el pedúnculo de 7 cm de longitud. Pedicelos fructíferos de 0.7-1 cm de longitud. Legumbre de 10-15 X 3.6 cm, linear-oblonga, con una costilla extra situada a 4-5 mm de la sutura ventral, comprimida, glabra, singularmente no constricta entra las semillas, espiralmente dehiscente, ápice oblicuo-truncado, pardo-oscuro en seco con semillas en número de 8-10. Semillas de 8-11 X 6-9 mm, oblicuas, ovado-rotundiformes, convexas, de 6 mm de espesor, negras en seco, hilo linear, ocupando 2/5 del contorno de la semilla.

FENOLOGÍA: Especímenes florecidos y fructificados concentrados en los meses de abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre.

DISTRIBUCIÓN: Endémica de Cuba en la Provincia de Pinar del Río y en el Municipio Especial Isla de la Juventud. Inicialmente reportada exclusivamente de Cortés, Pinar del Río por **Sauget & Liogier** (1951), pero por colectas posteriores, realizadas por investigadores del Proyecto Flora de Cuba del Jardín Botánico Nacional, se ha reportado además de la Isla de la Juventud (mapa 2).

HÁBITAT: En la provincia de Pinar del Río, se reporta una colecta de esta planta por **Acuña & Roig** en 1938 (17017 HAC), situada en la zona de mayor endemismo del occidente del país, caracterizada por suelos muy arenosos de arenas cuarcíticas con muy baja fertilidad y escurrimiento deficiente, es un suelo poco evolucionado, arenoso-cuarcítico gleysoso con suelos hidromórficos, pantanoso-mineral, y en una vegetación de pinares sobre arenas cuarcíticas con *Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis*, situada en el borde del bosque siempre verde de mangle, zona baja a 2 ó 3 metros sobre el nivel del mar en una llanura acumulativa formada por rocas sedimentarias carbonatadas y corteza de intemperismo caolínica cuarcítica y depósitos arenosos. Esta vegetación actualmente está muy degradada, razón por la cual **Borhidi & Muñiz** (1983) reportaron esta especie en peligro de extinción.

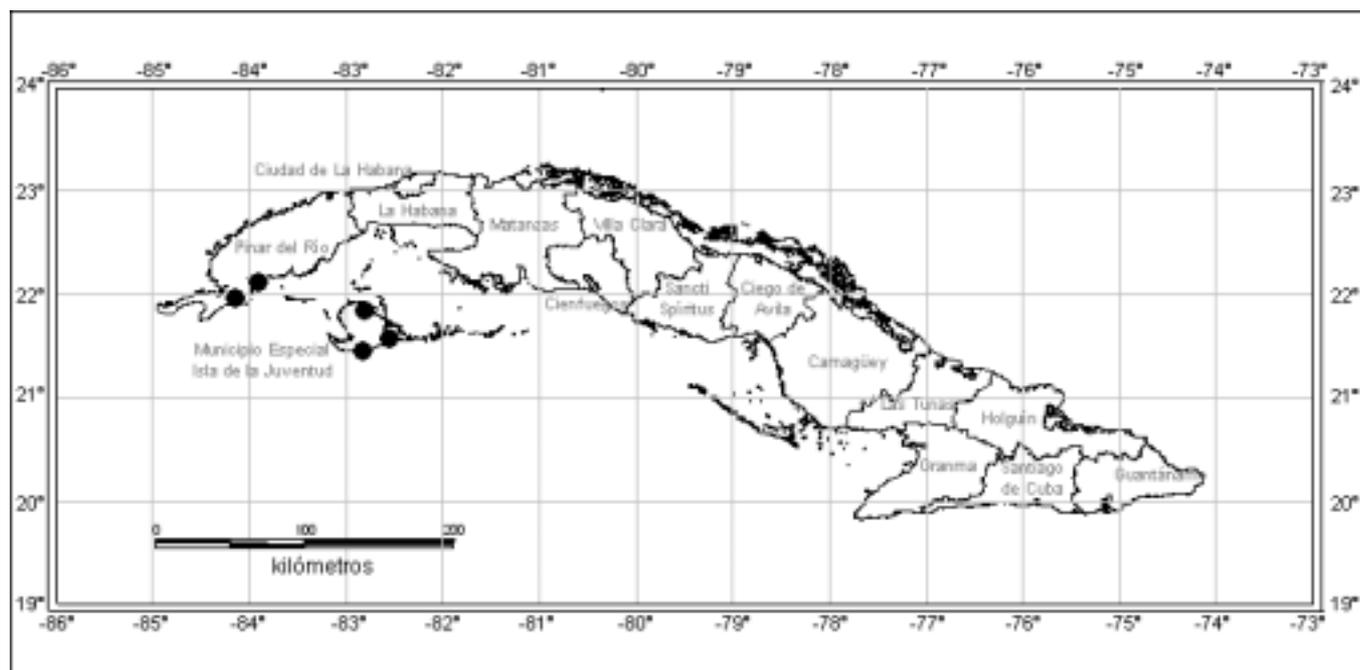
En la Isla de la Juventud también se reporta esta planta por colectas relativamente recientes, que si bien no aparecen exactamente en el mismo tipo de paisaje de la

provincia de Pinar del Río, estas localidades de la Isla de la Juventud, tienen en común con aquella provincia, el mismo tipo de relieve, orientación, y el mismo tipo de roca carbonatada, así como también ambas localidades aparecen en llanuras marinas bajas, todo lo cual pudiera haber facilitado la migración de esta especie endémica cubana dentro del territorio a esta área de la isla de la Juventud.

En la Isla de la Juventud esta especie se localiza por debajo de 3 metros sobre el nivel del mar, en matorral secundario con pastizales sobre carso desnudo y semi-desnudo en una llanura medianamente húmeda cársica formada por rocas sedimentarias carbonatadas. Además aparece en la Isla de la Juventud en bosque semideciduo sobre suelo ferralítico rojo rendzina roja y negra y afloramiento de roca.

ESTADO DE CONSERVACIÓN: En Peligro (EN).

MATERIAL EXAMINADO: Cuba. **Isla de la Juventud:** Base de Sierra de Casas, *Alain & Killip 2262* (HAC); Camino de Cayo Piedras, al Sur, cercanías de Cayo Piedras, *Berazain et al. 48381* (HAJB); parte Sur de la Isla, en el camino de Cayo Piedra a Punta del Este, *Bisse, Lippold; Klotz 26182* (HAJB); Camino de Punta Piedra hasta El Rincón de Guanál, *Álvarez et al. 45693* (HAJB); Camino de Cayo Piedra a Playa Larga, *Bisse et al. 32842* (HAJB);



Mapa 2. Distribución de *Canavalia microsperma*.

Camino de Cayo Piedra a Punta del Este, *Álvarez et al.* 45626 (HAJB).- **Pinar del Río:** Próximo a Cortés, Las Martinas, *Acuña & Roig 17017* (HAC).

3. *Canavalia gladiata* (Jacq.) DC; Prodr. 2:404. 1825.

TYPUS: "Material cultivated in Vienna, lectotype! Illustration in Jacq. Ic. Rar. 3, t. 560.1786-93; holotypus, BM "

Bas. *Dolichos incurvus* Thunb., Fl. Jap. 280. 1784.

Sin.: *Dolichos gladius* Jacq., Coll. Bot. 2: 276. 1788.

Enredaderas anuales o perennes. Tallos teretes, glabros con unos pocos pelos diminutos, retrorsos, débiles. Hojas pinnado-trifolioladas. Folíolos de 7.5-20 X 5-12 cm, cartáceos, ovados, acuminados hasta presentar una punta larga aguda; pubescencia de pelos cortos, blancos esparcidos sobre los peciólulos y ambas superficies de la lámina; peciolo de 5-12 cm de longitud; raquis de 2.5-5 cm de longitud; peciólulos de 4-7 mm de longitud; estípulas gruesas más o menos de 2 mm de longitud. Inflorescencia axilar de 7-12 cm de longitud, pedúnculo de 4-20 cm de longitud; pedicelos de 2 mm de longitud; bractéolas de 1 mm de longitud, obtusas. Cáliz tubular de 10-15 (16) mm de longitud, glabro o casi; labio superior tan largo como el tubo, costado superior constricto por detrás con ápice no apiculado; diente más inferior de 2 mm de longitud, ligeramente subulado, igualando los laterales obtusos. Estandarte blanco, de 3.5 cm de longitud. Legumbre linear-oblonga, algo comprimida, más ancha hacia la porción próxima al ápice, de 20-40 X 3.5-5 cm, espiralmente dehiscente, pardo-brillante, cada valva con costillas suturales y una costilla extra situada a 4-6 mm de la costilla ventral. Semillas de hasta 35 X 20 X 14 mm, oblongo-elipsoidales, moderadamente comprimidas, generalmente roja o pardo-rojizas, raramente blanca, comúnmente boyantes, pero completamente permeable al agua; hilo de 20 mm de longitud.

FENOLOGÍA: Florece en todo el año de enero a diciembre, especialmente entre junio hasta agosto, declinando en regiones marginales.

COMPOSICIÓN QUÍMICA: La aleloquímica de la semilla como defensa química contra los herbívoros ha sido descrita por **Johns** (1994), quien registra la presencia de canavanina, lectinas (concanavalina A), inhibidores de la proteasa, factor de flatulencia, alcaloides, y saponinas.

HÁBITAT: Esta especie antiguamente domesticada en el lejano oriente (**Sauer**, 1964) en la actualidad, se desconoce fuera del cultivo excepto cuando escapa en hábitat

alterados, artificiales, desarrollándose desde bajas a medianas altitudes. Nativa de los trópicos del viejo mundo, probablemente de la India, ampliamente cultivada en las regiones tropicales de ambos hemisferios. En Cuba, en vegetación ruderal y segetal.

DISTRIBUCIÓN: Estados Unidos; Cuba; Jamaica; Haití; República Dominicana; Islas Vírgenes; Antillas Menores (Guadalupe, como cultivada); México; América Central (Honduras, Guatemala, Panamá); América del Sur (Argentina, Paraguay, Brasil, Surinam, Venezuela); África (Kenia, Sudáfrica, Madagascar); Asia (India, Siam, Malaya, Singapore, China, Formosa, Japón, Filipinas, Borneo); Australia; Oceanía (Indonesia, Hawaii). En Cuba Occidental, Central y Oriental, en las Provincias de La Habana, Ciudad de la Habana, Villa Clara, y Santiago de Cuba (mapa 3).

NOMBRES VERNÁCULOS: "Fríjol de machete", "Fríjol de Bibijagua"

ESTADO DE CONSERVACIÓN: Vulnerable (VU).

MATERIAL EXAMINADO: **Cuba. Ciudad de la Habana:** Mazorra, Boyeros, *Reina 35055* (HAC).- **La Habana:** A orillas del camino, Guatao, *León 12447* (HAC); Finca en Madruga, *Teca Ruro 25473* (HAC); **Villa Clara:** *Jack 4354* (A).- **Santiago de Cuba:** Sierra de Santa María de Loreto, Meseta El Mambí, alrededores del Batey, *López Figueiras 3019* (HAC).- **Sin localidad exacta:** *Seibert 1810* creciendo en Mar frane, Haití (US).

ETNOBOTÁNICA: *Canavalia gladiata* se cultiva ampliamente como forraje, ornamental, para alimentación humana y por su larga vida y pocos cuidados (**Aymard & Cuello**, 1991). Las Legumbres verdes y las semillas son comúnmente cocinadas para su uso en la alimentación, aunque se ha recomendado retirar la cubierta protectora o testa de la semilla.

Sauget & Liogier (1951) también señalaron que las semillas cocidas son comestibles y el follaje se usa como forraje verde; **Roig** (1974) indicó, de modo empírico, que ahuyentan las bibijaguas. Su valor ornamental está en ser una enredadera con frutos muy grandes, por lo cual también se cultiva en jardines, así como cobertura del suelo, es además una planta fetichista. Su amplia dispersión en épocas históricas antiguas es indudable debido en parte a los carruajes de notables semillas que constituyen objetos curiosos (**Sauer**, 1964). Además se ha señalado que presenta grado de nodulación, con una morfología del nódulo tipo Desmodioide (**Aguilar et al.**, 1994).

4. *Canavalia campylocarpa* Piper, Proc. Biol. Soc. Wash. 30:175. 1917.

TYPUS: "Piper SPI 37722 (US), from seeds sent by Bovell from Barbados".

Canavalia dictyota Piper, Contr. U.S. Natl. Herb. 20:574. 1925. (Type: British Guiana, Jenman 4211).

Lianas con tallos rastreros o trepadores, glabrescentes. Hojas pinnado-trifolioladas. Folíolos de 11-13(14) X 4.5-6 cm, estrechamente lanceolado-elípticos, coriáceos, obtusos en bosquejo general pero generalmente con un ápice muy corto agudo; pubescencia con pelos largos, blancos o tostados, densos sobre los peciólulos, esparcidos sobre ambas superficies de la lámina.

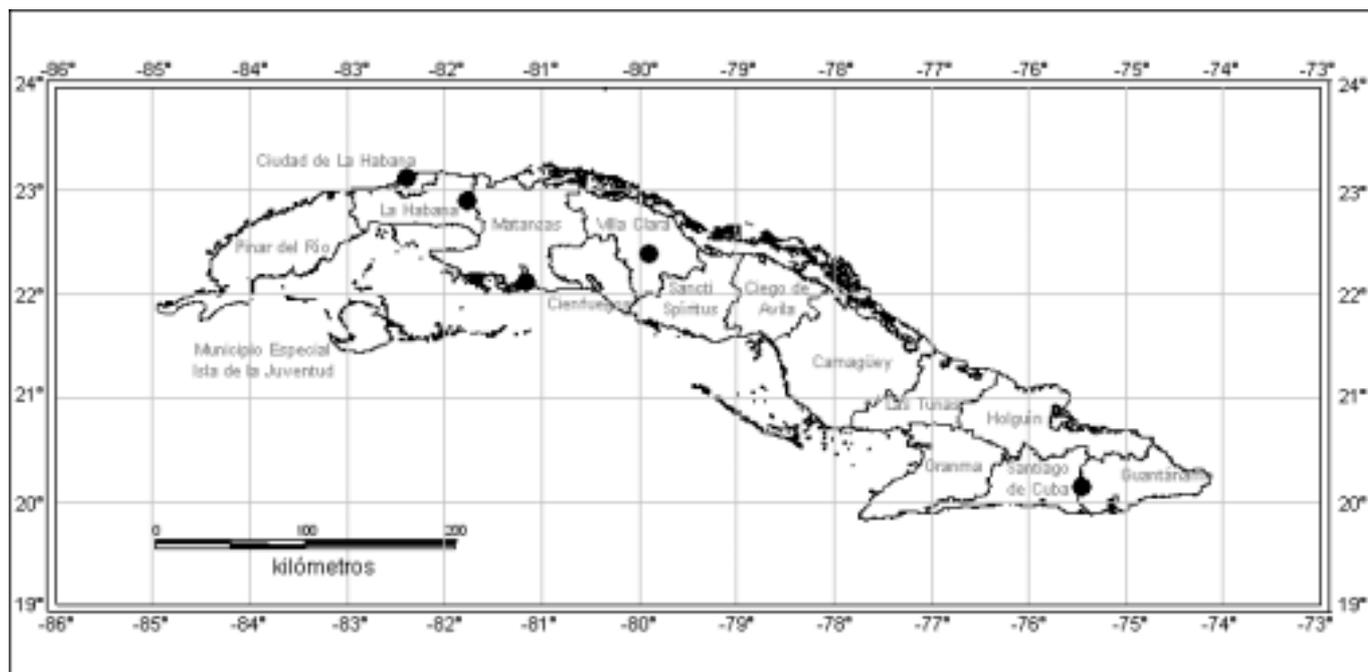
Inflorescencias de hasta 25 cm de longitud, el pedúnculo y raquis convirtiéndose en lignificado en el fruto; bractéolas rotundiformes, obtusas de hasta 1 mm de longitud; pedicelos de 1.5-2 (2.5) mm de longitud. Flores rosadas; cáliz de hasta 13 mm de longitud, tubular campanulado, pubescencia medianamente larga, blanca o tostada, esparcida o moderadamente densa; labio superior más corto que el tubo, costado superior constricto por detrás con ápice no apiculado; diente más inferior de 2 mm de longitud, ligeramente subulado, igualando los obtusos laterales; estandarte de 2.5-3 cm de longitud, erecto. Legumbre a menudo fuertemente incurva, amarillo brillante en material fresco y pardo oscuro en seco, de hasta

20 X 3.5 cm, comprimida, espiralmente dehiscente, parda, cada valva con costillas suturales y una costilla extra a 5 mm de la costilla ventral. Semillas de hasta 22 X 14 X 12 mm, oblonga, moderadamente comprimida, pardo-oscura con jaspeaduras negruzcas, comúnmente boyantes, pero rápidamente permeable al agua, hilo de 17 mm de longitud.

FENOLOGÍA: Flores en todo el año desde enero a diciembre, menguando en temporada lluviosa.

HÁBITAT: Rastreras sobre terrenos abiertos o trepando sobre arbustos y árboles, especialmente en bosque de Galería, lagunas costeras, costas marítimas, ocasionalmente en hábitats artificiales alterados tales como orillas de caminos y desde tierras bajas hasta 1500 m de altitud, ocasionalmente cultivada como cobertura del suelo. Registrada de Cuba por **Piper & Sauer** (1964), así como también por **Sauget & Liogier** (1951), con base en la existencia de un ejemplar recolectado en Cuba y depositado en el Herbario del Jardín Botánico de Nueva York. No existen especímenes de esta planta en ningún herbario cubano.

DISTRIBUCIÓN: Estados Unidos (Florida); Haití; República Dominicana, Cuba, Antillas Menores (Antigua, Martinica, St. Lucía, St. Vincent); Panamá; América del



Mapa 3. Distribución de *Canavalia gladiata*

Sur (Colombia, Venezuela, Guyana, Guayana Francesa, Surinam, Perú y Brasil).

ESTADO DE CONSERVACIÓN: En Peligro Crítico (CR).

5. *Canavalia ensiformis* (L.) DC. Prod. 2:404. 1825.

TYPUS: "Jamaica, Sloane (Voy. Jamaica t. 114, fig. 1, 2, 3; Typotype, Sloane Herb. 3, 67. BM Lectotype)".

Bas.: *Dolichos ensiformis* L., Sp. Pl. 2:725. 1753.

Sin.: *Malocchia ensiformis* (L.) Savi, Nov. Giorn. Pisa 8:113. 1824.

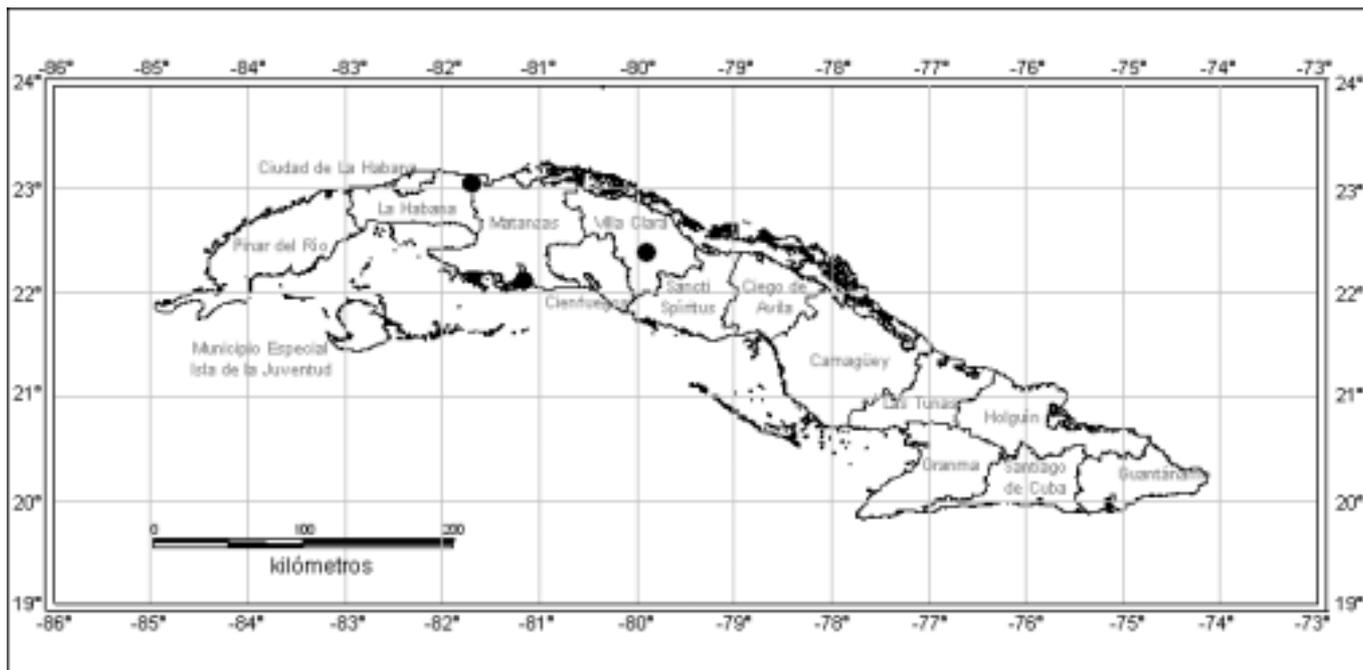
Arbustos anuales o trepadores perennes de 1-2 m de altura. Tallos glabros o adpreso-pubescentes. Foliolos elípticos u ovado elípticos, de 5.7-20 cm de longitud, 3.2-11.5 cm de ancho, obtusos, subagudos o brevemente acuminados, más o menos cuneados, ligeramente coriáceos, glabrescentes o con pubescencia esparcida y venación realzada, reticulada sobre ambas superficies. Pecíolo de 2.3-11 cm de longitud; raquis de 1-3.5 cm de longitud; peciólulos de 1-11 mm de longitud, cubiertos de pelos cortos blancos, moderadamente densos; estípulas tempranamente deciduas. Inflorescencias con raquis de 5-12 cm de longitud, pedúnculo de 10-34 cm de longitud, recto, subtendiendo de 10-20 flores; pedicelos de 2-5 mm de longitud; bractéolas de 2 mm de longitud, orbiculares, obtusas. Cáliz de 14-16 mm de longitud, tubular, pubescencia con pelos cortos blancos, esparcidos; labio superior ancho, emarginado o truncado de 5 mm de longitud, más corto que el tubo, labio inferior de 4 mm de longitud, 3 lobado, costado superior del cáliz abruptamente constricto por detrás con ápice apiculado. Corola de hasta 3 cm de longitud, rosada, estandarte rosado a púrpura, redondeado de 2.75 cm de longitud, emarginado. Legumbre linear-oblonga, 15-35 cm de largo y 3-3.5 cm de ancho, lignificada, ligeramente incurva, estipitada, rostrada, con 15-20 semillas, espiralmente dehiscente, tostado pálida; cada valva con tres costillas longitudinales, 2 en cada sutura, y una costilla extra a 5 mm de la costilla ventral. Semillas oblongas, moderadamente comprimidas, color marfil o blancas con una marca parduzca incospicua cerca del hilo, no boyantes o impermeables, las de mayores dimensiones de 1.45-2.1 X 1.5 cm, las de dimensiones menores de 1-1.5 X 1.5 cm, teniendo un espesor de 0.7-1 cm; hilo de 5.5-9 mm de longitud.

FENOLOGÍA: Flores durante todo el año, de enero a diciembre.

COMPOSICIÓN QUÍMICA: La aleloquímica de la semilla como defensa química contra los herbívoros, ha sido descrita por **Johns** (1994), quién señaló la presencia de canavanina, lectinas (concanavalina A), inhibidores de proteasa, factor de flatulencia, alcaloides, saponinas, y polifenoles.

HÁBITAT: Nativa probablemente de América Tropical, ahora dispersa en todos los trópicos por introducción, es la especie más cultivada en África Tropical (**Baker**, 1926), India, Indonesia, Taiwán, Hawaii (**Degener & Degener**, 1969) y en toda el área neotropical como fuente de proteína vegetal para la nutrición, abonos verdes, conservación de suelos, control biológico y también en la alimentación humana (**Aymard & Cuello**, 1991). **Sauer** (1964) indicó que esta especie fue domesticada en el continente americano, en tiempos precolombinos (1300 AD) por pobladores de varios sitios del suroeste de los Estados Unidos para alimento humano, por sus semillas comestibles, por lo que todos los especímenes con datos del hábitat provienen de cultivos o han escapado a hábitats artificiales. Tolera un amplio rango de textura y fertilidad del suelo; crece bien en suelos de tierras bajas tropicales altamente lixiviadas, pobres en nutrientes y pedregosos, así como en suelos ácidos y salinos y en suelos arcillosos húmedos. Esta especie no es muy afectada por el anegamiento y la salinidad y es resistente a períodos de sequía por su profundo sistema radical, que le permite sobrevivir en la humedad almacenada en el suelo. Se desarrolla desde 0-800 m sobre el nivel del mar (**NAS**, 1979; **Bernal & Jiménez**, 1990). En Cuba vive en vegetación segetal, o silvestre escapada de cultivo en vegetación ruderal.

DISTRIBUCIÓN: Estados Unidos; Antillas Mayores (Cuba, Jamaica, Haití, República Dominicana, Puerto Rico); Antillas Menores (Islas Vírgenes, Guadalupe, Dominica, Martinica, Santa Lucía, Barbados, Granada, Trinidad & Tobago); México, América Central (Guatemala, Honduras Británicas, El Salvador, Honduras, Costa Rica, Panamá); América del Sur (Colombia, Venezuela, Perú, Argentina, Paraguay, Surinam, Brasil, Bolivia, Guayana Francesa); África (Senegal, Sierra Leona, Liberia, Costa de Marfil, Ghana, Nigeria, Camerún, Sao Thome, Congo, Angola, Egipto, Sudán, Ethiopia, Kenya, Tanganyika, Mozambique); Reunión; Mauricio; Asia (India, Burma, Malaya, Singapore, Indonesia, Borneo, Viet Nam, China, Filipinas, Japón); Oceanía (Isla Mariana, Isla Carolina, Isla Hawaii, Nueva Guinea, Nueva Caledonia); Australia. En Cuba, en las Provincias de La Habana, Ciudad de la Habana y Villa Clara (mapa 4).



Mapa 4. Distribución de *Canavalia ensiformis*.

NOMBRES VERNÁCULOS: “Haba de caballo”, “Fríjol de bibijagua”

ESTADO DE CONSERVACIÓN: Vulnerable (VU).

MATERIAL EXAMINADO: **Cuba. Ciudad de la Habana:** Estación Experimental Agronómica, Santiago de las Vegas, Acuña 16123 (HAC).- **La Habana:** León 9609 (NY).-**Villa Clara:** Jack 4413 (SING, US).

ETNOBOTÁNICA: Diversos autores consideran que *Canavalia ensiformis* podría ser un cultivo del futuro como una alternativa en la alimentación animal, por su contenido de proteína; **Bernal & Correa** (1992) indicaron el alto contenido en proteína cruda, el porcentaje de digestibilidad y su rango de adaptabilidad a diversos tipos de suelos, climas y alturas sobre el nivel del mar. Por tanto, esta especie tiene alta capacidad de uso, pues puede utilizarse como suplemento nutritivo en la alimentación animal de cerdos, aves y rumiantes, así como en la alimentación humana en zonas áridas en donde reemplaza la deficiencia de cereales, ya que posee una alta proporción de aminoácidos esenciales con excepción del triptófano. Como todas las leguminosas, es importante en la recuperación de suelos al aumentar el porcentaje de nitrógeno, usándose como abono verde, así como sus semillas por presentar una alta germinación. Además por la gran cantidad de follaje que produce una alta cobertura, es utilizada como control de

plagas y malezas, en la protección de cultivos y contra la erosión hídrica (**Bernal & Correa**, 1992). Es importante señalar que de ella se pueden extraer enzimas y otros compuestos químicos de alta utilidad en medicina. Los citados autores resumieron además que esta especie es una fuente industrial de Lectinas y ureasa con actividad hematoaglutinante específica, necesaria en procesos médico-legales, medicina e investigaciones antropológicas, y señalaron además que la ureasa, fue la primera enzima aislada, y la concanavalina, la primera lectina descubierta. **Bernal & Correa** (1992) resaltaron también el carácter rústico de esta planta, que le permite desarrollarse en suelos muy minerales y no necesita demasiados cuidados agroalimentarios.

Su importancia histórico-cultural fue señalada anteriormente por sus semillas alimenticias.

D’Arcy (1980) señaló que en Sudamérica las semillas y brotes son comestibles. Por otra parte, **Aguilar et al.** (1994) señalaron la importancia de *C. ensiformis* en los procesos de fijación de nitrógeno y grado de nodulación, con una morfología del nódulo tipo Desmodioide.

6. *Canavalia brasiliensis* Mart. ex Benth. Ann. Wien. Mus. Naturg. 2:135. 1837.

TYPUS: “In silvis Catingas Bahia, Brazil, Sept. 1818, Martius, lectotype, M 12798; Isotype L”.

Sin.: *Canavalia caribaea* Urban, Symb. Antill. 7:232. 1912.

Sin.: *Canavalia prolifica* piper ex Ricker, Castanea 11:55. 1946.

Liana rastrera o trepadora sobre hierbas y arbustos, raramente trepando a gran altura; tallos teretes o ligeramente angulosos en seco, puberulentos con pelos blancos ascendentes. Hojas pinnado-trifolioladas, los folíolos de 5-10 (15) X 11 cm, cartáceos, anchamente ovados, generalmente obtuso en bosquejo general, con una punta corta, aguda, pero variando aun sobre una planta de completamente obtuso a algo acuminado, pubescencia con pelos de longitud media, blancos o tostados, moderadamente a muy densamente sobre el peciólulo y superficie inferior de la lámina, esparcidos a moderadamente densos sobre la superficie superior, peciólulos de 3-4 mm de largo, con pelos ascendentes; peciolos mayormente más cortos que los folíolos. Inflorescencias axilares en racimos de 10-20 cm de longitud, las flores mayormente en dirección al ápice; bractéolas rotundiformes, obtusas de 1.5 mm de longitud; pedicelos de 1-1.5 (2) mm de longitud. Cáliz campanulado tubular de 8-12 mm de longitud; pubescencia corta a medianamente larga, blanca o tostada, esparcidos a moderadamente densos; labio superior a lo sumo tan largo como el tubo, costado superior constricto por detrás, apiculado en el ápice; diente más inferior de 25 mm de longitud, subulado, excediendo los más o menos agudos lóbulos laterales.

Flores vistosas rosadas, blancas o púrpura. Estandarte de 2.25 cm de longitud. Legumbre lignificada de 20-25 X 2.5-3 cm, oblongas, con un rostro corto, incurvo hacia abajo, ligeramente comprimida, espiralmente dehiscente, pardo oscuro a tostado; cada valva con costillas suturales y una costilla extra situada a 6 mm de la costilla ventral, generalmente completamente glabrescente; con 12 semillas. Semillas de 18 X 12 X 9 mm, oblongas, moderadamente comprimidas, verde olivo, pardo o pardo rojizo, a veces con manchas oscuras, variando en color con la edad, no boyantes o impermeables; hilo generalmente de 8 mm de longitud, pero variando de 6-11 mm de longitud.

FENOLOGÍA: Flores en todo el año de enero a diciembre.

HÁBITAT: En bosques secos y húmedos trepando sobre árboles y arbustos o rastreras en terrenos abiertos, es una especie pionera natural de dunas, barrancos montañosos, llanuras inundadas por ríos y como una hierba invasora en campos abandonados, orillas de caminos, generalmente en tierras bajas pero ocasionalmente por encima de 1000 m de altitud, cultivada ocasionalmente

como cobertura del suelo y control de la erosión. Esta especie es una de las más dispersas del género, pues está ampliamente distribuida y cultivada, principalmente como fuente de proteínas vegetales para la nutrición animal. En Cuba, en bosque semidecuido mesófilo, matorral xeromorfo costero, vegetación de costa arenosa, bosque de Galería, vegetación ruderal y segetal.

DISTRIBUCIÓN: Estados Unidos (Florida); México; América Central (Guatemala, Honduras, Belize, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá); Antillas Mayores (Cuba, Haití; República Dominicana); Leeward Islands; Trinidad & Tobago; Islas Vírgenes; Antillas Menores (Antigua, St. Barts, Barbados, Martinica, St. Vincent); Windward Islands; América del Sur (Colombia, Venezuela, Guyana, Guayana Francesa, Surinam, Ecuador, Perú, Brasil, Bolivia, Paraguay y Argentina). En Cuba Occidental, Central y Oriental (Isla de la Juventud, Pinar del Río, Villa Clara, y en las Provincias Orientales) (mapa 5).

ESTADO DE CONSERVACIÓN: En Peligro (EN).

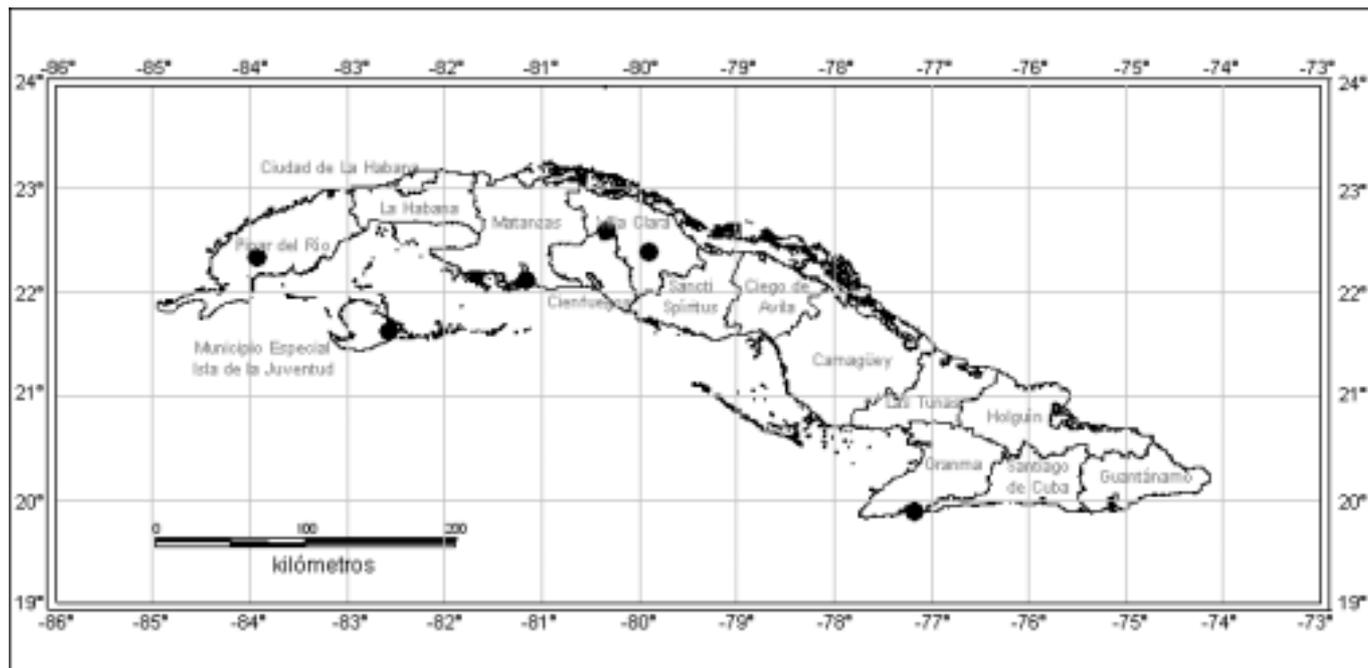
MATERIAL EXAMINADO: **CUBA. Isla de la Juventud:** Britton & Wilson 15154 (NY, US).- **Pinar del Río:** Palmer & Riley 726 (US); Wright, Jan 1865 (GH).- **Villa Clara:** Jack 4348 (US).- **Provincias Orientales: sin localidad exacta:** Ekman 2990, 7746 (S).- **Sin localidad exacta de Cuba:** Piper & Tracy SPI-17957, SPI-34705-09. Prospera en Washington D.C., Miami, Florida y Biloxi, Miss. (US).

ETNOBOTÁNICA: *Canavalia brasiliensis* está ampliamente cultivada, principalmente como fuente de proteínas vegetales para la nutrición animal (Aymard & Cuello, 1991). Presenta nódulos en sus raíces, lo cual la señala como potencialmente útil en los procesos de fijación de nitrógeno (Chada *et al.*, 1988).

7. *Canavalia plagiosperma* Piper, in Piper & Dunn, Kew Bull 4:141. 1922.

TYPUS: "Grown in the United States from seed originally from Cuba, obtained via the Director of Agriculture, Mauritius, Piper FCI-02053, lectotype, US 1111541, grown in Washington, D.C: greenhouse, 1914. Additional specimens of same seed lot, grown by Piper in later years and by Kellogg at Miami, 1111542-47".

Hierba anual estrigilosa. Folíolos comúnmente de hasta 15 cm de largo, cartáceos a algo coriáceos, ovados, obtusos en bosquejo general pero a menudo con una punta muy corta, aguda; pubescencia con pelos cortos blancos muy esparcidos tanto sobre el peciólulo como sobre las superficies de la lámina. Bractéolas de 1.5 mm de longi-



Mapa 5. Distribución de *Canavalia brasiliensis*.

tud, agudas. Pedicelos de 1 mm de longitud. Cáliz de 13 mm de longitud, pubescente con pelos cortos blancos, muy esparcidos; labio superior más corto que el tubo, costado superior constricto por detrás, no apiculado en el ápice; diente más inferior de 2 mm de longitud, agudo, ligeramente excediendo los agudos lóbulos laterales. Estandarte de 2.25 cm de longitud. Legumbre comúnmente de hasta 25 X 4 cm, comprimida, espiralmente dehiscente, tostado pálida; cada valva con costillas suturales y una costilla extra situada a 6 mm de la costilla ventral. Semillas de hasta 26 X 18 X 10 mm, elipsoidales, oblicuas, moderadamente comprimidas, pardo-claro-brillantes o blancas con manchas pardas, ambos tipos ocurriendo en la misma colección, no boyante o impermeable; hilo de aproximadamente 11 mm de largo.

HÁBITAT. Cultivada o creciendo en la orilla de caminos u otros hábitats artificiales, desde tierras bajas hasta 900 m de altitud, encontrándose muy pocas colecciones en su hábitat natural (bosques deciduos). En Cuba en Vegetación ruderal, segetal, y en bosque semideciduo mesófilo.

DISTRIBUCIÓN. Nativa de América Tropical. Ampliamente cultivada y naturalizada en los trópicos. Su distribución natural comprende Haití, República Dominicana, Cuba, Nicaragua, Costa Rica, Guyana, Surinam (**Lanjouw & Stoffers**, 1976), y Perú. En Cuba Occidental, Central y

Oriental (La Habana, Villa Clara, y en las provincias orientales de Cuba) (mapa 6).

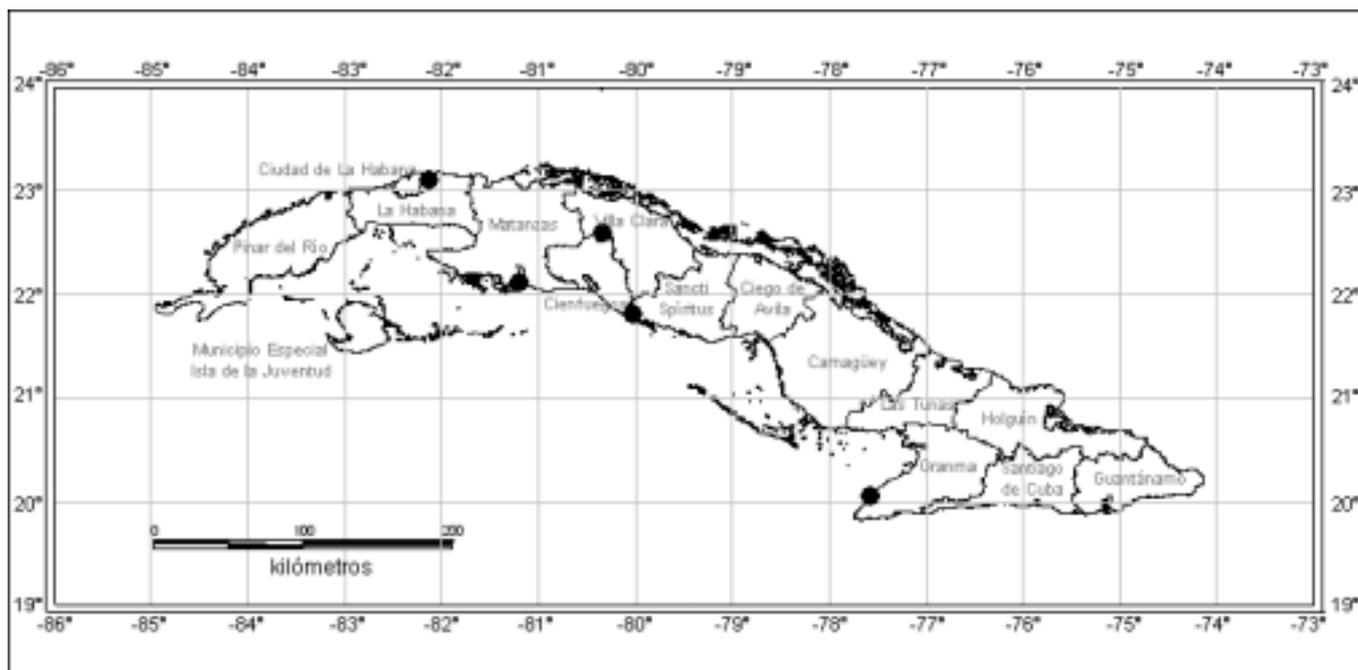
ESTADO DE CONSERVACIÓN: En Peligro (EN).

MATERIAL EXAMINADO: **Cuba. La Habana:** *Hioram & Maurel* 4787 (NY); *León* 12447 (NY).- **Villa Clara:** *Jack* 4063 (NY), 4396 (US), *León* 5371 (NY).- **Provincias Orientales, sin localidad exacta:** *León & Pérez* 12485 (NY).- **Sin localidad exacta de Cuba:** *Kellogg* FCI-02053. Crece en Miami; Florida (US); *La Sagra* en 1822-35 (P); *Piper* FCI 02053, Washington, DC. (US); *Tracy* FCI 02052, Biloxi, Miss. (US).

ETNOBOTÁNICA: Mediante el estudio de evidencias arqueológicas, **Sauer & Kaplan** (1979) han demostrado que *C. plagiosperma* fue domesticada en el continente americano, en tiempos precolombinos (500 años A.C.) por pobladores de las costas de Perú, para alimento humano, principalmente los frutos inmaduros y las semillas maduras.

8. *Canavalia rosea* (SW.) DC., Prodr. 2:404. 1825.

TYPUS: "*Dolichos maritimus* repens of P. Browne, Civ. Nat.Hist. Jam.: 293 (1756) & Jamaica, Swartz (BM). Based on *Phaseolus maritimus* Purgens... pluk Phytogr. Tab. 51. Fig. 2. 1691".



Mapa 6. Distribución de *Canavalia plagioperma*.

Bas.: *Dolichos roseus* Sw., Prodr. 105. 1788.

Sin.: *Dolichos maritimus* Aublet, Hist. Pl. Guiane 765. 1775.

Sin.: *Canavalia marítima* Thouars, J. Bot. Agric. 1:80. 1813.

Enredaderas rastreras o trepadoras perennes, robustas de 1.8-10 m de longitud (Fig. 2). Tallos seríceo-pubescentes con pelos blancos cuando jóvenes, posteriormente glabros. Hojas pinnado-trifolioladas. Foliolos de 5-10 (12) X 4-10 cm, anchamente obovado, ovado u orbicular, apicalmente redondeado o emarginado, ocasionalmente corto acuminado, mucronulado, anchamente cuneado, redondeado o truncado en la base, coriáceo, esparsamente puberulento con cortos pelos blancos sobre ambas superficies o moderadamente densa en la superficie inferior y sobre los peciólulos, peciolo de 2-7 (10) cm de largo; raquis de 1.3-3.7 (-4.5) cm de longitud; peciólulos 3-5 (-9) mm de longitud; estípulas deciduas, lanceoladas de 4 mm de largo.

Inflorescencias axilares, colgantes o rectas, postradas pero ascendentes en el ápice, de 4-18 (30) cm de longitud sobre un pedúnculo de 10-21 cm de longitud, con 6-30 flores; pedicelos de 3 mm de longitud; bractéolas de 1.5-2 mm de longitud, obtusas.

Flores rosadas, púrpura o malva-azulado. Cáliz tubular, de 10-12 mm de longitud; pubescencia corta, blanca, esparcidamente a moderadamente densa; labio superior mucho más corto que el tubo, borde superior constricto por detrás, no apiculado en el ápice; diente más inferior de 2 mm de longitud, agudo, ligeramente excediendo los agudos lóbulos laterales. Estandarte redondeado o elíptico, de 2.5-3 cm de longitud y 1.5-2.1 cm de ancho, emarginado; alas y quilla fucsina pálido.

Legumbre de 7-15 X 2-2.5 cm, linear oblonga, moderadamente comprimida, al inicio adpreso-pubescente, posteriormente glabra, a veces con pliegues, espiralmente dehiscente o a veces con dehiscencia explosiva, tostado-pálida, cada valva con costillas suturales y una costilla extra a 3 cm de la costilla ventral. Semillas de 12-18 X 7-12 (13) mm y 10 mm de espesor, en número de 4-9, pardas con jaspeaduras más oscuras o listas amarillo pálido, a casi negra, elipsoidales, ligeramente comprimidas, hilo de 7-8.5 (10) mm de longitud, mayormente boyantes e indefinidamente impermeable al agua, al menos por un año.

FENOLOGÍA: Florece de noviembre hasta el siguiente mes de marzo.

HÁBITAT: Es común en las costas tropicales y subtropicales de ambos hemisferios en ambientes mari-

nos (orillas de costas y playas) a veces trepando sobre rocas o matorrales. En Cuba, en vegetación de costa arenosa, vegetación de costa rocosa, matorral xeromorfo costero y subcostero, frecuentemente asociada con *Ipomoea pes-caprae*, *Convolvulaceae* con la que forma grandes comunidades, presentando ambas especies convergencia morfológica y marcadas diferencias en sus estrategias reproductivas, siendo además pioneras de las dunas y playas arenosas. Es una de las más comunes y más dispersas plantas costeras tropicales, raramente algo más hacia tierra adentro, a lo largo de orillas de caminos o en los llanos de las lagunas costeras, ocasionalmente cultivada. *Canavalia rosea* tiene una gran importancia ecológica en los ecosistemas costeros, ya que está restringida a las costas tropicales y subtropicales de ambos hemisferios donde es pionera en suelos arenosos de las dunas y playas (D'Arcy, 1980).

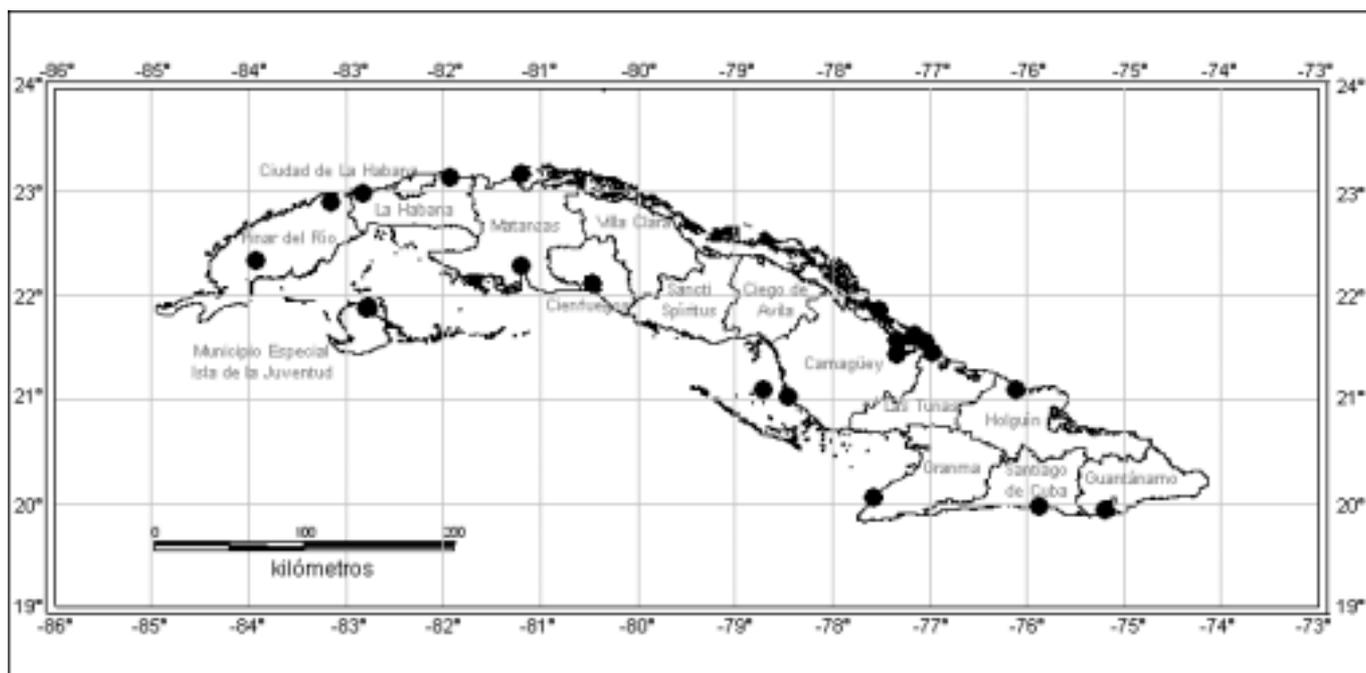
DISTRIBUCIÓN: Nuevo Mundo: Estados Unidos (Florida); México; América Central (Guatemala, Honduras, Belice, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá); Antillas Mayores (Cuba, República Dominicana, Bermuda, Haití, Jamaica, Puerto Rico, Islas Vírgenes, Bahamas, Isla Caimán, Isla Swan, San Andrés); Antillas Menores, Trinidad & Tobago; América del Sur (Colombia, Venezuela, Brasil, Ecuador, Las Galápagos, Perú, Guayana Francesa, Guyana, Surinam). Viejo Mundo: África (Mauritania,

Senegal, Guinea Portuguesa, República de Guinea, Sierra Leona, Liberia, Costa de Marfil, Ghana, Togo, Dahomey, Nigeria, Camerún, Sao Thome, Gabon, República del Congo, Angola Sudáfrica, Mozambique, Tanganyika, Kenya, Zanzibar, Madagascar, Rodríguez, Seychelles); Asia (India, Isla Nicobar, Burma, Malaya, Singapur, Tailandia, Cambodia, Viet Nam, China, Formosa); Oceanía (Filipinas, Norte de Borneo, Indonesia, Nueva Guinea Occidental, Noreste de Nueva Guinea, Papúa, Isla Salomón, Nueva Caledonia, Isla Hawaii); Australia. En Cuba Occidental, Central y Oriental (Isla de la Juventud, Pinar del Río, La Habana, Ciudad de la Habana, Matanzas, Villa Clara, Cienfuegos, Sancti Spiritus, Ciego de Ávila, Camagüey, Las Tunas, Holguín, Granma, Santiago de Cuba, y Guantánamo). (mapa 7).

NOMBRES VERNÁCULOS: "Mate de costa"

ESTADO DE CONSERVACIÓN: Menor Riesgo (LR), subcategoría de preocupación menor (lc).

MATERIAL EXAMINADO: CUBA. **Isla de la Juventud:** Nueva Gerona, Sierra de Colombo, *Álvarez et al. 46018* (HAJB); *Britton et al. 14693* (NY, US).- **Pinar del Río:** *Millsbaugh 1456* (F); *Palmer & Riley 752* (US); *Sauer 1742* (F).- **Ciudad Habana:** Mariel, costa cerca de la planta eléctrica, *H. Lippold 20358* (HAJB).- **La Habana:** *J.A. Shafer 423* (HAC); *Wright 2342* (HAC); *Humboldt &*



Mapa 7. Distribución de *Canavalia rosea*.

Bonpland 1357 (P); *De la Sagra in 1828* (G).- **Matanzas:** *Otto 43* (W); *Rugel 44* (NY).- Orillas de la carretera del circuito Sur Varadero, *Barreto 325* (HACC).- **Cienfuegos:** *Combs 235* (F, GH, MO, P).- **Villa Clara:** *Howard 6337* (GH); *Jack 7817* (A, F, P, S).- **Camagüey:** *Shafer 1121, 2686* (F, NY, US); Nuevitas, costa arenosa al Oeste de Santa Lucía, *Álvarez y Berazaín 23700* (HAJB). Frente al Hotel Mayanabo, Santa Lucía, *Barreto y Enriquez 5004* (HACC); Residencial, Playa Santa Lucía, Nuevitas, *Barreto y Plasencia 7889* (HACC); Cayo Guajaba, Nuevitas, *Martínez 7323* (HACC); Playa Bonita, Cayo Sabinal, Nuevitas, *Martínez 7366* (HACC); Cayo Algodón Grande, Costa Sur de Florida, *Comas y Pareta 6311* (HACC); Camino de Playa Los Coquitos al Faro, La Boca, Nuevitas, *Barreto 6983* (HACC); Cayo Punta Macurijes, Vertientes, Del Risco, *Barreto y Enriquez 635* (HACC); San Miguel del Bagá, Nuevitas, *Barreto 403* (HACC).- **Holguín:** Gibara, manigua costera y monte seco entre Gibara y Playa Caletones, *Bisse y Areces 20854* (HAJB).- **Provincias Orientales, Sin localidad exacta:** *Shafer 12351* (MO, NY, US); *Wright 2342* (BREM, GH, MO, WIS).

ETNOBOTÁNICA. Se cultiva ocasionalmente para cobertura del suelo. Los botones florales de esta especie son muy visitados por hormigas durante la estación seca (Aymard & Cuello, 1991).

Discusión

De los resultados del presente análisis se observa que acorde con Sauer (1964), Lackey (1981) y Aymard & Cuello (1991), el género *Canavalia* se distingue dentro de la subtribu Diocleinae a la cual pertenece, por caracteres morfológicos tales como legumbres grandes, oblongas, a menudo leñosas cuando maduras con costillas extras, (ausentes en el subgénero *Catodonia*); tallos robustos; modificación de los lóbulos del cáliz en forma de un cáliz bilabiado (fusión de los lóbulos), con el labio superior a menudo rostrado, entero o dividido en dos lóbulos grandes y el labio inferior diminuto, tridentado (o 2 ó 3-dentado). Estos caracteres definen a *Canavalia* como una entidad homogénea, lo cual sirve de referencia para su rápida identificación entre los demás géneros de la subtribu.

Además, de los resultados de este trabajo se aprecia que el género *Canavalia* en Cuba está constituido por ocho especies distribuidas a lo largo del territorio nacional. De ellas solamente una especie es verdaderamente caribeña, *Canavalia nitida*, del subgénero *Catodonia*, la cual es su único representante en la isla. El resto de las especies pertenecen al subgénero *Canavalia*, el cual tie-

ne dos especies neotropicales: *C. brasiliensis* y *C. campylocarpa*; 4 especies pantropicales: *C. rosea*, *C. ensiformis*, *C. plagiosperma*, y *C. gladiata*. Solamente una especie, *C. microsperma*, es endémica de Cuba, con un endemismo restringido a Pinar del Río y la Isla de la Juventud.

C. plagiosperma y *C. ensiformis*, aunque se hallan actualmente cultivadas y naturalizadas en los trópicos de ambos hemisferios, son originarias de América (Sauer, 1964; Wiersema *et al.*, 1990).

C. gladiata, es cultivada en ambos hemisferios y ocasionalmente escapa y se asilvestra. Originaria del Este de Asia, probablemente de la India (Wiersema *et al.*, 1990).

C. rosea está confinada a las costas tropicales y subtropicales de ambos hemisferios. En Cuba, *C. gladiata* y *C. ensiformis* aparecen generalmente cultivadas, en cambio, el resto de las especies, se encuentran silvestres en sus respectivos hábitats naturales.

Aunque la mitad de las especies cubanas tienen distribución pantropical, más de la mitad (6 especies), son originarias del Nuevo Mundo (Wiersema *et al.*, 1990).

El hecho de que el género *Canavalia* sea pantropical, con una amplia dispersión a regiones tropicales del mundo por cultivo o introducción y posterior naturalización, y por la relativa facilidad que tiene para dispersarse a través de barreras de agua, dificulta detectar influencia histórica terciaria en la distribución actual de las especies (Lavin *et al.*, 2001).

Sin embargo, dentro del género *Canavalia*, se puede apreciar, que han ocurrido eventos de diversificación con especies endémicas o mayormente confinadas a las Antillas Mayores. Así, *Canavalia nitida* es endémica de Cuba, La Española, Puerto Rico, Islas Vírgenes y México; *C. microsperma* es endémica de Cuba y *C. altipendula* es endémica de Jamaica. Esta diversificación fue potencialmente impulsada, al menos en gran parte, por el aislamiento de las islas del Mar Caribe. Muchos de estos aislamientos pudieron surgir desde el temprano a mediano Terciario, lo cual es compatible con el registro fósil de leguminosas del Eoceno de Norteamérica (Wheeler & Landon, 1992; Wheeler, 2001) o del Eoceno de Norteamérica y Europa (Herendeen *et al.*, 1992), donde se demuestra que las leguminosas fueron abundantes y taxonómicamente diversas en los bosques deciduos tropicales de Norteamérica en el Terciario Temprano. Esta antigua diversidad norteamericana de Leguminosas, yace ahora en los trópicos, incluyendo las Antillas Mayores.

Lavin et al. (2002) señalaron que de las aproximadamente 18 000 especies de leguminosas del mundo, la especiación en la región del Caribe, se estima en alrededor de 299 taxones; así como también añaden dichos autores que de un total estimado de 841 especies de leguminosas del Caribe, alrededor del 35% son endémicas, afirmando además que la mayor parte del endemismo ocurre en las Antillas Mayores.

Lo expuesto amerita un posterior estudio de los niveles de divergencia morfológico y molecular de grupos monofiléticos de especies de *Canavalia*, distribuidas en Cuba y otras islas del Caribe, que permitiría determinar la cantidad de tiempo geológico requerido para dar surgimiento a la diversificación de *Canavalia* en Cuba y demás islas de las Antillas. También coadyuvaría a identificar los principales linajes Terciarios de *Canavalia* y parientes continentales del hemisferio Norte, acorde con la Hipótesis Boreotropical de **Lavin & Luckow** (1993), y con la influencia de patrones vicariantes continentales antiguos descritos por **Lavin** (1998), que han contribuido a su diversidad taxonómica y endemismo en dicha región.

Bibliografía

- Aguilar, N.O., F.C. Pitargue & M.O. Cajano.** 1994. Nodulation of legumes in the Philippines. In *Advances in Legume Systematics* part. 5: The Nitrogen Factor. ed. J.I. Sprent & D. McKey, 25-31. Kew: Royal Botanic Gardens.
- Aymard, G.A. & N. Cuello.** 1991. Catálogo y adiciones a las especies neotropicales del género *Canavalia* (Leguminosae-Papilionoideae-Phaseoleae-Dioecleinae). En: Seminario-Taller del trabajo internacional sobre *Canavalia*. Universidad Central, Caracas Venezuela. Maracay-Venezuela. Mimeografiado.
- Baker, E.G.** 1926. Leguminosae of Tropical África. Part. 1: 383-385. London.
- Bernal, H.Y. & J.E. Correa.** 1992. Especies vegetales promisorias de los países del Convenio Andrés Bello tomo VIII. SECAB Ciencia y Tecnología No 28 Colombia 106p.
- Bernal, Y.H. & L.C. Jiménez,** 1990. Haba criolla-*Canavalia ensiformis* (L.) DC. (Fabaceae-Faboideae). Secab. Ciencia y Tecnología, No. 16. 530 pp. Bogotá-Colombia.
- Borhidi, A. & O. Muñiz** 1983. Catálogo de plantas cubanas amenazadas o extinguidas. Editora de la Academia de Ciencias de Cuba. Habana.
- Chada, S. de S., & H. de Polli.** 1988. Nodulação de leguminosas tropicais proissoras para adubação verde em solo deficiente em fosforo. *Pesq. Agropec. Bras.* **23** (11): 1197-1202.
- D'Arcy W.C.** 1980. *Canavalia*. Flora of Panama. (Leguminosae). In: R. Woodson & R.W. Schery, (Eds.) *Ann. Miss. Bot. Gar.* **67** (3): 562-571.
- Date, R.A. & J. Halliday.** 1980. Relationships between *Rhizobium* and Tropical Forage Legumes. In: R.J. Summerfield & A. H. Bunting (ed.) *Advance in Legume Sciences*. Univ. of Reading England. 601 p.
- Degener, O. & I. Degener.** 1969. *Flora Hawaiiensis (Leguminosae) Book. 7.*
- Fantz, P.R.** 1976. New taxa of *Canavalia* subgenus *Wenderothia* (Leguminosae) from Brazil. *Brittonia* **28** (1): 81-82.
- Ferguson, I.K., & J.J. Skvarla.** 1981. The pollen morphology of the subfamily Papilionoideae (Leguminosae). In: *Advances in Legume Systematics: Part. 2.* ed. R.M. Polhill & P.H. Raven, 859-896. Kew: Royal Botanic Gardens.
- Gillett, J.B., R.M. Polhill & B. Verdcourt.** 1971. Leguminosae-Papilionoideae. In: E. Milne, R. Redhead & R. Polhill (Eds.), *Flora of Tropical East Africa*, part. 4: 571-577.
- Goldblatt, P.** 1981 Cytology and the phylogeny of the Leguminosae. In *Advances in Legume Systematics: part 2.* ed. R.M. Polhill and P.H. Raven, 427-463. Kew: Royal Botanic Gardens.
- Herendeen, P.S., W.L. Crepet, & D.L. Dilcher.** 1992. The fossil history of the Leguminosae phylogenetic and biogeographic implications. In: Herendeen, P.S. & D.L. Dilcher (eds). *Advances in Legume Systematics, Part. 4, The Fossil Record.* Kew: Royal Botanic Gardens. pp. 303-316.
- Holmgren, P., N.H. Holmgren & L.C. Barnett, editors.** 1990. *Index Herbariorum. Part. 1. The Herbaria of the World.* Ed. 8. The New York Botanical Garden, Bronx, New York. 693 pp.
- Howard, R.A.** 1988. *Flora of the Lesser Antilles (Leeward and Windward Islands).* vol. 4 (1): 454-458. Harvard University.
- Instituto de Geografía ACC e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.** 1989. *Nuevo Atlas Nacional de Cuba.*
- Johns, T.** 1994. Defense of nitrogen-rich seeds constrains selection for reduced toxicity during the domestication of the grain legumes. In *Advances in Legume Systematics. part 5: The Nitrogen Factor* ed. J.I. sprent & D. McKey, 151-167. Kew: Royal Botanic Gardens.
- Kajita, T., H. Ohashi, Y. Tateishi, C.D. Bailey, & J.J. Doyle.** 2001. *rbcL* and Legume Phylogeny, with Particular Reference to Phaseoleae, Millettieae, and Allies. *Systematic Botany* **26**(3): 515-536.
- Lackey, J.A.** 1981. Phaseoleae. In *Advances in Legume Systematics: part 1.* ed. R.M. Polhill and P.H. Raven, 301-327. Kew Royal Botanic Gardens.
- Lanjouw, J. & A.L. Stoffers.** 1976. *Flora of Surinam (Additions and corrections)* vol. 2 (2): 598-599. Royal Tropical Institute, Amsterdam.
- Lavin, M.** 1998. Origin, Diversity, and Biogeography of Neotropical Fabaceae. *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden* **68**: 131-145.
- Lavin, M., A. Beyra-M., G. Lewis, & L. Rico.** 2002. Hotspot diversity in the Caribbean: Museum or cradle? In Horvitz, Carol C., Organizer 2002. Symposium in Panama City, 29 July through 3 August, entitled, "Islands in the storm: biodiversity, natural disturbance and conservation in the Caribbean." "Sponsored by the Coalition for Excellence in Tropical Biology: partners are the Smithsonian Institution, Miami Museum of Science,

- University of Miami, Florida International University, Fairchild Tropical Garden, Montgomery Botanical Center and Kampong of the National Tropical Botanical Garden.
- Lavin, M., & M. Luckow.** 1993. Origins and relationships of tropical North America in the context of the boreotropics hypothesis. *Amer. J. Bot.* **80**: 1-14.
- Lavin, M., M.F. Wojciechowski, A. Richman, J. Rotella, M.J. Sanderson, & A. Beyra-Matos.** 2001. Identifying Tertiary radiations of Fabaceae in the Greater Antilles; alternatives to cladistic vicariance analysis. *International Journal of Plant Sciences* **162** (6 supplement): S53-S76.
- Lewis, G.P. & R.M. Polhill.** 1998. A situação actual da sistemática de Leguminosae neotropicais. Proc. VI Congreso Latinoamericano de Botánica, Missouri Botanical Garden Press. Pp. 113-129.
- Liogier, H.A. & L.F. Martorell.** 1982. Flora of Puerto Rico and adjacent islands: a systematic synopsis: 66. Univ. De Puerto Rico.
- Liogier, H.A.** 1985. La Flora de la Española. III. Vol. **56**: 162-166. Serie Científica 22. Universidad Central del Este. San Pedro de Macorís: República Dominicana.
- Liogier, H.A.** 1988. Descriptive Flora of Puerto Rico and Adj. Islands. Vol. **2**: 123-125. Univ. De Puerto Rico.
- Lourteig, A.** 1988. Nomenclatura Plantarum Americanum. VII. Leguminosae. *Phytologia* **65** (5): 393-401.
- NAS.** 1979. Tropical Legumes; Resources for the future. National Academy of Sciences. Washington, DC. 660 p.
- Nixon, K. C. & Q. Wheeler.** 1990. An amplification of the phylogenetic species concept. *Cladistics* **6**: 211-223.
- Polhill, R.M.** 1981. Papilionoideae. In: *Advances in Legume Systematics. Part 1.* ed. R.M. Polhill & P.H. Raven, 191-208. Kew: Royal Botanic. Gardens.
- Proctor, G.P.** 1984. Flora of Cayman Island. *Kew Bull. Addit. Ser.* 11:450-451.
- Rohlf, F.J.** 1993. NTSYS-pc, Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System, version 1.80. A computer program distributed by Exeter Software, 100 North Country Rd, Building B, Setauket New York 11733.
- Roig, J.T.** 1974. Plantas medicinales, aromáticas o venenosas de Cuba. Ministerio de Agricultura, República de Cuba, Habana 872 pp.
- Sauer, J. & L. Kaplan.** 1979. Canavalia beans in American Prehistory. *American Antiquity.* **34**: 417-424.
- Sauer, J.** 1964. Revision of Canavalia. *Brittonia* **16**: 106-181.
- Sauget, J.S. & E.E. Liogier.** 1951. Flora de Cuba 2. *Contr. Ocas. Mus. His. Nat. Colegio de La Salle* **10**: 224-367.
- UICN.** 1994. Categorías de las listas rojas de la UICN (Unión Mundial para la naturaleza), Gland. Suiza 21 p.
- Wheeler, E.A.** 2001. Fossil dicotyledonous woods from the Florissant Fossil Beds National Monument, Colorado *In*: E. Evanoff, K.M. Gregory-Wodziki, K.R. Johnson, Eds. *Proceeding of the Denver Museum of Science and Industry, ser 4.* Denver Museum of Science and Industry, Denver. pp. 197-213.
- Wheeler, E.A., & J. Landon.** 1992. Late Eocene Chadronian dicotyledonous woods from Nebraska: evolutionary and ecological significance. *Rev. Paleobot. Palynol* **74**: 267-282.
- Wiersema J.H., J.H. Kirbride, J.R. & C.R. Gunn.** 1990. Legume (Fabaceae) Nomenclatura in the USDA Germoplasm System. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 1757, 572 pp.
- Wolff, I.A. & W.F. Kwolex.** 1971 Lipids of the Leguminosae *In*: J.B. Harborne, D. Boulter & B. L. Turner (Eds.), *Chemotaxonomy of the Leguminosae*: 231-255. Acad. Press. London-New York.

A NEW SPECIES OF *ZEPHYRANTHES* HERB. S. L. (AMARYLLIDACEAE, HIPPEASTREAE), WITH NOTES ON THE GENUS IN COLOMBIA

by

José Luis Fernández-Alonso* & Jeroen P. Groenendijk**

Abstract

Fernández-Alonso, J. L. & J. P. Groenendijk. A new species of *Zephyranthes* Herb. s. l. (Amaryllidaceae, Hippeastreae), with notes on the genus in Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (107): 177-186, 2004. ISSN: 0370-3908.

A new species of *Zephyranthes* (Amaryllidaceae), growing in semi-arid areas of the High Plain of Bogotá, Colombia, is described and illustrated. We give notes on five other species present in Colombia: *Z. albiella* Traub, *Z. carinata* Herb., *Z. puertoricensis* Traub., *Z. robusta* (Sweet) Baker y *Z. rosea* (Spreng.) Lindl. The last four were registered for the first time for Colombia. We include a key for the identification of the species.

Key words: Amaryllidaceae, Colombia, *Habranthus*, Hippeastreae, new species, taxonomy, *Zephyranthes*.

Resumen

Se describe e ilustra una nueva especie de *Zephyranthes* (Amaryllidaceae) que crece en zonas áridas de la Sabana de Bogotá, Colombia. Se comentan otras cinco especies presentes en Colombia (*Z. albiella* Traub, *Z. carinata* Herb., *Z. puertoricensis* Traub., *Z. robusta* (Sweet) Baker y *Z. rosea* (Spreng.) Lindl., de las cuales, las últimas cuatro se registran para Colombia por primera vez. Se incluye una clave para la separación de las especies tratadas.

Palabras clave: Amaryllidaceae, Colombia, *Habranthus*, Hippeastreae, nueva especie, Taxonomía, *Zephyranthes*.

* Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Bogotá D. C., Colombia. jlfernandez@unal.edu.co.

** Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics (IBED), Universiteit van Amsterdam, The Netherlands. j.groenendijk@science.uva.nl

Introduction

Zephyranthes Herb. (Amaryllidaceae) is an American-Antillean genus with about 60 species, currently placed in the mostly American tribe Hippeastreae (Dahlgren & al., 1985; Meerow & Snijman, 1998; Meerow & al., 1999). Many *Zephyranthes* species are appreciated ornamentals, and are traditionally known as "rain lilies", due to their tendency to flower shortly after rainy periods (Christian, 1999; Fellers, 1996; Mabberley, 1997). A part of the species formerly treated within *Zephyranthes* have now been transferred to the other Hippeastrea genera *Habranthus* Herb. (about 40 species distributed around subtropical South America), *Pyrolirion* Herb. (four species from Peru and Bolivia), and *Aidema* Ravenna (six species from Central and South America). Nevertheless, generic limits within this plant group are still unclear (Sealy, 1937; Uphof, 1946; Traub, 1958; Huzinker, 1967; Ravenna, 1971; Arroyo, 1990; Arroyo & Leuenberger, 1996; Lopes-Ferrari & Espejo-Serna, 2002; Ravenna, 2003).

The very subtle differences between genera are based on spathe characters, the position of the flower (erect, sub-erect or declinate), the - sometimes not very obvious - (a)symmetry of the corolla, the insertion of the anther filaments either at the corolla tube base (*Habranthus*) or above the tube (*Zephyranthes*), the number of different anther filament lengths (two or four, with the anthers either linear or arched), the either declinate or recurved style, and the number of seeds per locule in the capsule. In order to facilitate the recognition, and for practical reasons, we treated all the taxa of this group as species of *Zephyranthes*, in some cases indicating the combinations associated to generic transfers in the synonymy.

Zephyranthes in Colombia

From Colombia, only the publication of *Z. albiella* was known, described from plants of Cundinamarca (Traub, 1950). Furthermore, a few imprecise references exist of "*Z. tubispatha* Herb.", without indication of herbarium collections (Bailey, 1939; Standley & Steyermark, 1952). From the neighboring countries, nine species have been registered from Peru (Macbryde, 1936; Brako & Zarucchi, 1993), three or four from Panama (Woodson & Schery, 1965; Spencer, 1986; D'Arcy, 1987), and a single one for both Ecuador and Venezuela (Traub, 1958; Meerow, 1990).

In this paper, we report on the recent sampling of an unknown species of *Zephyranthes* in a semi-arid enclave of the high plain of Cundinamarca. Moreover, we included

information about the distribution of *Z. albiella*, *Z. carinata*, *Z. puertoricensis* y *Z. rosea*, which are present on Colombian territory, either native or subspontaneously naturalized. Another species occasionally cultivated in Colombia, and incorporated in this work, is *Zephyranthes robusta* (Herb. ex Sweet) Baker, frequently treated as *Habranthus robustus* Herb. ex Sweet, and of an aspect very similar to that of *Z. carinata*.

Key for the species of *Zephyranthes* s. l., present in Colombia (including two extra species, related to the studied ones)

- 1- Perigone sulfur yellow on the interior, brick red to vinaceous on the exterior 2
- 1'- Perigone white, pink or lilac 3
- 2- Spathe 15-25 mm long; pedicel 21-28 mm long; perigone tube ca. 1mm, tepals 6-8 mm wide; anthers 3 mm long; style up to 13 mm long **1. *Z. susatana***
- 2'- Spathe 25-40 mm long, pedicel 26-53 mm long, perigone tube ca. 3 mm, tepals 10-16 mm wide, anthers more than 5 mm long, style ca. 16 mm long ***Z. tubispatha***
- 3- Perigone white 4
- 3'- Perigone pink or lilac 6
- 4- Spathe split on one side over ca. 2/3 of its length, with one appendix (lobe) of 14-16 mm; perigone tube ca. 10 mm long; anther filaments 9.5 and 11 mm long; anthers more than 7 mm long ***Z. nervosa***
- 4'- Spathe split over 1/2 or less of its length, bifid; perigone tube 3-4 mm long, anther filaments more than 12 mm long; anthers up to 6 mm long 5
- 5- Spathe split over ca. 1/2 of its length, 15-26 mm long; pedicel up to 20(25) mm, perigone 30-35 mm long; anthers 3-4 mm long **2. *Z. albiella***
- 5'- Spathe split over 1/3 of its length, 25-30 mm long; pedicel more than 30 mm, perigone 35-50 mm long; anthers 6 mm long **4. *Z. puertoricensis***
- 6- Leaves glaucous; pedicel (40)45-60 mm; flowers declinate; corolla pale pink; stamens of four different lengths; anthers 4-5 mm, crescent-shaped **5. *Z. robusta***
- 6'- Leaves intensely dark green; pedicel less than 40 mm; flowers sub-erect; corolla pink or magenta; stamens

of two or three different lengths; anthers more than 5 mm, straight 7

7- Spathe 35-50 mm long; perigone 60-75 mm long with a tube of 15-20 mm; tepals 12-20 mm wide; anthers 15-22 mm long **3. *Z. carinata***

7'- Spathe up to 17-22(25) mm long; perigone 30-35 mm long with a tube of less than 5 mm; anthers 6-7 mm long **6. *Z. rosea***

1. *Zephyranthes susatana* Fern. Alonso & Groenendijk
sp. nov. Figures 1 a-d, 2 a-b.

TYPE: COLOMBIA. CUNDINAMARCA. Municipio de Suesca, Valle del río Checua, Hacienda Susatá, prados secos en zonas alteradas de bosque de *Condalia thomasiana*, 2650 m, 24-III-2001, fl. J. P. Groenendijk 1389 (holotype COL-446156, 446171 (2/2), isotype U).

Ab omnibus speciebus generis differt a subsecuentibus combinatio characteribus: bulbo subgloboso 1,8-2 cm diametro, tunicae externae griseo-rubescens, foliis 4-5, non coaetanea cum scapo florifero, inaequaliter in longitudine, glaucas, usque ad 13,5 cm longis et 2,5-3 mm latae; scapo ad 7,5-10(13) cm longo et 1-1,5 mm diametro (in sicco); spatha bifida cum tubo 12-16 mm longis et lobis apicalis 4-8 mm longis; pedicello 21-26 mm longis et c. 1 mm diametro; flos erecta vel suberecta, ad 24-30 mm longa et ca. 20-25 mm lata in initio anthesis; vinoso-lutescens, extus communiter vinoso-rufescens, intus lutescens et longitudinaliter rufo-vinaceus striatus; cum tubo inconspicuo, usque ad 1 mm, et tepalos ad 21-26 x 7-8 mm, spathulatus, apice subobtusum et apiculatus, apiculo ad 1 mm longis; stamina 6, filamentis tria ad 11 mm longis et tria ad 6-8 mm longis, antherae ad 3 x 1 mm anguste ellipticas; ovario ad 3-4 x 2 mm, stylus erectus ad 13 mm longis et stigma tripartitum ad 2,5 mm latus, ramis recurvatis conspicue papilloso-verrucosus; fructo, glauco-viridis, globosus-compressus, ad 6-7 mm longis x 6,5-10 mm latus; loculos 8-9 seminatus, semina plana, subovata, nitido-nigrescens, ad 3-4 x 2,5-3 mm.

Etymology: The species is named after the local Muisca indigenous name "Susatá", currently given to the landed estate where the plants were collected.

Vernacular name: "Papa de marrano". Meaning "pig's potato", we speculate that it might refer to the consumption of the bulbs by domestic pigs.

Plant with a subglobose bulb of 1.8-2 cm diameter, tunics reddish grey. Leaves 4-5 (not concurrent with flow-

ers, or rarely a few young ones), unequal, glaucous, up to 13.5 cm long and 2.5-3 mm wide. Scape thin, 7.5-10(13) cm long and 1-1.5 mm in diameter (when dry). Spathe 17-22 mm long, bifid, the tube 12-16 mm long, and the apical lobes 4-8 mm long. Pedicel 21-28 mm long and ca. 1 mm in diameter. Flower erect or sub-erect, 24-30 mm long and ca. 20-25 mm wide (at the start of the anthesis), vinaceous-rufous or vinaceous-yellow; the exterior generally vinaceous with darker longitudinal stripes, and the interior dark yellow. Perigone tube inconspicuous, up to 1 mm long; tepals 21-26 x 6-8 mm, spatulate, with a subobtusum-apiculate apex; apicule ca. 1 mm long. External tepals slightly broader than internal tepals, with 13-16 longitudinal whitish veins, and the internal ones with 9-11 veins. Stamens 6; three with filaments 11 mm long, two with filaments of 7-8 mm, and one ca. 6 mm long; anthers 3 x 1 mm, narrowly elliptic. Ovary 3-4 x 2 mm; style erect, up to 13 mm long; stigma trifid, 2.5 mm wide, with recurved, conspicuously papilloso-verrucose lobes of ca. 1.2 mm. Fruit pedicel 2.5-3 cm x 1.5 mm. Fruit greenish glaucous, compressed-globose, 6-7 mm long, 6.5-10 mm wide; locules with 8-9 seeds. Seeds flat, ovate to subrhombic, black, shiny, 3-4 x 2.5-3 mm.

Phenology. In three years, we observed flowering from February to April, and November to December. Fruiting occurred during the flowering period and in the subsequent month. When clusters of plants were found flowering, the scapes were mostly not accompanied by leaves of the same bulb. Individuals with only leaves were found; these were probably juvenile plants. When fruiting, plants were observed either with or (still) without well-developed leaves. Under cultivation conditions, with a regular water supply, plants do have leaves together with floral scapes (Fig. 1a).

Habitat, distribution and dispersal. The species was found in a semi-arid enclave of the high plain of Bogotá (around 2650 m.a.s.l.), where the annual precipitation is about 600 mm and the potential evapotranspiration exceeds 1000 mm (Claro-Rizo, 1995). In this zone, remnants are found of dwarf forest characterized by *Condalia thomasiana* Fern. Alonso (Rhamnaceae), an endemic treelet of this particular zone. The *C. thomasiana* community was relatively recently described by Van der Hammen (1997; see also Fernandez-Alonso, 1997, and Groenendijk et al., in prep).

Z. susatana is locally abundant in open, dry grasslands, which are severely disturbed by man and cattle, and often dominated by *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. It forms patches of 5-20 m in diameter, with hundreds of individuals. Other species commonly found



Figure 1. *Zephyranthes susatana*. a- Habit (cultivated plant). b- Scape with flower in lateral view. c- Flower from above, showing stigma lobes. d- Detail of the outer tepals (Photographs: a-c: J. L. Fernández; d: L. Tikovský).

at these sites are *Schkuhria pinnata* (Lam.) Kuntze, *Selaginella sellowii* Hieron., *Ophioglossum nudicaule* L.f., *Evolvulus bogotensis* Ooststr., *Verbena trifida* H.B.K., and *Stenandrium dulce* (Cav.) Nees.

The stiff fruit pedicel and the (sub)apically dehiscent capsule suggest that seed dispersal takes place over rather short distances, in spite of the flat seeds. Probably, the seeds are released from the capsule after agitation of the pedicel and capsule by wind, or probably animals, and fall nearby the mother plant.

Paratype: COLOMBIA. **CUNDINAMARCA.** Municipio de Suesca/Nemocón, Zona del río Checua, Finca Susatá y zonas aledañas, claros (prados) en bosque de *Condalia*, c. 2700-3000 m, 12-VI-1998, fr. J. L. Fernández. 15708 (COL-437918); ibidem, prados con *Pennisetum* en la Hacienda Susatá, fl. fr., 26-XII-2002, J. L. Fernández & J. Groenendijk 20154A (COL, U); Plantas cultivadas en maceta en Bogotá, (bulbos procedentes de la región del Checua, Nemocón), 30-XII-2002, fl., J. L. Fernández 20155 (COL 481297); ibidem, 28-II-2003, fl. J. L. Fernández 20532 (COL 484749); ibidem, Mpio de Suesca, Hacienda Susatá, matorral fuertemente intervenido de *Baccharis bogotensis* y *Dalea caerulea*, 2700 m, 16-III-2000, fr. J. P. Groenendijk 1377 (COL- 446172); ibidem, 2650 m; pajonal abierto con *Pennisetum clandestinum*, 11-XII-2001, fl. J. P. Groenendijk 1667 (COL, HUA, U); ibidem, Hacienda Susatá, 2700 m, 20-II-2002 J. Struik & M. van der Linden s. n. (COL, U).

Affinities. The general aspect of *Z. susatana* and the flower color show some affinity with that of the South-American species *Z. tubispatha* (L' Her.) Herb. ex Traub. This latter species has flowers ochre-orange colored on the exterior, and copper-orange on the interior. Moreover, it differs from the here described species by having a longer spathe (24-40 mm long), a larger pedicel (26-53 mm) and perigone tube (3 mm), clearly wider tepals (more than 10 mm), and larger anthers of up to 8 mm long.

Zephyranthes tubispatha (L' Her.) Herb. ex Traub. Species described from the collection *Commerson 3116* (P), found near Buenos Aires (= *Habranthus tubispathus* (L'Her.) Traub, Pl. Life 7: 42. 1951; = *Amaryllis tubispatha* L' Her. Sert. Anglic. 9: 1788). Various authors have treated this plant as conspecific of *Habranthus andersonii* Herb., -Edwards' Bot. Reg. 16. tab. 1345. 1830- based on a collection from Montevideo (**Uphof**, 1946; **Ravenna**, 1970; **Huzinker & Di Fulvio**, 1973; **Traub**, 1975; **Holmes & Wells**, 1980; **Arroyo**, 1990).

2. *Zephyranthes albiella* Traub. Pl. Life 6: 51. 1950.

TYPE: COLOMBIA. **CUNDINAMARCA.** Bogotá, (Cultivated bulbs) 30-IX-1949 *Traub 41* (MO 3158259).

= *Aidema albiella* (Traub) Ravenna Onira 8(1): 3. 2003.

Vernacular name «lirio» (in Guayaquil, Ecuador).

Plant generally presenting leaves simultaneously with flowers. Scapes of about 2 mm thick. Pedicel up to 20-25 mm long. Spathe bifid, equal to or longer than pedicel (15-26 mm); spathe lobes as long as the united part. Perigone 30-35 mm long, white, with a greenish base; tube ca. 3 mm long. The 3 major stamen filaments ca. 21 mm long, with anthers of 3-4 mm long. Style 30-35 mm long. Seeds 1-3 per locule, flat, 7 x 5 mm.

Habitat and distribution: Species described from the high plain of Cundinamarca, in central Colombia, based on cultivated bulbs, its origin being unclear. The plant was not collected afterward in Cundinamarca. Later, it was registered in the pacific lowlands of Ecuador (**Meerow**, 1990), and also in Panama, Puerto Rico and Jamaica, by **Ravenna** (2003). The last author considered *Z. puertoricensis* a conspecific of *Z. albiella*, a view not shared in this paper. More recently, a specimen collected in 1960 in the lower parts of the department Bolívar was studied, which might suggest that the type plants originated from the Colombian lowlands.

Studied material: COLOMBIA. **BOLIVAR.** Arenas, 9 Km WSW San Jacinto, prados, 350 m, 23-IV-1962, fl., *A. Beuther 97* (COL 492043). ECUADOR. **GUAYAS.** Guayaquil, 6 m.a.s.l., cultivada, muy frecuente, s.f. (fl.), *F. de Valverde 95A* (COL-163150).

Affinities. The nearest species *Z. puertoricensis* Traub., also found in Colombia, differs from *Z. albiella* by its spathe of 25-30 mm, shorter than the pedicel and with very short lobes of ca. 1/3 of its length, a bigger perigone (35-50 mm long), and the longer anthers (4.5-6.5 mm long).

3. *Zephyranthes carinata* Herb., Bot. Mag. 52: pl. 2594. 1825. Figure 2 c-d

= *Atamosco carinata* (Herb.) Standl. in Standl. & Calderón, Lista Pl. Salv. 51. 1925.

= *Z. grandiflora* Lindl., Bot. Reg. 11: pl. 902. 1825.

Vernacular name: «Lirio» (Cundinamarca).

Recognized by its bulbs of up to 3.5 cm in diameter, with wine-red tunics. Scapes 10-15 cm long. Spathe dark



Figure 2. a-b. *Zephyranthes susatana*. a- Detail of the perigone whorls, from above. b- Unripe fruit. c-d: *Zephyranthes carinata*. c- Cluster of plants growing in their natural environment, in San José de Suaita, Santander. d- Detail of the perigone, anthers and stigmas. (Photographs: a-b: J. Groenendijk; c-d: J. L. Fernández).

lilac, large (35-50 mm), always larger than pedicel which is 10-30 mm long. Perigone large, pink, with a tube of up to 20 mm long; tepals 60 mm long and 15-20 mm wide. Anthers erect, yellow, large (15-20 (22) mm long). Style 50-60 mm long, with three short lobes of 1.5-2 mm.

Habitat and distribution. Native from México and Guatemala, the species is nowadays widespread from southern USA to Costa Rica, the Antilles, and some isolated spots in South America (**Standley & Steyermark**, 1952; **Gereau**, 2001). In South America, it apparently only occurs cultivated and naturalized. It generally flowers after the rainy periods, but in humid pastures and under cultivation conditions, colonies show staggered flowering during the whole year. Occasionally, leaves appear together with flowers. It has been observed as a weed in sugar cane plantations in the subandine belt, and as a colonizer in pastures and open herb-covered slopes near villages (Cundinamarca, Santander). It is also frequently cultivated in gardens, mostly in colder regions above 2200 m.a.s.l.

Studied material. COLOMBIA: **ANTIOQUIA:** Medellín, *Archer 685* (MEDEL); **BOYACÁ:** Villa de Leyva, Cultivada en Jardines, 5-I-2002, *J. L. Fernández & R. Castillo 19765* (COL 474875, 474876). **CUNDINAMARCA.** Municipio de Susa, 2600 m, VI-1997, fl, hj, *R. E. Amaya 1* (COL 422388); Carretera de San Bernardo al Río Negro, en cultivos de caña de azúcar, 1700-1800 m, 2-VIII-1987, *J.L. Fernández & al. 7082* (COL 341145, MA); Bogotá, Jardín Botánico de Bogotá, 2600 m; creciendo como cultivada y subespontánea, fl., 31-X-1997, *J. L. Fernández & J.M. Idrobo 15024* (COL 406495); ibidem, 6-III-1998, *J. L. Fernández 15274* (COL 439086); ibidem, cultivada en antejardines en Bogotá, 15-V-2002, *J. L. Fernández 19840* (COL 476892); alrededores de Fusagasugá, 1780-1850 m, 15-IV-1946; fl. *H. García-Barriga 11957* (COL- 25707); Sasaima, Vereda Aposentos, 10-VII-1960, *H. García-Barriga 17258* (COL 102325); Municipio de San Francisco, 1800 m, *A. L. Hincapié 7* (COL); ibidem, Municipio de Choachí, c. carretera, 1-IV-1960, fl. *J. M. Idrobo s.n.* (COL- 408772, 445211). **SANTANDER.** Municipio de Suaita, San José de Suaita, creciendo silvestre o asilvestrada en taludes y prados, 4-IV-2003, fl. *J. L. Fernández 20200* (COL 483811, 484778); ibidem, prado húmedo, en predios de la Fundación San Cipriano, 2-X-2003, *J. L. Fernández 20990* (COL).

Affinities. The most resembling species to *Z. carinata* is *Z. rosea* (Spreng.) Lindl., being predominantly Antillean and Mesoamerican. It has pale pink flowers, and a spathe of 17-22 mm, clearly shorter than the pedicel which is 29-

33 mm long. Its perigone is 3-4 cm long, with a tube of less than 5 mm, and it has shorter anthers (6-7 mm).

4. *Zephyranthes puertoricensis* Traub, Pl. Life 7: 37. 1951. Figure 3 a.

TYPE: PUERTO RICO. cultivated bulbs, fl., fr., 30-III-1950, *Traub 151* (MO 3158255).

Species with bulbs of 1.5 cm in diameter, with linear leaves up to 35 cm long, and 6-9 mm wide, these generally absent during flowering. Scape 9-11 cm; spathe 25-30 mm long, scarcely divided distally. Pedicel (30) 35-50 mm. Perigone white, greenish in the throat, of intermediate size (35-50 mm), with a short tube of 3-4 mm. Tepals 3.8-4 x 1.5 cm. Stamen filaments of two sizes: 15 and 21 mm; anthers 6 mm long. Stigma trifid, the lobes filiform, ca. 3 mm long.

Studied material: COLOMBIA. **BOLÍVAR.** Islas de San Bernardo, Múcura, 18-IV-2003, *C. Flórez 110* (COL). **TOLIMA.** Purificación. Zonas arenosas, estación seca, 22-VII-1934 *E. Pérez-Arbeláez & H. García-Barriga 3102* (COL 3232).

Affinities. *Z. puertoricensis* was treated as a species of the genus *Habranthus* by some authors (**Traub**, 1951, 1958; **Flory**, 1959). On the other hand, plants belonging to this species were cited frequently as *Zephyranthes tubispatha* (Ker-Gawler) Herbert (= *Amaryllis tubispatha* Ker-Gawler, de Jamaica), a homonym of *Amaryllis tubispatha* L' Her., which is an Argentinean plant described before by L'Heritier (**Hume**, 1940; **Flori**, 1959), and is also treated in this paper.

Zephyranthes nervosa. *Z. puertoricensis* is related to the Venezuelan species *Z. nervosa* (Kunth) M. Mart. & Galeott., Bull. Acad. Roy. Sci. Bruxelles 10: 114. 1843 (= *Amaryllis nervosa* Kunth) the type of which is from Venezuela, Valle de Aragua, *Humboldt 742* (Holótipo 3115 - P). Like the species presented here, it has white flowers, and has a similar aspect, but differs by its spathe split over 2/3 of its length, the perigone tube of 10 mm, and the shorter filaments (9.5 and 11 mm).

5. *Zephyranthes robusta* (Sweet) Baker Handb. Amaryll. 35. 1888.

= *Habranthus robustus* Herb. ex Sweet, Brit. Fl. Gard. 4: pl. 14. 1838.

Illustrations: Bot. Magaz. 152, tab. 9126 (1926).

Vernacular name: "Cebollita" (Antioquia)



Figure 3. a- *Zephyranthes puertoricensis*. Plants growing in their natural environment, on the Islas de San Bernardo, Bolívar.
b- *Zephyranthes rosea*. Detail of the scape with the flower. (Photographs: a- from the voucher C. Florez- 110 (COL);
b: from the voucher J. L. Fernández 21.202 (COL).

Big plants, with bulbs 3-4 cm in diameter, with various large leaves of up to 30-40 cm x 5-10 mm, generally glaucous. Scape 15-30 cm, relatively thick (3-4 mm). Spathe 25-40 mm, bifid in the upper third part. Pedicel (40)45-60 mm, generally larger than the spathe. Perigone declinate, large, 60-80 mm long, pale pink or lilac, with a tube of 2-4 mm long. Tepals oblanceolate, acuminate. Stamens with declinate filaments of 4 different lengths: two of ca. 40 mm, two of ca. 20 mm and two intermediate to the others. Anthers 4-5 mm long, lunar-shaped. Stigma lobes recurvate, 3 mm long.

Habitat and distribution. This species has long been considered native of Argentina and Uruguay, and more recently found to originate from Río Grande do Sul, Brazil (Traub, 1958; Ravenna, 1967; Arroyo, 1990). At

present, it is widely cultivated in the USA and various South American countries, where it occasionally behaves as a naturalized species. It has been treated usually within the genus *Habranthus*, because of its declinate flowers and stamens of four different lengths (Stapf, 1926; Sealy, 1937; Fabris, 1969; Ravenna, 1970).

Studied material: COLOMBIA. ANTIOQUIA. Medellín, 1470 m, 24-III-1995, R. Fonnegra & F.J. Roldán 5424 (HUA, MO); ibidem, 1740-1830 m, 16-III-1986, F. J. Roldán & O. Marulanda 240 (HUA, MO).

Affinities. *Z. robusta* has an aspect similar to that of *Z. carinata* and has a similar size and perigone color. However, it is easily distinguished from *Z. carinata* by the following combination of character states: glaucous

leaves; floral pedicel 40-60 mm long; declinate perigone with a short tube (2-4 mm); acuminate tepals with fimbriate scales around the insertion points of the stamens; and anthers 4-5 mm long.

6. *Zephyranthes rosea* (Spreng.) Lindl., Edward's Bot. Reg. 10: pl. 821. 1824. Figure 3 b, 4 a-b

= *Amaryllis rosea* Spreng., Linn. Syst. Veg. Cur. Post.: 133, 1825.

Vernacular name: "rain flower" (San Andrés).

Plants with bulbs of ca. 15 mm in diameter, with up to 5-6 thin, dark green leaves, 3(-4) mm wide. Flowering scapes



Figure 4. *Zephyranthes rosea*. a- Lateral view of the flower showing stamens and stigmas. b- Flower from above, showing the colors of the interior. (Photographs: cultivated plant, voucher J. L. Fernández 21.202 (COL).

1-3, emerging successively, concurrent with the leaves, 2.5 mm thick. Pedicel 3-3.3 cm long, clearly exceeding the spathe. Spathe 17-25 mm, slightly bifid, primarily pink. Perigone 30-35 mm long, with a tube of less than 5 mm long. Tepals linear-lanceolate, acute, up to 0.8-1 cm wide. Stamen filaments of four different lengths: one of 11 mm, four of 12-13 mm, and one of 16 mm. Anthers 6-7 mm long, which is much smaller than in *Z. carinata*.

Habitat and distribution. Described from Cuba (**Hume**, 1940), the species is widespread in Central America and the Antilles. It has been found on San Andrés y Providencia, as witnessed by a photograph corresponding to this species, but named *Z. grandiflora*, in a publication by **González & al.** (1995).

Studied material: COLOMBIA. **BOLÍVAR.** Islas del Rosario, cultivada y asilvestrada en la Isla del Acuario. 19-X-2002, J. L. Fernández 19960 (COL 481539, 481540); ibidem, cultivada en matera, fl., 11-X-2003, J.L. Fernández 21.202 (COL). **SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA.** Isla de Providencia, La Montaña, P. Lowy 152 (COL)

Affinities: The species *Z. bifolia* (Aubl.) M. Roemer, described from Haiti, and *Z. cardinalis* C. H. Wright, from Santo Domingo, have been treated frequently as conspecifics of *Z. rosea* or as varieties of it (**Hume**, 1939; **Ravenna**, 2003). It has been confused occasionally with *Z. grandiflora* / *Z. carinata* by some authors.

Acknowledgements

The Instituto de Ciencias Naturales of the Universidad Nacional de Colombia supported the development of this work. The Santander family, owner of the Hacienda Susatá, kindly permitted us to work on their property. We are indebted to Professor Thomas van der Hammen and the Corporación Regional de Cundinamarca (CAR) for calling our attention to the collection site, where the plant that we described here was found about five years ago. Carlos Florez provided specimens of *Zephyranthes* from Las Islas de San Bernardo. Ludek Tikovský provided photographs of flowers of *Z. susatana*. Finally, we thank Carlos Aedo (MA), M. Arbo (SI), A. Freire (MO) and P. Ravenna, for their support in the acquirement of literature.

References

- Arroyo, S.** 1990. *Habranthus* (Amaryllidaceae) en Argentina y Uruguay. *Parodiana* 6 (1): 11-30.
- _____ & **B. E. Leuenberger** 1996. Type specimens of names in American Amaryllidaceae at the Berlin-Dahlem herbarium (B and B-W). *Willdenowia* 25: 693-702.

- Bailey, L. H.** 1939. The Standard Cyclopedia of Horticulture. Vol 3. The Macmillan Co. New York.
- Brako, L. & J. L. Zarucchi** 1993. Catálogo de las Angiospermas y Gimnospermas del Perú. *Mongr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard.* **45**. Missouri Bot. Gard.
- Christian, P. J.** 1999. *Zephyranthes* In: <http://rareplants.co.uk/zephyran.htm>
- Claro-Rizo F. A.** 1995. Estudio agroclimático de la cuenca alta del Río Bogotá y del Río Ubaté-Suárez. IDEAM Bogotá
- D'Arcy, W. G.** 1987. Flora of Panama, Checklist and index. Missouri Bot. Gard. Saint Louis.
- Dahlgren, R. M. T., H. T. Clifford & P. F. Yeo** 1985. The families of Monocotyledons. Structure, Evolution and Taxonomy. Springer-Verlag. Berlin.
- Fabris, H. A.** 1969. Amaryllidaceae. In: Flora de la Provincia de Buenos Aires **4** (1): 520-535.
- Fellers, J. D.** 1996. A passion for rainlilies: *Cooperia*, *Habranthus* and *Zephyranthes*. *Herbertia* **51**: 78-112.
- Fernández-Alonso, J. L.** 1997. Nueva especie de *Condalia* Cav. (Rhamnaceae) y notas sobre los géneros de la familia en Colombia. *Caldasia* **19** (1-2): 101-108.
- Flory, W. S.** 1959. The chromosomes of *Zephyranthes insularum*, *Z. puertoricensis* and *Z. nervosa*. *Herbertia* **15** (1): 55-66.
- Gereau, R. E.** 2001. Liliaceae, pp. 1219-1228, In: W.D. Stevens, A. Pool & O.M. Montiel (eds), Flora of Nicaragua I, *Mongr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard.* **85** (1).
- González, F., J. N. Díaz & P. Lowy.** 1995. Flora ilustrada de San Andrés y Providencia. Sena- U. Nacional. Publicaciones Sena.
- Groenendijk, J. P., J. F. Duivenvoorden, N. Rietman & A. M. Cleef.** in prep. Successional position of key species in Andean dry forests as a basis for restoration trials.
- Holmes, W. C. & C. J. Wells.** 1980. The distribution of *Habranthus tubispathus* (L' Her.) Traub in South America and North America -Texas and Louisiana. *Sida* **8** (4): 328-333.
- Hume, H. H.** 1940. *Zephyranthes* of the West Indies. *Herbertia* **6**: 121-134.
- Huzinker, A. T.** 1967. Estudios sobre Amaryllidaceae II. Notas taxonómicas sobre los géneros *Hieronymella*, *Hippeastrum* y *Habranthus*. *Kurtziana* **4**: 7-18.
- _____ & **T. E. dí Fulvio.** 1973. Una nueva especie de *Habranthus* (Amaryllidaceae) de la provincia de Buenos Aires. *Kurtziana* **7**: 255-259.
- Lopes-Ferrari, A. R. & A. Espejo-Serna.** 2002. Amaryllidaceae, fasc. **128**, Flora de Veracruz, Inst. Ecol. Xalapa, Veracruz.
- Mabberley, D. J.** 1997. The Plant Book. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- Macbryde, J. J.** 1936. Amaryllidaceae. Flora of Peru. *Field. Mus. Nat. Hist. Bot. Ser.* **13**(I-3): 631-690.
- Meerow, A. W.** 1990. Amaryllidaceae, n° 41. In: G. Harling & L. Anderson (eds.) Flora of Ecuador. **41**: 1- 52.
- _____ & **D. A. Snijman.** 1998. Amaryllidaceae. In: K. Kubitzki (ed.), Families and genera of vascular plants, vol. 3: 83-110. Springer-Verlag, Berlin.
- _____, **M. F. Fay, C. L. Guy, Q-B., Li, F. Q. Zaman & M. W. Chase.** 1999. Systematics of Amaryllidaceae based on cladistic analysis of plastid rbcL and trnL-F sequence data. *Amer. J. Bot.* **86** (9): 1325-1345.
- Ravenna, P.** 1967. Contribucões ao estudo das Amaryllidaceae da América do Sul. *Sellowia* **19** (19): 25-36.
- _____. 1970. Contributions to South American Amaryllidaceae III. *Plant Life* **26**: 72-103.
- _____. 1971. Contributions to South American Amaryllidaceae IV. *Plant Life* **27**: 61-89.
- _____. 2003. *Aidema*, a new genus of neotropical Amaryllidaceae. *Oniria Bot. Leafl.* **8** (1): 1-4.
- Sealy, J. R.** 1937. *Zephyranthes*, *Pyrolirion*, *Habranthus* and *Hippeastrum*. *J. Roy. Hort. Soc.* **63**: 195-209.
- Spencer, L. B.** 1986. Six new species of North American *Zephyranthes*. *Phytologia* **59** (2): 85-88.
- Standley, P. C. & J. A. Steyermark** 1952. Amaryllidaceae. pp. 103-145 In: P.C. Standley & J.A. Steyermark (eds.) Flora of Guatemala, *Fiediana Bot.* **24** (3).
- Stapf, O.** 1926. *Habranthus robustus* Herb. ex Sweet., *Bot. Magaz.* **152**, tab. 9126.
- Traub, H. P.** 1950. *Zephyranthes albiella*. *Pl. Life* **6**: 51.
- _____. 1951. *Zephyranthes puertoricensis*. *Pl. Life* **7**: 37.
- _____. 1958. *Zephyranthes tubispatha*, *Z. puertoricensis*, *Z. insularum*, *Z. nervosa*, and *Habranthus robustus*. *Taxon* **7**: 109-113.
- _____. 1975. *Zephyranthes tubispathus* (L'Herit.) Traub. *Pl. Life* **31**: 76-77.
- Uphof, J.C.** 1946. Review of the genus *Habranthus*. *Herbertia* **13**: 93-97.
- Van der Hammen** 1997. El bosque de *Condalia*. *Caldasia* **19** (1-2): 355-359.
- Woodson, R. E. & R. W. Schery.** 1965. Amaryllidaceae. pp. 12-26 In: Woodson, R.E. & R.W. Schery (eds.) Flora of Panamá, *Ann. Missouri Bot. Gard.* **32**.

OBTENCIÓN DE VARIEDADES DE CAFÉ CON RESISTENCIA DURABLE A ENFERMEDADES, USANDO LA DIVERSIDAD GENÉTICA COMO ESTRATEGIA DE MEJORAMIENTO*

por

Germán Moreno Ruiz**

Resumen

Moreno, G.: Obtención de variedades de café con resistencia durable a enfermedades, usando la diversidad genética como estrategia de mejoramiento. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (107): 187-200, 2004. ISSN: 0370-3908.

Con el objetivo de producir variedades mejoradas de café con resistencia a la roya de la hoja (*Hemileia vastatrix*), la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia inició en 1970 un programa de investigación, cuyos primeros resultados se alcanzaron en 1982, con la obtención de la variedad COLOMBIA. En este trabajo se discute la diversidad genética como estrategia de mejoramiento utilizada en el programa con el fin de lograr que la resistencia sea durable, se describe el esquema de mejoramiento seguido y se presentan las principales características de los materiales producidos.

Palabras clave: Café, mejoramiento genético, resistencia durable a enfermedades, diversidad genética, *H. vastatrix*.

Abstract

With the purpose of producing improved coffee varieties with resistance to the leaf rust (*Hemileia vastatrix*), the National Federation of Coffee Growers of Colombia initiated in 1970 a research program, whose first results achieved in 1982 were the obtention of the COLOMBIA coffee variety. The use of genetic variability as a strategy in plant breeding for a durable resistance is discussed. In addition, the breeding outline is described and the main features of the developed materials are presented.

Key words: Coffee, Genetic breeding, Durable disease resistance, genetic diversity, *H. vastatrix*.

* Trabajo preparado como requisito para la posesión como Miembro Correspondiente de la Academia.

** Líder, hasta Julio de 2001, de la Disciplina Mejoramiento Genético y Biotecnología de Cenicafé; E-mail: germanmoreno17@hotmail.com

Introducción

El café fue introducido en Colombia hace aproximadamente 280 años y desde entonces ha estado estrechamente vinculado a la formación y desarrollo del país. Considerado inicialmente como planta productora de una bebida exótica, el café pasó rápidamente a ocupar un puesto de vanguardia en la economía nacional, hasta convertirse en el principal productor de divisas (**Federacafé**, 2001). Aún hoy, cuando la industria cafetera atraviesa por su peor crisis, a causa de los bajos precios en el mercado internacional, el café sigue teniendo gran importancia en el país, por la cantidad de personas que dependen de él.

Las variedades de café sembradas en Colombia han contribuido significativamente a la consolidación de la industria cafetera nacional. Estas variedades pertenecen a *Coffea arabica* L, la única especie tetraploide ($2n=4x=44$ cromosomas) y autocompatible en el género *Coffea* (**Carvalho & Monaco**, 1969). Esta especie muestra una gran diversidad genética en Etiopía, su lugar de origen, pero en América Latina sus variedades se caracterizan por una extrema uniformidad genética, debido a su origen restringido y a su alta tasa de autopolinización (90%, aproximadamente) (**Wellman**, 1961).

Borbón, y especialmente Típica, son las dos variedades que predominaron en la caficultura colombiana hasta mediados del siglo XX. Estas variedades son de porte alto, se adaptan bien a las condiciones de la zona cafetera nacional, tienen muy buenas características agronómicas y producen una bebida de excelente calidad. Sin embargo, su potencial agronómico nunca fue suficientemente aprovechado, porque las prácticas de cultivo de la época eran ineficientes. Sólo hasta la década de los años 50 se demostró -gracias a estudios conducidos en el Centro Nacional de Investigaciones del Café, CENICAFÉ, la dependencia de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia encargada de la investigación- que el empleo de fertilizantes y la eliminación del sombrío usado en su cultivo, incrementaban notablemente la producción. Simultáneamente, en 1952 fue introducida del Brasil la variedad Caturra. Como las anteriores, esta variedad posee cualidades sobresalientes, pero quizás su atributo más valioso es su tamaño reducido, característica que facilita su siembra en altas densidades, con las que se consiguen aumentos significativos en la productividad. Como resultado, en la década de los años 60 se produjo una notable transformación en la caficultura, impulsada por la puesta en práctica, simultáneamente, de los avances mencionados: utilización de la variedad Caturra con altas densidades de siembra, a plena exposición solar y con

aplicaciones de fertilizantes. A este período se le conoce como “tecnificación de la caficultura nacional”, durante el cual significativos aumentos en la productividad fueron alcanzados (**Castillo & Moreno**, 1985).

Durante varios años la caficultura colombiana transcurrió sin grandes sobresaltos, hasta el año 1970, cuando una enfermedad limitativa, la roya de la hoja del café, producida por el hongo *Hemileia vastatrix*, apareció en el continente. Trece años después, la roya fue descubierta en Colombia (**Castillo & Moreno**, 1986).

La roya de la hoja del café es la enfermedad más importante de este cultivo. Hizo su aparición por primera vez en el África Oriental en 1861 y pocos años después causó epidemias devastadoras en plantaciones de Ceilán, India, Java y Filipinas (**Wellman**, 1952). La severidad de las epidemias se debe, de una parte, a que las esporas del hongo son transportadas por el viento y por la lluvia (**Rayner**, 1961), facilitando su rápida diseminación en un tiempo relativamente corto. De otra parte, a que la roya causa una fuerte defoliación en las plantas, que se traduce en disminuciones importantes de la producción. En Colombia, en ausencia de medidas de control, la roya puede disminuir la producción hasta en un 23 % (**Rivillas et al.**, 1999). Técnicamente el control de la enfermedad es posible por medio de aspersiones con fungicidas. Sin embargo, la topografía accidentada de la zona cafetera y las altas precipitaciones, le restan eficiencia a esta práctica y la encarecen.

La roya de la hoja se había estudiado principalmente en el CIFIC (Centro de Investigaciones de las Royas del Café), en Portugal. Allí, mediante la aplicación de la hipótesis “gen a gen”, que explica la interacción entre huéspedes y patógenos (**Flor**, 1955), se habían identificado hasta 1970, 30 razas del hongo, la mayoría atacando a materiales de *C. arabica*. Allí también se habían determinado, en germoplasma de *C. arabica*, 5 genes de resistencia de naturaleza específica, denominados Sh1, Sh2, Sh3, Sh4 y Sh5, este último presente en todas las variedades cultivadas en América. Después de 1970, cinco genes más de resistencia específica fueron determinados en una introducción conocida como “Híbrido de Timor” (**Rodrigues, Bettencourt & Rijo**, 1975).

Todas las variedades que se cultivaban en América cuando la roya de la hoja apareció en el continente, eran portadoras solamente del gen Sh5 y por tanto, altamente susceptibles a esta enfermedad, situación que planteó a CENICAFÉ la necesidad de orientar su programa de investigación hacia la obtención de variedades resistentes, sin alterar la calidad tradicional del café colombiano.

No obstante, las dificultades que existían para llevar a cabo un programa de tal magnitud eran grandes. Por una parte, dentro de la colección de germoplasma de CENICAFÉ se habían identificado algunas introducciones, procedentes del África, que poseían los genes de resistencia Sh1 a Sh4. Sin embargo, estas introducciones tenían defectos importantes, especialmente en sus granos, cuya eliminación implicaba la ejecución de largos procesos de mejoramiento y selección. De otra parte, en los sitios donde se habían cultivado comercialmente selecciones de *C. arabica* con los genes de resistencia Sh1 a Sh4, las razas compatibles con ellos habían aparecido rápidamente, demostrando con esto que *H. vastatrix* es un organismo cambiante y que la resistencia impartida por los genes de *C. arabica* es relativamente efímera (Castillo, Moreno & López, 1976).

Por la época en que se planeaba el trabajo ya existían numerosos ejemplos en la agricultura que demostraban que la siembra de cultivos genéticamente homogéneos, en grandes extensiones y durante períodos prolongados, conducía a la aparición de nuevas razas de los patógenos, fenómeno conocido como “quiebra” de la resistencia (Borlaug, 1964; Browning & Frey, 1969). De esta situación se podía deducir que la homogeneidad genética de los cultivos era el factor que los convertía en vulnerables a las epidemias, hecho que aunque debatido, hoy es generalmente aceptado (National Academy of Science, 1974). A la luz de estos hallazgos, el caso del café y la roya constituía un claro ejemplo de vulnerabilidad genética, documentado por la excesiva uniformidad genética de las variedades en cultivo, por el elevado número de razas del patógeno descritas hasta el momento (39) y por la rápida diseminación que tuvo la enfermedad después de su aparición en América.

Para esa época, eminentes investigadores, como Borlaug (1964), Simmons (1972) y Marshall (1977), ya proponían sistemas de manejo de genes de resistencia de naturaleza específica e inespecífica, para atenuar la vulnerabilidad genética de los cultivos. Sin embargo, tales sistemas, aceptados por unos y criticados por otros, se referían exclusivamente a cultivos anuales, especialmente a cereales. Entre las investigaciones realizadas, las de Browning & Frey (1969) y Browning (1974a y 1974b) llamaron la atención de los investigadores de CENICAFÉ, por la solidez de sus análisis. En ellas se proponía el uso de la diversidad genética como mecanismo para la estabilización de la formación de razas de los patógenos, estrategia que fue adoptada para la obtención de una variedad de café con resistencia a la roya y que se analizará más adelante.

Para los propósitos de crear una variedad de café con resistencia a la roya de la hoja, la duración de esta resistencia era quizás el problema más importante por resolver, por ser el café un cultivo semi-perenne de ciclo económico prolongado, cercano a los 20 años, que hace que el cambio de variedad cada vez que aparezca una nueva raza, sea impracticable.

No obstante ser la duración de la resistencia a la roya el objetivo central en el programa, era una característica más dentro del conjunto a considerar para la creación de una variedad mejorada. En efecto, caracteres como arquitectura de las plantas, producción, adaptabilidad, calidad del grano y especialmente de la bebida, fueron también objetivos principales en este programa, cuyos aspectos más destacados se presentan a continuación.

Desarrollo del programa para obtener variedades mejoradas de café resistentes a la roya de la hoja.

Diversidad genética como estrategia de mejoramiento

Las bases de esta estrategia fueron desarrolladas por Browning (1974a y b) a partir de estudios hechos en un ecosistema silvestre en el Medio Oriente, que fue observado por cerca de 30 años. En el ecosistema, con gran variabilidad, se encontraban más de 40 especies de plantas, entre las cuales estaban los principales cereales y sus ancestros y hospedantes principales, secundarios y alternantes de una gran cantidad de patógenos asociados a ellas.

El hecho destacado es que no obstante la presencia de numerosos patógenos, el ecosistema se mantenía en un “equilibrio armónico”, en el que no predominaban las plantas más resistentes ni desaparecían las más susceptibles, como tampoco las razas más virulentas ni las avirulentas. El equilibrio se alcanzaba porque en el ecosistema actuaban numerosos mecanismos de protección: inmunidad, resistencia específica, resistencia inespecífica, tolerancia, susceptibilidad, resistencia y susceptibilidad inducidas, antagonismo y homeostasis.

De esta situación se deduce que todos los mecanismos de resistencia contribuyen al equilibrio epidemiológico de los ecosistemas naturales y que la estabilidad de la resistencia no depende necesariamente del tipo de resistencia utilizado, concepto que cada día gana más adeptos. Para explicar cómo actúan estos mecanismos contra las epidemias, Browning (1974) propuso la “teoría unificada de la protección genética de los cultivos contra las enfermedades”, según la cual “para proteger la población, la naturaleza utiliza una resistencia de tipo dilatorio, que

retarda la enfermedad, pero para alcanzarla, utiliza muchos tipos de resistencia genética y de estructuras espaciogénicas”.

Al momento de aplicar la diversidad genética como estrategia de mejoramiento en el caso del complejo café-roya, el interrogante principal era cómo reproducir, eficientemente, la diversidad de un ecosistema natural, como el mencionado por Browning, en un ecosistema agrícola, como es el café cultivado. Para esto se planeó un programa, (Castillo, 1972; Moreno, 1974), consistente en la transferencia, por medio de cruzamientos, de genes de resistencia de interés, a variedades de reconocida adaptabilidad en el país. En este programa se destacan dos aspectos: la elección de los progenitores y la aplicación de un método de mejoramiento acorde con el problema tratado.

Los progenitores escogidos

Progenitor básico. La variedad Caturra fue seleccionada como progenitor básico. De excelentes características agronómicas, se difundió rápidamente en la zona cafetera nacional, hasta alcanzar una superficie cercana a las 350.000 Ha. Se distingue por el porte bajo de sus plantas, característica gobernada por un gen dominante (Ct, Ct), de efecto pleiotrópico, que acorta la longitud de los entrenudos del tronco y de las ramas y actúa sobre la forma de las hojas (Krug, Mendes & Carvalho, 1949). Debido a esto, en la descendencia de sus cruzamientos con otras variedades, se puede alcanzar una alta homogeneidad fenotípica en un tiempo relativamente corto. Es altamente susceptible a la roya de la hoja.

Progenitor resistente. Como progenitor resistente se escogió el “Híbrido de Timor” (HT), una población heterogénea de cafetos de porte alto, multiplicada a través de semillas recolectadas inicialmente en una sola planta, descubierta en la Isla de Timor en la década de 1940-50 dentro de una plantación de *C. arabica* (Goncalves & Rodrigues, 1976). Se ha propuesto que el HT se formó a partir de un cruzamiento natural entre las especies *C. arabica* y *C. canephora* cultivadas en esta isla. El HT se comporta como una introducción más de la especie *C. arabica*, porque sus plantas también son tetraploides ($2n=4x=44$ cromosomas) y autocompatibles y porque se cruza fácilmente con variedades de *Coffea arabica*, produciendo descendientes con un nivel aceptable de fertilidad.

Entre el HT y la especie *C. arabica* existe un grado importante de afinidad, atribuible a que la población original de este híbrido parece ser resultado de varios

retrocruzamientos hacia *C. arabica* (Moreno, 1989). Esta sería la razón por la cual cuando se han comparado las principales variedades comerciales de *C. arabica*, con el HT y con la descendencia de sus cruces con Caturra, el polimorfismo ha sido relativamente bajo, bien sea empleando en la comparación compuestos isoenzimáticos (Moreno, 1989), pruebas de ADN (Orozco *et al.*, 1994; Lashermes *et al.*, 1996), o metabolitos secundarios (Guerrero, Suárez & Moreno, 2001).

El HT ha sido utilizado como progenitor en programas de mejoramiento genético de varios países, especialmente por su resistencia a la roya. En efecto, en esta población están presentes por lo menos 5 genes de resistencia específica y además posee resistencia incompleta (Castillo & Moreno, 1986). Vale la pena mencionar que en las plantaciones comerciales de HT, en el lugar de origen, parece existir un equilibrio entre el café y la roya (Goncalves & Rodrigues, 1976). La acción conjunta de genes de resistencia específica en segregación y de genes de resistencia incompleta, probablemente es la causa de que este equilibrio se haya mantenido por varios años. Esta es la razón principal por la cual en Colombia fue escogido el HT como progenitor resistente.

Además de la resistencia a la roya, exhaustivamente comprobada, el HT posee resistencia a otra enfermedad limitante, conocida como enfermedad de los frutos del café, o CBD, causada por el hongo *Colletotrichum kahawe*. Evaluaciones de campo y pruebas de laboratorio efectuadas en Kenia y en el CIFC, en Portugal, en ejemplares del HT y en la descendencia de sus cruces con *C. arabica*, así lo indican (Vossen & Walyaro, 1981; Moreno *et al.*, 1997; Moreno, 1994; Silva *et al.*, 1998).

En el mundo se dispone de germoplasma del HT proveniente de 3 recolecciones de semilla hechas en las plantaciones de Timor, enviadas al CIFC, Portugal, a partir de 1955, y difundidas por ese centro, principalmente a la América. A Colombia fue introducido a partir de 1961 y actualmente existen materiales derivados de las 3 recolecciones mencionadas. Árboles provenientes de estas recolecciones han sido seleccionados en Colombia y se están utilizando en el programa de hibridación (Moreno & Castillo, 1979).

El método de mejoramiento utilizado

El método de mejoramiento que se escogió (figura 1) es acorde con la condición semiperenne del cultivo del café y con la introducción y mantenimiento de diversidad genética respecto a la resistencia a la roya.



Figura 1. Esquema de mejoramiento seguido para la obtención de la variedad COLOMBIA.

En este método, la duración del ciclo de selección es un aspecto importante a considerar. En la caficultura tecnificada es necesario renovar las plantas (soqueo) cada cinco cosechas. Los brotes emitidos por las plantas después de cada soqueo dan origen a nuevas zonas vegetativas, en las que se forman las futuras cosechas, estableciéndose así ciclos que obligan a que la selección se limite a solo uno de estos. Sin embargo, para acortar la duración de este ciclo, la selección se hace con base en las primeras tres cosechas, ya que la producción obtenida en estas, guarda relación con la producción total de las cinco cosechas que conforman el ciclo. Para no afectar la eficiencia de la selección que se produce al reducir el número de cosechas, es necesario utilizar poblaciones experimentales de tamaño relativamente grande, con lo cual se pretende dar oportunidad a que ocurran las recombinaciones positivas.

En el programa realizado se parte de cruzamientos entre la variedad Caturra y ejemplares del HT. Como la resistencia a la roya y el porte bajo de las plantas se heredan en forma dominante, todas las plantas de la primera generación (F1) son de porte reducido y resistentes a la roya. Las generaciones siguientes se obtienen por autofecundación y en ellas se seleccionan, dentro de la población segregante, las plantas que recombinan las características tenidas en cuenta en el programa.

De la generación F2 en adelante se selecciona por vigor vegetativo, arquitectura de las plantas, calidad de las semillas y resistencia a la roya. Hasta 1994 esta resistencia se determinaba en el CIFC, de Portugal, por medio de pruebas de progenie. De ese año en adelante la resistencia se evalúa en Colombia con las razas prevalentes en

el país. De la generación F3 en adelante se mide la producción y la adaptabilidad. La calidad de la bebida se estudia en las progenies de generación más avanzada, mediante pruebas efectuadas por paneles de catación, nacionales e internacionales.

Para la selección de materiales con posibilidades de ser usados comercialmente se establecieron los siguientes requisitos mínimos:

- Poseer una o varias combinaciones de resistencia completa a la roya, y resistencia incompleta.
- Porte bajo y fenotipo compatible en mezclas.
- Producción y adaptabilidad similares o superiores a Caturra.
- Atributos de grano y calidad en taza similares o superiores a los de las variedades de *C. arabica*.
- Incidencia de otras enfermedades no mayor a la observada en variedades tradicionales.

Los primeros materiales con los requisitos mínimos mencionados se obtuvieron en la generación F5. Las progenies sobresalientes de esta generación se propagan en parcelas separadas y su semilla se mezcla para formar con ellas una variedad de tipo “compuesto”, denominada Variedad COLOMBIA, que comenzó a ser distribuida a los caficultores en 1982 (Castillo & Moreno, 1986).

La VARIEDAD COLOMBIA: qué es y cuál ha sido su comportamiento después de 20 años de cultivo

“Colombia” es una variedad “compuesta”, formada al mezclar la semilla de las progenies más sobresalientes, seleccionadas en un proceso cumplido durante varias generaciones. La naturaleza “compuesta” de esta variedad permite modificar su conformación, cambiando sus componentes, cuando sea necesario. Los cambios en la estructura de la variedad han permitido contrarrestar el efecto causado por la aparición de nuevas razas de roya, manteniendo “actualizada” la resistencia a esta enfermedad. Como resultado, nuevos componentes han sido obtenidos, mejorando las características inicialmente conseguidas. (Moreno & Alvarado, 2000).

Hasta el momento se han evaluado cerca de 3.000 progenies, de las cuales se preseleccionaron 403 para hacer parte del programa de posibles componentes de la Variedad Colombia. Los materiales preseleccionados se estudiaban simultáneamente en experimentos instalados en siete localidades representativas de la región cafetera, cuya

información permitió identificar los primeros componentes, de los cuales se obtuvo la semilla para conformar la mezcla distribuida a los caficultores. Los componentes actuales son 41 progenies F5 y F6, que representan el 10.2% de los preseleccionados. La selección a que han sido sometidos es estricta y las características más sobresalientes de su mezcla se presentan en la **tabla 1**, comparadas con las correspondientes en la variedad Caturra.

Fenotipo

En el fenotipo de las plantas intervienen factores como su altura, vigor vegetativo, diámetro de la copa de los árboles, tamaño, forma y color de las hojas, longitud, curvatura y ángulo de inserción de las ramas y similitud general con la variedad Caturra, características que se evalúan cada seis meses.

Los materiales seleccionados son homocigóticos para el porte bajo (Ct Ct), pero entre ellos existen pequeñas variaciones en altura, al parecer controladas poligénicamente. Estas variaciones no afectan sustancialmente la homogeneidad de la plantación, pues son similares, en magnitud, a las observadas en la variedad Caturra por causas ambientales. Poseen abundante ramificación, follaje, vigor y alta similitud con Caturra. La heterogeneidad fenotípica que presentan es compatible con una mezcla de ellos y no afecta ningún carácter de importancia económica (**Castillo & Moreno, 1986**).

Los frutos en el café pueden ser de color amarillo o rojo, característica gobernada por un par de alelos (Xa Xa) con dominancia incompleta. El color rojo facilita que los frutos puedan ser recolectados en el momento apropiado de la maduración, razón por la cual todos los actuales componentes tienen frutos de este color.

Características agronómicas

Las producciones anotadas en la tabla 1 corresponden al promedio de numerosos experimentos en varios sitios, en los que la variedad Caturra se protege con fungicidas para el control de la roya, mientras la variedad Colombia no. Como resultado de la selección, los componentes actuales de esta variedad tienen producciones altas en todos los sitios, superiores a las de los componentes iniciales en más del 37% y a la de Caturra en 15%.

Las semillas vacías y los granos de forma “caracol” son defectos importantes que afectan la producción y son debidos a factores hereditarios y ambientales, lo cual hace que todas las variedades presenten alguna proporción de ellos. En la variedad Colombia los defectos se han podido disminuir prácticamente al mínimo posible.

Existe tolerancia para el tamaño del grano en los mercados internacionales, pero son preferidos los cafés de grano grande. En esta característica se ha conseguido uno de los avances más importantes en la selección, comoquiera que los actuales componentes de la variedad Colombia superan a los iniciales en más del 57% y a la variedad Caturra en 36%. Actualmente Colombia es la variedad con grano más grande entre todas las disponibles en el mercado.

Resistencia a la roya

El origen y la conformación de la variedad Colombia han favorecido la existencia y mantenimiento de una importante diversidad genética para la resistencia, que es de naturaleza diferente, como se aprecia a continuación.

Tabla 1. Características agronómicas principales de las variedades Colombia y Caturra.

Característica	Var. Colombia		V. Caturra (2)
	Inicio 1980	Actual 2003	
Nº de constituyentes	23 fruto rojo 27 fruto. amarillo	41 fruto rojo	
Producción (Kg cps/Ha-año) (1)	5750	7890	5780 (1980) 6880 (2003)
Semillas vacías (%)	4.4	4.0	4.0
Granos caracol (%)	11.2	7.0	8.7
Tamaño grano (% café supremo) (3)	52.8	83.0	61.0
Nº componentes con resistencia incompleta.	31 (70 %)	35 (85.4 %)	

(1) Producción en Kg. de café pergamino seco por Ha-año.

(2) Con control químico.

(3) Café supremo = El café retenido en una zaranda con orificios de 17/64 de pulgada.

i) *Resistencia específica*. En la variedad Colombia están presentes por lo menos 5 genes de resistencia específica, provenientes del HT, el progenitor resistente (**Castillo & Moreno**, 1986). Al segregar, estos genes (Sh6, Sh7, Sh8, Sh9, Sh10) dan origen en la descendencia a 32 combinaciones genotípicas, cada una constituyendo un genotipo de resistencia diferente. Como el complejo café - roya se rige por la hipótesis gen a gen de Flor, para anular esas combinaciones de resistencia se necesitaría de igual número de combinaciones de virulencia en el patógeno. La presencia de una raza compleja que anule cualquier combinación de genes de resistencia, es probable, aunque poco frecuente en la naturaleza (**Rodríguez & Moreno**, 2002).

ii) *Resistencia incompleta*. Desde 1988 se inició la búsqueda de resistencia incompleta en más de 450 progenies con síntomas de la enfermedad (**Castillo & Alvarado**, 1997). En cerca del 70% de estas se encontró resistencia incompleta (**Cortina & Alvarado**, 1994). Las diferencias entre genotipos resistentes y susceptibles son muy notables: en los susceptibles, el progreso de la enfermedad es muy rápido y coincide con el desarrollo de los frutos y con la emisión de nuevas ramas. En los resistentes, la enfermedad inicia su desarrollo con más de cuatro meses de retraso, lo cual significa que el crecimiento y desarrollo de frutos y ramas ocurre en ausencia de enfermedad, o con niveles muy bajos de esta. Este comportamiento le permite a las progenies resistentes no sólo llenar sus frutos, sino emitir un vigoroso crecimiento vegetativo sobre el cual se desarrollarán las cosechas siguientes.

La estimación del efecto de la roya sobre la producción se hace comparándola en parcelas con y sin control químico de la enfermedad. Los resultados mostraron que en los genotipos resistentes su producción es igual en presencia o en ausencia de la roya; en tanto que en los susceptibles ocurren pérdidas que pueden llegar al 25% en el acumulado de 4 cosechas, lo que equivale a la pérdida de una cosecha cada cuatro. El 85% de los actuales componentes de la variedad Colombia poseen resistencia incompleta (**Moreno & Alvarado**, 2000).

Cómo opera la diversidad genética en la variedad Colombia

En una plantación de Variedad Colombia compuesta por plantas con resistencia completa y por plantas susceptibles, pero con diferentes niveles de resistencia incompleta, están operando varios mecanismos de protección (**Moreno & Alvarado**, 2000). El ejemplo siguiente ilustra esta situación.

Se trata de un ensayo con 30 progenies F4 de Caturra x Híbrido de Timor, parentales de los primeros componentes de la Variedad Colombia, sembrado en 1977 y que todavía se conserva. El experimento se sembró en un diseño completamente al azar, formando una mezcla de progenies, resistentes en un comienzo, pero que con el tiempo se transformó en una mezcla de materiales resistentes y susceptibles debido a la aparición de nuevas razas. El ensayo incluye como testigos 4 variedades susceptibles.

La evolución de la enfermedad se midió con una escala creciente de 10 puntos que integra la incidencia y severidad de la enfermedad (**Eskes & Braguini**, 1981). El aspecto para destacar es la variación a través del tiempo (**figura 2**). En el grupo de testigos esta variación es muy grande, mientras que en el conjunto de progenies la variación de las medias es mucho menor, lo cual le da a este conjunto una característica de “estabilidad a través del tiempo”. Esta condición es inherente a las mezclas de numerosos componentes que se diferencian en su reacción. En mezclas de esta naturaleza la media tiende a oscilar menos, produciéndose un efecto conocido como homeostasis, amortiguador o “buffer”.

En el ecosistema natural estudiado por Browning se identifican como responsables del equilibrio hospedante-patógeno, 8 mecanismos de protección. No es lógico suponer que en un ecosistema agrícola, como la variedad Colombia, existan tantos como los encontrados en el ecosistema natural. Sin embargo, sabemos que en la Variedad Colombia están actuando la resistencia inespecífica (dilatatoria) y la específica, posiblemente los mecanismos que más contribuyen a disminuir el impacto de las epidemias. Además, es probable que también esté actuando la denominada “resistencia residual”, conferida por genes mayores ya “vencidos”, tal como lo proponen **Riley**, (1973); **Nass et al.**, (1981); **Vanderplank** (1984) y **Brodny et al.**, (1986), en el caso de varias asociaciones patógeno-hospedero, y **Varzea & Rodrigues**, (1985), en el caso del café y la roya.

La elección del Híbrido de Timor como progenitor resistente, y la estrategia de mejoramiento utilizada, son la causa de que en la variedad Colombia estén presentes en las mismas plantas, los dos tipos de resistencia mencionados. Cuando esto ocurre, los genes de resistencia específica brindan resistencia completa en ausencia de las razas compatibles, y cuando estas aparecen, la resistencia incompleta se hace visible. Esta situación es relativamente frecuente en el mejoramiento de plantas, tal como lo explica **Parlevliet**, (1993), y de hecho se está comprobando con los materiales que han hecho parte de la Variedad

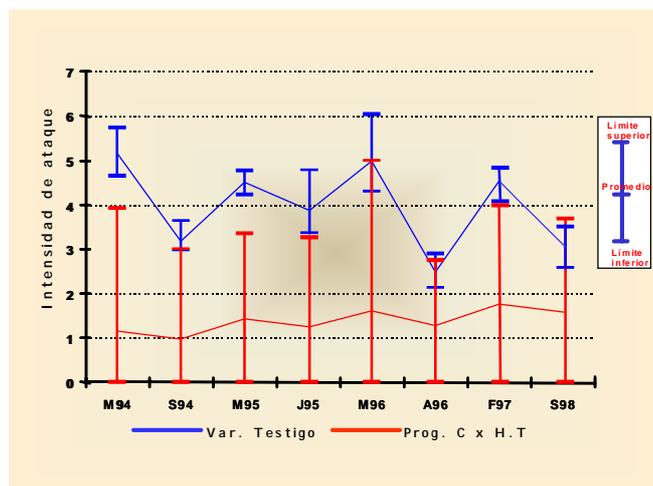


Figura 2. Evolución de la roya sobre progenies F4 de Caturra x HT y variedades testigo, durante 5 años, en Chinchiná, Caldas.

Colombia, los cuales presentaron resistencia completa durante largos períodos y ahora, en presencia de razas nuevas, exhiben niveles altos de resistencia incompleta.

Para conocer el comportamiento de la variedad Colombia en lotes comerciales, periódicamente se hacen revisiones de la incidencia y severidad de la roya en fincas de caficultores de todo el país. El último muestreo se terminó en el año 2000, en 1604 fincas, en 105 municipios de 16 departamentos (Moreno & Alvarado, 2000). Para la evaluación, en cada finca se toma al azar un lote sembrado con variedad Colombia y en este se escogen, también al azar, 100 plantas, que son calificadas con la escala de 10 puntos mencionada, en la cual:

- 0 = Resistencia completa.
- 1 – 4 = Alta resistencia incompleta (no se afecta la producción).
- 5 – 6 = Resistencia incompleta intermedia (puede afectar la producción).
- 7, 8 y 9 = Alta susceptibilidad (se disminuye la producción).

Los resultados del muestreo se presentan en la **figura 3**, e indican que la resistencia completa existente en la mayoría de la población (80.4%), acompañada de la resistencia incompleta, representada por la fracción de la población (17.2%) con bajos niveles de severidad (grados 1 a 4, en la escala 0 a 9), están brindando una protección efectiva contra la enfermedad.

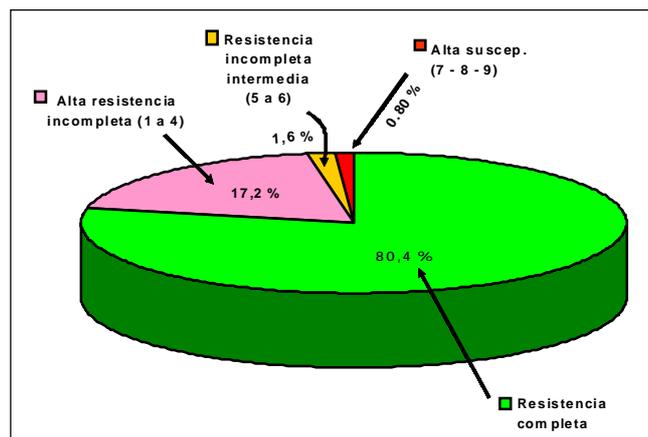


Figura 3. Incidencia y severidad de la roya en 1604 fincas de 18 departamentos en la zona cafetera nacional, en el año 2000.

Calidad de la bebida

En la generación F4 y siguientes se evalúa la calidad de la bebida en los materiales más sobresalientes, empleando paneles de catación nacionales e internacionales, de reconocida experiencia. En estas pruebas se evalúa la acidez, el cuerpo y el aroma de la bebida y se determina la presencia de olores y sabores extraños. Un ejemplo de los resultados de estas evaluaciones se muestra en la **tabla 2** que incluye una prueba hecha a los actuales componentes de la variedad Colombia y a tres variedades comerciales, por paneles de Estados Unidos, Canadá, Inglaterra y Colombia (Moreno, Moreno & Cadena, 1996). Aunque cada panel utiliza su propia metodología, el resultado general es que la taza de todas las cuatro variedades se considera como café suave de muy buena calidad. La variedad Colombia y Típica corresponden a cafés suaves con buen cuerpo y acidez aceptables. Caturra mostró alta acidez (cítrica), mientras que Borbón presentó una bebida calificada como limpia. Uno de los paneles sugirió utilizar las diferencias encontradas entre variedades para satisfacer las exigencias de mercados especiales de acuerdo con las preferencias de los consumidores. Las variedades Colombia, Caturra y Típica fueron sugeridas para mercados muy exigentes, como el alemán o el inglés, en tanto que Borbon se recomendó para mercados menos exigentes.

Recombinación de la resistencia a la roya y a la enfermedad de los frutos

Existe otra enfermedad potencialmente tan severa como la roya de la hoja: la enfermedad de los frutos del café, mejor conocida como CBD (Coffee Berry Disease).

Tabla 2. Características organolépticas de cuatro variedades de café evaluadas por cuatro paneles internacionales.

Variedad	Caract.	Paneles			
		USA. (1)	Canadá (2)	Inglaterra (2)	Colombia (1)
Colombia	Acidez	Verdosa	Medio		Med-alta
	Cuerpo	Alto	Medio	Completo	Medio
	Aroma				Aromático
	Otro		Sabor típico (7.0)	Buena calidad (0.1)	Sabor balanc.
Caturra	Acidez	Equilibrada	Med-alta	Algo verdosa	Muy alta
	Cuerpo	Medio	Medio		Alto
	Aroma				Frutal
	Otro		Sabor dulzón (8.0)	Buena calidad (0.1)	Sabor cítrico
Borbón	Acidez	Equilibrada	Baja	Satisfactoria	Med-alta
	Cuerpo	Medio		Carente	Alto
	Aroma				Herbal
	Otro		Tostión pobre (6.0)	Dureza (0.1 bord.)	Sabor cítrico
Típica	Acidez	Verdosa	Mediana		Med-alta
	Cuerpo	Alto	Medio		Alto
	Aroma				Aromático
	Otro		Sabor típico (7.0)	Buena calidad (0.1)	Acidez agresiva

Sistema de evaluación:

(1) Paneles USA y Colombia = Sistema descriptivo.

(2) Paneles Canadá e Inglaterra = Calificación hedónica: 8 y 7 :

Estándar; < 5 inaceptable

01 : café arábigo lavado, sin defectos.

01 borderline. : Sin defectos, pero sin ser óptimo.

02 : Con algún defecto.

03 : Indeseable.

Esta enfermedad, ocasionada por el hongo *Colletotrichum kahawe*, afecta la cantidad y la calidad de los frutos. Por el momento se encuentra confinada al continente africano, pero es posible que haga su aparición en Colombia, tal como ocurrió con la roya.

Ante esta eventualidad, una alternativa muy favorable es recombinar en una misma variedad, la resistencia a la roya y al CBD, las dos enfermedades más importantes del café. (Moreno, 1994; Moreno *et al.*, 1997)

Para cumplir con este propósito, desde hace algunos años se comenzó un programa de mejoramiento, iniciado con la realización en el exterior de evaluaciones por resistencia al CBD en germoplasma de origen colombiano.

Pruebas efectuadas inicialmente en Kenia, en condiciones de campo, indicaron que en algunas progenies F3 del cruzamiento de Caturra x Híbrido de Timor, precursoras de la variedad Colombia, existía resistencia al CBD (Vossen & Walyaro, 1981). Esas progenies también poseían resistencia a la roya, lo cual sugirió que es posible la selección de genotipos que recombinen la resistencia contra estas dos enfermedades.

Posteriormente, gracias a un convenio con el CIFC de Portugal, se comenzó a evaluar material colombiano por

resistencia a los aislamientos más virulentos de *Colletotrichum*, mantenidos en la colección de ese Centro. La prueba de la resistencia en invernadero es indirecta, porque se mide por medio de inoculaciones en los hipocotilos de plántulas de 90 días de edad. La prueba se fundamenta en que existe asociación entre la respuesta obtenida al inocular los hipocotilos y la que posteriormente presentan los frutos de las plántulas (Vossen *et al.*, 1977).

Para las pruebas en el CIFC se ha dado prioridad a los materiales que hacen parte del programa de posibles componentes de la variedad Colombia. Como se aprecia en la **tabla 3**, en varios de ellos existe resistencia a algunos de los aislamientos más patogénicos de varios países (Moreno *et al.*, 1997).

La comprobación de la resistencia en campo, se está haciendo ahora en Zimbabwe, país de donde proviene uno de los aislamientos usados en el CIFC. De confirmarse la resistencia al CBD, se habría recombinado la resistencia a las dos enfermedades más limitativas del café, resultado debido a la acertada selección del Híbrido de Timor como recurso genético y al esquema de mejoramiento empleado, el cual permite disponer de una cantidad adecuada de materiales promisorios, para que la recombinación tenga oportunidad.

Tabla 3. Resultados de las pruebas de preselección por resistencia al CBD hechas en el CIFC, Portugal, en progenies de los 41 componentes actuales de la variedad Colombia.

	Cant.	%
Componentes con resistencia a 4 aislamientos (*)	0	0
Componentes con resistencia a 3 aislamientos	8	19.5
Componentes con resistencia a 2 aislamientos	7	17.1
Componentes con resistencia a 1 aislamientos	7	17.1
Componentes susceptibles	15	36.6
Componentes probados	37	90
Componentes sin probar	4	10.0

(*) Aislamientos de Camerún, Kenia, Malawi y Zimbabwe.

Variedades mejoradas para otros ambientes de la región cafetera colombiana

En algunas regiones del país con condiciones climáticas particulares, tales como veranos prolongados, distribución inadecuada de la lluvia y alto brillo solar, existen pequeñas propiedades en las que se practica una caficultura poco tecnificada, caracterizada por el uso de variedades de porte alto, densidades de siembra bajas, empleo de sombrío o semi-sombrío y aplicaciones bajas de fertilizantes. El área cultivada en estas regiones es de 240.000 ha., que representan el 30% de la superficie cultivada con café en el país. La producción media obtenida en estas condiciones varía entre 40 y 50 @ de café pergamino seco por hectárea y año, equivalente a la mitad del promedio nacional (**Federacafé**, 1997).

En estas regiones se cultivan principalmente las variedades Borbón y Típica, que como se mencionó, producen una excelente calidad de la bebida, pero son altamente susceptibles a la roya. La variedad Típica posee granos de tamaño grande, pero su producción es relativamente

baja. Al contrario, la variedad Borbón produce, en promedio, 30% más que Típica, pero sus granos son pequeños (**Castillo & Moreno**, 1986).

En la década de los 70 se inició en CENICAFÉ un programa para desarrollar variedades de porte alto, con resistencia a la roya, que pudieran constituirse en alternativa para los caficultores de regiones como las mencionadas. Desde esa época se pensó también en utilizar como estrategia de mejoramiento la diversidad genética, utilizando un programa de hibridación seguido de selección durante varias generaciones. Para ello, se efectuaron cruzamientos entre plantas de las variedades Típica y Borbón y ejemplares del Híbrido de Timor.

Las progenies más avanzadas pertenecen a la quinta y sexta generaciones de estos cruces (F5 y F6), dentro de las cuales se han identificado varias con atributos muy sobresalientes que justifican su utilización como nuevas variedades mejoradas. Progenies de estas generaciones se evaluaron en experimentos localizados en el Huila, Santander del Sur, Valle y Cesar, en los que se utilizaron como testigos las variedades Típica y Borbón, con y sin aplicaciones de fungicidas para el control de la roya. A continuación se presenta un resumen de las principales características de estas progenies.

Fenotipo. Las progenies híbridas son de porte alto y presentan un vigor vegetativo excelente. Tomando como referencia el crecimiento de la variedad Típica (100%), las progenies superan a esta variedad en altura y ancho de las plantas, en 7% y 8%, respectivamente.

Producción. Comparadas con las producciones obtenidas tradicionalmente en las cuatro localidades (50 a 60@ de cps/Ha-año), las progenies han mostrado una capacidad de producción notablemente alta, que estuvo entre 272 y 169@ de cps/Ha-año. Como se aprecia en la **tabla 4**

Tabla 4. Agrupación de progenies de porte alto resistentes a la roya, evaluadas en 4 localidades, según su producción relativa al mejor testigo.

Localidad	Progenies probadas		Progenies con producción relativa al mejor testigo	
	(1)	(2)	(3)	
Huila	25	0	21	4
Santander	25	0	18	7
Valle	19	3	16	0
Cesar	13	0	5	8
(Total)	82	3	60	19
(%) 100	3.6	73.2	23.1	

(1) = Cantidad de progenies con producción estadísticamente inferior (P = 95%) al mejor testigo (con control químico).

(2) = Cantidad de progenies con producción estadísticamente igual (P = 95%) al mejor testigo (con control químico).

(3) = Cantidad de progenies con producción estadísticamente superior (P = 95%) al mejor testigo (con control químico)

la mayoría de las progenies (73.2%) tuvo una producción estadísticamente igual al mejor testigo protegido con control químico. Una parte importante de las progenies (23.1%) superó estadísticamente a este, mientras que solo el 3.6% de ellas fue inferior al testigo.

Para la selección de las mejores progenies se tuvieron en cuenta las que superaron estadísticamente al mejor testigo con control químico y las que mostraron mayor estabilidad en la producción en los diferentes ambientes.

Características de las semillas. La selección ha sido muy estricta en las generaciones anteriores y como resultado, en las progenies los defectos se han reducido a los niveles que presentan las variedades comerciales. En el tamaño de los granos el avance debido a la selección ha sido muy importante, ya que las progenies presentan, en promedio, más de 80% de café supremo, proporción que es mayor respecto a Típica, considerada como la variedad tradicional de mayor tamaño en sus semillas.

Resistencia a la roya. En los cuatro sitios donde se sembraron los experimentos solo está presente la raza II de *H. vastatrix*, que ataca únicamente a las variedades tradicionales, como Típica, Borbón y Caturra. Por esta razón, las progenies se mantienen resistentes, mientras que las variedades testigo han presentado ataques muy severos en algunos años, como se aprecia en la **figura 4**. Es muy probable que cuando aparezcan nuevas razas del patógeno, las progenies presenten bajos niveles de daño, como resultado de la resistencia incompleta heredada del Híbrido de Timor.

Calidad de la bebida. En diferentes ocasiones el panel de catación de CENICAFÉ ha evaluado la calidad de

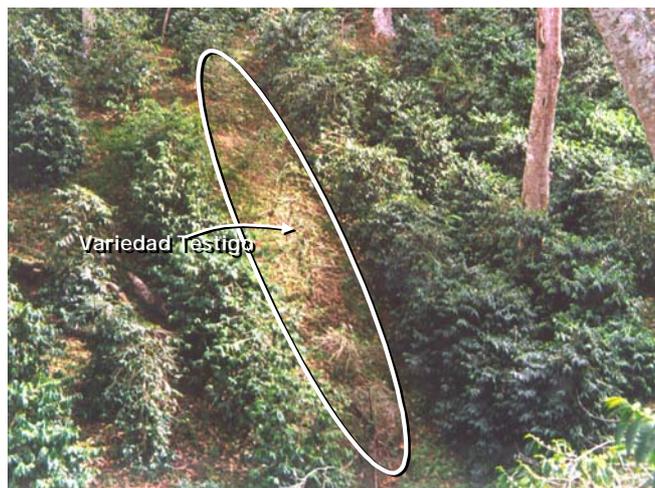


Figura 4. Efecto de la roya en progenies de porte alto resistentes a la enfermedad y en variedades testigo.

la bebida de las progenies de porte alto resistentes a la roya. En 1992 se probaron los materiales que dieron origen a las progenies evaluadas en los cuatro ambientes mencionados y posteriormente, en el año 2000 se analizaron muestras recolectadas en plantaciones de agricultores que tenían las generaciones más avanzadas en la selección. Los resultados son los siguientes:

i) Calidad en taza de progenies F4.

Al usar técnicas de análisis multivariado para evaluar las variables que miden la calidad de la bebida, las progenies y las variedades tradicionalmente usadas en Colombia formaron un grupo estadísticamente homogéneo, lo cual significa que sus atributos de calidad en taza son iguales. Algunas progenies recibieron las más altas calificaciones en Impresión Global y fueron clasificadas en un grupo diferente, resultado que sugiere que sus muestras fueron las más equilibradas (Moreno, 1992).

ii) Calidad en taza de muestras provenientes de plantaciones de agricultores.

Entre los caficultores de la Sierra Nevada de Santa Marta, las progenies de porte alto se conocen como “Borbón resistente a la roya”. Muestras provenientes de lotes comerciales de estos agricultores fueron analizadas por Puerta (2000), junto con muestras de variedades tradicionales. La mayor cantidad de muestras calificadas como “excelentes” provino del “Borbón resistente a la roya”, el cual se destacó por su aroma, amargo, acidez e impresión global.

Los resultados anteriores denotan que las progenies resistentes a la roya reúnen excelentes características agronómicas y de calidad, gracias a la selección practicada por más de 25 años. Como son de porte alto pueden ser sembradas con las densidades acostumbradas con las variedades Típica y Borbón (3.000 plantas por hectárea, como máximo) y recomendados para las zonas donde predomina la caficultura considerada como “poco tecnificada”. Su excelente calidad en taza les otorga un valor agregado en el campo de los denominados “café especiales”.

La mezcla de semilla proveniente de las progenies seleccionadas asegurará una amplia diversidad respecto a los genes responsables de la resistencia a la roya, estrategia utilizada con éxito en la Variedad Colombia para procurar que la resistencia contra esta enfermedad sea durable (Moreno & Alvarado, 2000). Las mejores progenies se están propagando para suministrar a los agricultores una variedad compuesta denominada “TABI”, expresión que en el dialecto guambiano significa “bueno” (Moreno, 2002).

Conclusiones

La adecuada selección de los progenitores, la puesta en práctica de una estrategia de mejoramiento capaz de atenuar el impacto de las epidemias y el uso de un método de mejoramiento acorde con las características del complejo *C. arabica* - *H. vastatrix*, constituyen las partes centrales de un programa de investigación ejecutado en Colombia durante más de 30 años, que ha conducido a la obtención de variedades mejoradas de café con resistencia durable a la roya de la hoja.

El principal resultado de este programa es la variedad Colombia, obtenida en ausencia de la enfermedad y entregada a los agricultores un año antes de que la enfermedad apareciera en el país, lo cual constituye un ejemplo de previsión y un hito en la planeación y ejecución de trabajos de investigación en el sector agrícola.

La variedad Colombia ha marcado una nueva etapa en la caficultura nacional, caracterizada por el empleo en gran escala de variedades mejoradas con resistencia a enfermedades limitativas para el cultivo. Desde su liberación han transcurrido más de 20 años, durante los cuales ha estado en permanente contacto con el patógeno en condiciones de campo. En este período la variedad Colombia se ha difundido rápidamente, hasta cubrir el 27% del área nacional cultivada, gracias a sus cualidades agronómicas y de calidad, especialmente la conservación de su resistencia, característica considerada como su principal atributo.

Para la economía del país, la variedad Colombia ha significado un importante logro. Un estudio reciente (Dunque, 2002) demostró que la adopción de esta variedad por parte de los caficultores, es un factor determinante para la reducción de los costos de producción y por ende, para la competitividad del café de Colombia. En otro estudio (Farfán, 1998), la Tasa Interna de Retorno (TIR), calculada para la inversión en la investigación que condujo a la obtención de la variedad Colombia, varió entre el 21 y el 32%, debido a la economía que representa el no tener que usar control químico contra la roya en las áreas donde esta variedad está sembrada. Se calcula que la economía por este concepto es del orden de US\$ 100 millones de dólares por año, suma que sugiere que la investigación es más una inversión que un costo.

El esquema de diversidad genética adoptado en la **variedad Colombia**, también ha sido útil para desarrollar otras variedades mejoradas, con resistencia a la roya, como la **variedad TABI**, recomendada para ambientes con condiciones de cultivo diferentes a las establecidas para la variedad Colombia. Esto significa que se dispone de va-

riedades mejoradas, aptas para la mayor parte de la zona cafetera del país.

Finalmente, vale la pena mencionar que en revisiones de literatura recientes, hechas por reconocidos investigadores, (Mundt, 2002), se comienza a citar el trabajo desarrollado con la Variedad Colombia, como un importante ejemplo digno de ser tenido en cuenta en el campo del manejo de enfermedades por medio de resistencia genética. La opinión del Profesor J. Artie Browning, inspirador de la estrategia de mejoramiento basada en la diversidad genética, utilizada en este trabajo, confirma esta apreciación:

... “La Variedad Colombia es la pieza central de un sistema único e integral de manejo de genes y producción de cultivos, que incluye un sistema completo de aumento y distribución de la semilla y un protocolo para la producción de plántulas y su manejo en el campo. Además, parece ser el mejor ejemplo, hasta la fecha, de que la teoría unificada de la protección genética de poblaciones de plantas cultivadas, contra enfermedades, mediante el uso de resistencia dilatoria y de estructuras espaciogénicas al azar, es aplicable al manejo de agroecosistemas y consistente con la protección de ecosistemas naturales. Su funcionamiento contra la roya del café merece ser seguido cuidadosamente por todos los expertos en la protección de plantas y en las ciencias de la producción, pero especialmente por los responsables de los cultivos perennes” (Browning, 2003).

Bibliografía

- Borlaug, N. E.** 1964. Basic concepts which influence the choice of methods for use in breeding for disease resistance in cross-pollinated and self-pollinated crop plants. In NATO/NSF Advance. Symposium held the Pennsylvania State University. Proceedings. August 30-September 11. pp. 327-348.
- Brodny U., R. R. Nelson & L. V. Gregory** 1986. The residual and interactive expressions of “defeated” wheat stem rust resistance genes. *Phytopathology* **76**: 546-549.
- Browning J. A.** 2003. “A perennial crop: coffee”. In *Disease Resistance from Progenitors and Other Wild Relatives*. In press.
- _____. 1974 a. Relevance of knowledge about natural ecosystems development of pest management programs for agroecosystem. *Proc. Am. Phytopathol. Soc.* **1**, 191-199.
- _____. 1974 b. Diversity: the only assurance against genetic vulnerability to disease in major crops. In: *Central States Forest Tree Improvement Conference, 9a*. Ames, Iowa State University, (EE. UU.). pp 1-23.
- Browning J. A. & K. J. Frey** 1969. Multiline cultivars as a means of disease control. *Annual Review of Phytopathology*, **7**: 355-382.

- Carvalho A. & L. C. Monaco.** 1969. The breeding of arabica coffee. In Outline of perennial crop breeding in the tropic. Ferwerda, F. P., Wit F. eds: 198-216.
- Castillo Z. J. & A. G. Alvarado.** 1997. Resistencia incompleta de genotipos de café a la roya bajo condiciones de campo en la región central de Colombia. *Cenicafé* **48** (1): 40-58.
- Castillo Z. J. & G. Moreno R.** 1986. La variedad Colombia: Selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del cafeto. Manizales, Centro Nacional de Investigaciones de Café. 169 p. (Premio Nacional de Ciencias "Fundación Alejandro Ángel Escobar", 1986).
- _____. 1985. 40 Años de Investigación en Cenicafé. Mejoramiento del Cafeto. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Chinchiná. pp. 1-27.
- Castillo Z. J., G. Moreno R. & D. S. López.** 1976. Uso de resistencia genética a *Hemileia vastatrix Berk & Br.* existente en germoplasma de café en Colombia. *Cenicafé* **27** (1): 3-25.
- Castillo Z. J.** 1972. Plan de trabajo sobre resistencia a la roya del cafeto. Chinchiná, (Colombia), Cenicafé, Oficio N° 001363, Marzo 27 de 1972, pp. 1-44.
- Cortina G. H. & A. G. Alvarado.** 1994. Análisis de datos provenientes de escalas de campo para seleccionar por resistencia incompleta: el caso café – roya (*Hemileia vastatrix*). *Fitopatología colombiana*. **18** (2): 78-82.
- Duque O. H.** 2002. Cómo reducir los costos de producción en la finca cafetera. Chinchiná. Cenicafé, pp. 1-85.
- Eskes A. B. & M. Toma-Braghini.** 1981. Métodos de evaluación de la resistencia contra la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix Berk et Br.*). *Boletín Fitosanitario FAO, Roma (Italia)*. **29** (3/4): 56-66.
- Farfán C. M. I.** 1998. Impacto económico de la investigación en café en Colombia; el caso de la variedad Colombia. *Ensayos sobre economía cafetera* **2** (14): 21-41.
- Federacafé.** 2001 Estudios especiales. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. In: El café en la encrucijada. Diego Pizano, Eds Alfaomega. pp. 1-80.
- Federacafé.** 1997. Sistema de Información Cafetera. Encuesta Nacional Cafetera. Informe Final. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Santafé de Bogotá. pp. 1-178.
- Flor H. H.** 1956. The complementary genetic system in flax and flax rust. *Advances in Genetics*. **8**: 29-54.
- Goncalves M. M. & M. L. Rodrigues.** 1976. Estudos sobre o café de Timor. II. Nota sobre as possibilidades de producao do Híbrido de Timor no seu habitat natural. Lisboa (Portugal). Missao de Estudos Agronomicos do Ultramar (Portugal). Comunicacoes N° 86: 31-72.
- Guerrero G., M. Suárez & G. Moreno R.** 2002. Chlorogenic acids as a potential criterion in coffee genotype selections. *J. Agric. Food Chem.* **49**: 2454-2458.
- Krug C. A., Mendes J. E. T. & Carvalho A.** 1949. Taxonomía de *Coffea arabica* L. II. *Coffea arabica* L. Var. Caturra e sua forma Xanthocarpa. *BRAGANTIA*. **9** (9-12): 157-163.
- Lashermes P., J. Cros, M. C. Combes, P. Trouslot, F. Anthony, S. Hamon & A. Charrier.** 1996. Inheritance and restriction fragment length polymorphism of chloroplast DNA in the genus *Coffea* L. *Theor. Appl. Genet.* **93**: 626-632.
- Marshall D. R.** 1977. The advantages and hazards of genetic homogeneity. *Annals of New York Academy of Sciences*. **287**: 1-20.
- Moreno R. G.** 2002. Tabi: Nueva variedad de café de porte alto resistente a la roya del cafeto. *Cenicafé* **53** (2): 132-143.
- Moreno R. G. & A. G. Alvarado.** 2000. La variedad Colombia: Veinte años de adopción y comportamiento frente a nuevas razas de la roya del cafeto. *Cenicafé. Boletín Técnico* (22): 1-32.
- Moreno R., G., G. H. Cortina, B. P. Moncada, V. M. Varzea & C. J. Rodrigues Jr.** 1997. Selección de germoplasma de café resistente a *Colletotrichum kahawae* mediante pruebas de laboratorio. V Congreso Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos. *Memorias*. p. 125.
- Moreno R., G., G. E. Moreno & G. G. Cadena.** 1996. Bean characteristics and cup quality of the Colombian Variety /Coffea arabica/ as judged by international tasting panels. In: COLLOQUE Scientifique International sur le Café., 16. Kyoto (Japan), Avril 9-14, París (Francia), ASIC, 1996. p. 574-583.
- Moreno R. G.** 1994. Contribución del mejoramiento genético al desarrollo de la caficultura colombiana. *INNOVACIÓN Y CIENCIA*. **3** (2): 1-6.
- Moreno R. G.** 1992. Estudio de la calidad de la bebida en progenies derivadas de cruzamientos entre el Híbrido de Timor y variedades de porte alto. Informe anual de labores de la Disciplina Mejoramiento Genético y Biotecnología. Cenicafé, Chinchiná.
- Moreno R. G.** 1989. Etude du polymorphisme de l'hybride de Timor en vue de l'amélioration du caffiéire Arabica: Variabilité enzymatique et agronomique dans les populations d'origine; resistance incomplète á *Hemileia vastatrix Berk & Br.* dans les croisements avec *Coffea arabica*. Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier (France). (Thèse Docteur – Ingénieur) 153 p.
- Moreno R. G. & Z. J. Castillo.** 1979. Germoplasma existente en la colección colombiana de café e información disponible sobre algunas de sus características. Cenicafé, Chinchiná. Anexos (Mecanografiado).
- Moreno R. G.** 1974. Informe de estudios en el Brasil sobre mejoramiento genético del café. Cenicafé, Chinchiná, pp. 1-41.
- Mundt C. C.** 2002. Use of Multiline Cultivars and Cultivar Mixtures for Disease Management. *Annu. Rev. Phytopathol.* **40**: 381-410.
- Nass H. A., W. L. Pedersen, D. R. MacKenzie & R. R. Nelson.** 1981. The residual effects of some "defeated" powdery mildew resistance genes in isolines of Chancellor winter wheat. *Phytopathology* **71**: 1315-1318.
- National Academy of Sciences.** 1972. Genetic vulnerability of major crops. Washington, D. C. National Academy of Sciences. 307 p.
- Orozco C. C., K. J. Chalmers, R. Waugh & W. Powell.** 1994. Detection of genetic diversity and selective gene introgression in coffee using RAPD markers. *Theor. Appl. Genet.* **87**: 934-940.

- Parlevliet J. E.** 1993. What is durable resistance, a general outline. In: Durability of disease resistance. Edited by Th. Jacobs and J. E. Parlevliet. Kluwer Academic Publishers. pp. 23-39.
- Puerta Q. G. I.** 2000. Calidad de café procedente de la Sierra Nevada de Santa Marta. Cenicafé, Chinchiná, (Informe Interno).
- Rayner R. W.** 1961. Spore liberation and dispersal of coffee rust *Hemileia vastatrix* Berk et Br. *Nature* **191**(4789): 725.
- Riley R.** 1973. Genetic changes in host and the significance of disease. *Annals of applied Biology*. **75**: 128-132.
- Rivillas O. C. A., J. E. Leguizamón C. & L. F. Gil V.** 1999. Recomendaciones para el manejo de la roya del cafeto en Colombia. Cenicafé, Chinchiná. Boletín Técnico N° 19. 36 p.
- Rodrigues-Jr. C. J., A. J. Bettencourt & L. Rijo.** 1975. Races of the pathogen and resistance of coffee rust. *Annual review of phytopathology* **13**: 49-70.
- Rodríguez M. K. & G. Moreno R.** 2002. Supervivencia relativa de las razas II XXII de *Hemileia vastatrix*. *Cenicafé*, **53** (3): 252-265.
- Silva, M. C., V. M. Varzea, L. Rijo, C. J. Rodrigues Jr, & L.G. Moreno R.** 1998. Cytologic studies in Híbrido de Timor derivatives with resistance to *Colletotrichum kahawae*. Reuniao da sociedade de fitopatologia portuguesa, Lisboa (Portugal).
- Simmons M. D.** 1972. Polygenic resistance to plant disease and its use in breeding resistant cultivars. *Journal of Environmental Quality*. **1** (3): 232-245.
- Vanderplank, J. E.** 1984. Disease resistance in plants. Academic press, inc. Second edition. pp. 57-81.
- Varzea V. M. P. & C. J. Rodrigues-Jr.** 1985. Evaluation of the level of horizontal resistance to *Hemileia vastatrix* of some Arabica plants of different physiologic groups when confronted with virulent races. 11ème Colloque Scientifique International sur le café, Lomé 11-15 février 1985. pp. 625-633.
- Vossen van der, H. A. M. & D. J. Walyaro.** 1981. The coffee breeding program in Kenya.: A review of progress made since 1971 and plan of action for the coming years. *Kenya Coffee* **46** (541): 113-130.
- Vossen van der, H. A. M., R. T. A. Cook & G. N. W. Murakaru.** 1977. Breeding for resistance to coffee berry disease caused by *Colletotrichum coffeanum* Noack (sensu Hindorf) in *Coffea arabica* L. I. Methods of preselection for resistance. *Kenya Coffee* **42**: 133-144.
- Wellman F. L.** 1961. Coffee. Botany, cultivation and utilization. London, (Inglaterra), World Crops Books, 488 p.
- _____. 1952. Peligro de introducción de la *Hemileia* del café a las Américas. *Turrialba* (Costa Rica) **1** (1-4): 47-50.

LA HIDROCLIMATOLOGÍA DE COLOMBIA: UNA SÍNTESIS DESDE LA ESCALA INTER-DECADAL HASTA LA ESCALA DIURNA

por

Germán Poveda¹

Resumen

Poveda, G.: La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (107): 201-222, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se hace una revisión de la variabilidad de la hidro-climatología de Colombia, en escalas temporales que incluyen la escala interdecadal, principalmente afectada por la presencia de tendencias en las variables del clima del país, que evidencian el cambio climático. El análisis de la escala de tiempo interanual se centra en el estudio del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y la consistencia de sus efectos sobre las principales variables del ciclo hidrológico: precipitación, caudales medios y extremos de ríos, humedad de suelo y actividad vegetal. La escala de tiempo anual se centra en el análisis de la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical, asociada con la actividad de los vientos alisios del este. Se precisa la influencia del chorro del Chocó sobre el ciclo anual de la hidroclimatología de Colombia, y se cuantifica el balance anual de largo plazo de la humedad atmosférica. La dinámica de los Sistemas Convectivos de Mesoescala se presenta en relación con el ciclo anual y con la actividad del chorro del Chocó. A la escala de tiempo intra-anual se presentan las evidencias de los efectos de la oscilación de 30-60 días y de las ondas tropicales del este sobre los registros de precipitación en Colombia. A la escala de variabilidad diurna se presentan las evidencias de la alta variabilidad de la precipitación sobre los Andes tropicales.

Palabras clave: Hidroclimatología, cambio global, El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), Zona de Convergencia Intertropical, chorro del Chocó.

Abstract

This study presents a synthesis of Colombia's hydro-climatology variability in time. The range of time scales goes from the inter-decadal one to the diurnal cycle. Interdecadal timescale is affected by signals of climate change, evidenced in the presence of trends of most important climatic records. The interannual time scale is focused on the dynamics of El Niño/Southern Oscillation (ENSO) and the consistency of its effects on most relevant hydrologic variables, namely precipitation, mean and extreme river discharges, soil moisture, and vegetation activity as a surrogate for evapotranspiration.

¹ Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

The annual time scale is dominated by the meridional migration of the Intertropical Convergence Zone, associated with the circulation of the surface moisture-laden trade winds. The importance of the winds of the Chocó low-level jet is pointed out within the annual cycle and its linkages with the activity of Mesoscale Convective Systems over western Colombia. The long-term annual atmospheric water budget is quantified for Colombia. The intra-annual time scale is illustrated with the effects of the 30-60 days intra-seasonal oscillation, as well as by the influence of the tropical easterly waves over the Atlantic and Caribbean. The extreme spatial variability of the diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia is illustrated and quantified.

Key words: Climatology, Global change, El Niño/Southern Oscillation (ENSO), Intertropical Convergence Zone, Chocó low-level jet.

1. Introducción

El entendimiento de la variabilidad climática en un amplio rango de escalas espaciales y temporales es uno de los temas más relevantes en ciencias geofísicas. Las escalas espaciales incluyen la escala planetaria, continental, regional, local y puntual. El clima varía de un año, una década o un milenio a otro. Las escalas temporales abarcan desde la escala paleo-climática (millones de años) hasta la escala de la turbulencia atmosférica de la capa límite, pasando por las escalas milenial, secular, decadal, interanual, anual, intra-anual, y diurna. La naturaleza compleja de esta variabilidad dificulta la identificación de los cambios globales inducidos por la acción humana. Hay tres tipos de fenómenos involucrados en la variabilidad climática: (i) Variaciones causadas por forzamientos externos periódicos, tales como los ciclos anual y diurno de insolación, son aparentemente los más fáciles de entender y predecir, y están asociados a la translación de la Tierra alrededor del Sol y a la rotación alrededor de su eje, respectivamente. En escalas de tiempo mayores, la variabilidad de los parámetros astronómicos de la relación Tierra-Sol produce múltiples ciclicidades o cuasi-periodicidades, como en la teoría de los ciclos de Milankovich que explican los cuasi-períodos de 100.000 años presentes durante el Pleistoceno tardío. (ii) Variaciones debidas a la interacción no lineal y efectos de retro-alimentación dentro de los distintos sub-sistemas del sistema climático terrestre. Estos dan lugar a oscilaciones climáticas auto-reguladas, las cuales son mucho más difíciles de entender y predecir que las anteriores, dado que las no linealidades inducen comportamientos altamente complejos y aun de naturaleza caótica. Los mejores ejemplos de este tipo de mecanismos de retroalimentación son (Barry & Carleton, 2001): temperatura y vapor de agua, hielo-nieve y albedo planetario, las retroalimentaciones positivas y negativas asociados con el doble papel de enfriamiento y calentamiento que juegan las nubes, y la retroalimentación debida a la biosfera, ejemplificada en la teoría Gaia (Lovelock, 2000). (iii) Variaciones asociadas con fluctuaciones aleatorias en los factores físicos o químicos, las cuales son las más difi-

les de predecir en cualquier escala de tiempo. Estas pueden ser externas (erupciones volcánicas, meteoritos) o internas del sistema climático (tiempo atmosférico de corto plazo). Esta alta complejidad del clima en distintas escalas temporales se conjuga la variabilidad en distintas escalas espaciales, las cuales invocan inmediatamente la complejidad de la geografía terrestre.

Colombia está situada en el trópico Americano, “*como una isla entre tres océanos*” (Snow, 1976), si se piensa que además del Caribe y del Pacífico, Colombia recibe la influencia de la circulación atmosférica de la cuenca Amazónica. La presencia de la barrera orográfica que constituyen los tres ramales de la cordillera de los Andes, induce la formación de climas locales y regionales de alta complejidad y dificultad de predicción a distintas escalas de tiempo. La existencia de un “*óptimo pluviográfico*” (Oster, 1979; Mesa, Poveda & Carvajal, 1997) sobre los valles interandinos, es un rasgo característico del gradiente altitudinal de la precipitación en tal región de Colombia. Entre los Andes y la cuenca Amazónica existe una retroalimentación positiva, ya que los vientos alisios del sureste transportan gran cantidad de humedad hacia los Andes, la cual contribuye a la precipitación sobre el pie de monte Andino, y ésta a su vez nutre los caudales (agua, sedimentos y nutrientes) de los ríos de la Amazonia Colombiana. Esta doble retroalimentación contribuye a la riqueza hidro-ecológica y de biodiversidad de ambas regiones, grandemente amenazadas (Myers *et al.*, 2001). La interacción que se presenta entre el suelo, la vegetación y la atmósfera también juega un papel importante en la modulación del clima tropical. El porcentaje de precipitación reciclada, es decir aquella que se origina en los procesos de evapotranspiración local, es del orden del 35-50% en la Amazonia (Elthair & Bras, 1994). La primera estimación hecha para Colombia de la cantidad de precipitación reciclada indica que entre el 30%-40% de la lluvia tiene origen en la misma humedad evaporada por el suelo y la vegetación del país (Cuartas & Poveda, 2002). La significancia de este resultado pone de presen-

te la gran amenaza hidrológica y climática impuesta por la deforestación de los bosques Colombianos. En este contexto geográfico se debe entender la variabilidad del clima de Colombia en las distintas escalas temporales. Este trabajo presenta una síntesis de diagnóstico y de los elementos y mecanismos físicos más preponderantes de la variabilidad climática de Colombia, desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna, con base en registros y observaciones instrumentales de distintas variables climáticas e hidrológicas.

2. Escala Inter-Decadal

La variabilidad climática global a escala de varias décadas está dominada por el cambio climático y el cambio ambiental global de largo plazo, así como por fenómenos macroclimáticos que operan en tal escala temporal. Nos referiremos al primero. Las temperaturas medias y mínimas de la troposfera baja están aumentando y, a su vez, las temperaturas de la estratosfera están disminuyendo en casi todo el planeta. El balance neto de las evidencias indica que la acción humana está ejerciendo un impacto discernible sobre el clima global (IPCC, 2000), a través de la inyección de altas cantidades de CO₂ como resultado de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas) y por la deforestación de bosques, que son sumideros de Carbono. Las evidencias de cambio climático en Colombia son múltiples: retroceso de glaciares tropicales, aumento de enfermedades de transmisión vectorial asociadas con el clima, tales como malaria y dengue, perturbaciones de largo plazo y cambios en la fase y en la amplitud de los regímenes hidrológicos, aumentos graduales del nivel del mar, cambios en ecosistemas, etc. En los trabajos de **Smith et al.**, (1996), **Mesa, Poveda & Carvajal** (1997), **Pérez et al.**, (1998), y **Poveda, Rave & Mantilla** (2001) se presenta un completo estudio de tendencias y cambios estadísticos, mediante pruebas de hipótesis rigurosas, en las series de registros de diversas variables climáticas de Colombia, durante los últimos 30-40 años. Tales estudios apuntan a confirmar las evidencias de cambio ambiental en el país. En esos estudios no se profundizó en el análisis de la coherencia espacial de los cambios identificados. En la Figura 1 se presenta la distribución espacial de las tendencias en las series mensuales de temperaturas mínimas y de humedad relativa, para el período 1955-1995. En tal figura el diámetro del círculo es correlativo con la tendencia identificada en cada estación de registro localizada en el centro del círculo, y se puede comparar con la convención mostrada en cada mapa. Se observa un generalizado aumento (tendencias crecientes) en ambas variables. Las tendencias encontradas en los registros de temperatura mínimas indican

un incremento del orden de 1EC/20 años, y de 0.6EC/20 años para los registros de temperatura media. En forma consistente, este calentamiento de la troposfera también se presenta en los registros de presión de vapor de agua (0.5 hPa/20 años), y de punto de rocío (0.6EC/20 años). Todas estas tendencias sugieren que la humedad relativa del aire debe aumentar, consistentemente con la ecuación de Clausius-Clapeyron. La tendencia identificada en los registros de humedad relativa es de 0,03/20 años. Las series de precipitación muestran tendencias positivas y negativas, y no hay una señal clara, pero los caudales de las principales cuencas hidrográficas exhiben tendencias decrecientes de 4 m³/s/año. De acuerdo con la elevación sobre los Andes, los resultados muestran (**Ochoa & Poveda**, 2003) que las tendencias decrecientes en los registros de punto de rocío, presión de vapor y humedad relativa se presentan para estaciones por debajo de la cota 1700 m. No solo se han identificado tendencias en los registros de las principales variables del clima en Colombia, sino que además se han identificado cambios en la fase y la amplitud del ciclo anual y semi-anual (**Pérez et al.**, 1999), es decir corrimientos de las temporadas lluviosas dentro del año, con importantes implicaciones en agricultura y en generación de energía hidro-eléctrica, para citar solo dos ejemplos.

Hay varios fenómenos macro-climáticos que operan a escalas de tiempo decadales, tales como la llamada Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), que tienen una influencia significativa sobre el clima de Colombia. La primera ha sido estudiada por **Poveda et al.**, (2002), y la segunda por **Poveda & Mesa** (1996b) y **Poveda et al.**, (1998). Estos últimos dos fenómenos son parte de la variabilidad natural del clima de la Tierra. La superposición de los efectos combinados del cambio climático (antropogénico) y de la variabilidad climática (natural) es un tema central de investigación en geofísica actual y de indudables implicaciones sociales, ambientales, ecológicas y económicas.

3. Escala Interanual (ENSO)

La variabilidad climática global a escala de tiempo interanual está fuertemente controlada por la ocurrencia del evento El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés). El ENSO tiene una variabilidad estacional (asociada con su enfasamiento con el ciclo anual), ya que comienza durante la primavera del hemisferio Norte (marzo-mayo), y alcanza su máximo desarrollo durante el tiempo de la Navidad, y de allí el nombre de El Niño. Pero también tiene una componente cuasi-bienal con un tiempo de recurrencia entre 2 a 2,5 años, así como una baja

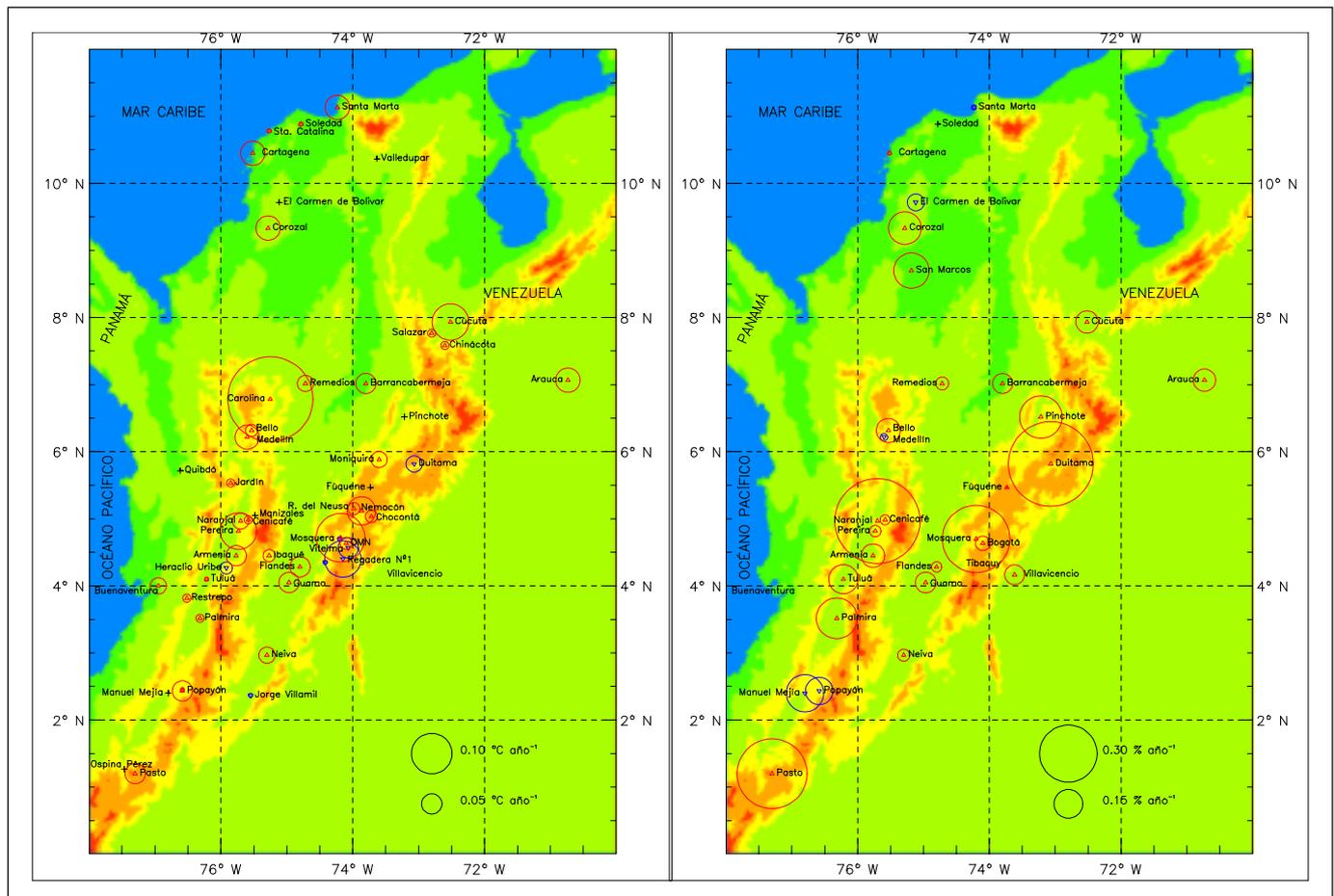


Figura 1. Mapas de tendencias estadísticas crecientes (rojo) y decrecientes (azul), identificadas en los registros mensuales de temperaturas mínimas (izquierda) y de humedad relativa (derecha) en estaciones de registro localizadas en el centro del círculo respectivo. El diámetro del círculo es correlativo con la magnitud de la tendencia de referencia, la cual se lee en la esquina inferior derecha.

frecuencia, con una recurrencia entre 4-5 años. El Niño es la fase cálida del ENSO, en la que se presenta un aumento de las temperaturas superficiales del mar, en particular sobre el centro y el oriente del Pacífico tropical, lo cual conduce a alteraciones en los patrones de circulación de vientos, de presiones atmosféricas superficiales y de precipitación sobre todo el Océano Pacífico. La Niña es la fase fría del ENSO.

La magnitud de los cambios en los balances de agua y energía globales que ocurren durante las dos fases del ENSO, ocasiona fuertes perturbaciones hidro-climáticas, particularmente en los cinturones tropicales y sub-tropicales de la tierra, con amplias repercusiones sociales, ambientales, ecológicas y económicas. Referencias obligadas para entender la dinámica del fenómeno ENSO son los trabajos de **Neelin et al.**, (1998), **Battisti & Sarachick**

(1995), **Federov & Philander** (2000), **Trenberth** (1996), **White & Cayan** (2000), **Chan & Xu** (2000), **Neelin et al.** (2000), **Webster & Fasullo** (2000).

Los impactos sociales y económicos del ENSO se estudian en los trabajos de **Díaz & Markgraf** (2000), **Glantz et al.** (1991), **Glantz** (2000), **Rosenzweig** (2001). Información detallada y análisis sobre el ENSO y sus efectos globales y regionales se encuentra en las siguientes URL de Internet:

- http://www.pmel.noaa.gov/tao/el_nino/nino-home.html,
- http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/,
- <http://nsipp.gsfc.nasa.gov/enso/>

<http://iri.ldeo.columbia.edu/outreach/education/enso/>

La variabilidad del clima de Colombia a la escala interanual asociada con el ENSO y otros fenómenos de macro-escala ha sido estudiada por nuestro grupo de investigación en el Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín. Entre ellos: **Poveda** (1994a y b, 1996, 1997, 1998, 2001), **Poveda & Mesa** (1995, 1996a, 1997, 2000), **Mesa et al.** (1994a y b, 1997a y b), **Poveda et al.** (1994, 1998, 2001a, 2002a, b, c, d), **Gil & Quiceno** (1997), **Hoyos** (1999), **Poveda & Jaramillo** (2000), **Waylen & Poveda** (2002). El tema de la predicción de la hidro-climatología de Colombia en relación con el fenómeno ENSO y otros fenómenos macro-climáticos ha sido estudiado en los trabajos de **Poveda & Mesa** (1993), **Poveda & Penland** (1994), **Carvajal et al.** (1994), **Salazar et al.** (1994), **Poveda et al.** (2002, 2003). Otros grupos de investigación también han hecho aportes al estudio de los efectos del ENSO en Colombia, como los del IDEAM (**Montealegre & Pabón**, 1992, 2002; **Montealegre**, 1996), el de la Universidad del Valle (**Carvajal et al.**, 1999), el CCCP de Tumaco y el CIOH de Cartagena, ambos de la Armada Nacional, y el Observatorio Sismológico del Occidente Colombiano.

Los efectos hidro-climáticos del ENSO se pueden resumir en los siguientes aspectos principales. En general, durante El Niño se presenta una disminución en la precipitación y en los caudales medios mensuales de los ríos de Colombia, así como una disminución en la humedad del suelo y en la actividad vegetal (**Poveda & Jaramillo**, 2000; **Poveda et al.**, 2001; **Poveda, Ramírez & Jaramillo**, 2001). Consistentemente se presenta un incremento en las temperaturas medias del aire. Todas estas anomalías hidro-climáticas presentan alguna variabilidad regional y temporal, y están asociadas con efectos adversos a la agricultura y a la producción agropecuaria, a la generación de energía eléctrica (**Poveda, Mesa & Waylen**, 2003), al transporte fluvial, y a las epidemias de malaria en Colombia (**Poveda & Rojas**, 1996, 1997; **Poveda et al.**, 2000, 2001b), y a muchos ecosistemas. En general, los efectos de El Niño son más fuertes y más inmediatos sobre el occidente que sobre el oriente del país (**Poveda & Mesa**, 1997). Durante La Niña ocurren anomalías contrarias, con eventos de precipitación muy intensos, crecidas de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies aluviales, con las consecuentes pérdidas de vidas humanas, infraestructura y cosechas agrícolas. Para ilustrar estos resultados, en la Figura 2 se muestran los valores de los coeficientes de correlación estacional entre las series

de caudales medios trimestrales de ríos de Colombia el Índice Multivariado del ENSO (MEI), proporcionada por K. Wolter de la National Oceanographic and Atmospheric Administration de Estados Unidos (<http://www.cdc.noaa.gov/~kew/MEI/>), en dos temporadas del año. Las correlaciones son especialmente altas entre el MEI del trimestre septiembre-noviembre (SON) y el caudal del trimestre DEF, a igual que entre el MEI de DEF y los caudales de DEF. Se observa un decaimiento de las correlaciones entre un trimestre determinado del MEI y los caudales de trimestres posteriores a MAM, especialmente en SON y DEF. Esta conclusión concuerda con **Poveda & Mesa** (1996a) y **Gil & Quiceno** (1997).

Los mecanismos físicos por los cuales se presentan déficits hidrológicos en Colombia durante El Niño se pueden resumir como (**Poveda**, 1998; **Poveda et al.**, 2001): (1) el debilitamiento del chorro del Chocó (ver numeral siguiente); (2) el debilitamiento de la corriente de chorro ecuatorial de los 700 hPa; (3) la reducción en número e intensidad de las ondas tropicales del este sobre el Atlántico tropical norte; (4) el desplazamiento de la ZCIT hacia el sur-oeste de su posición normal, como consecuencia del establecimiento de una celda de Hadley anómala sobre el trópico Americano; (5) alteración del balance de humedad atmosférica, en particular en los niveles más bajos de la atmósfera (ver numeral 4.4, y **Cuartas & Poveda**, 2002); y (6) retro-alimentación positiva entre procesos tierra-atmósfera, ya que se presentan déficits de humedad de suelo, de evapotranspiración y de actividad vegetal durante El Niño en Colombia (**Poveda & Jaramillo**, 2000; **Poveda et al.**, 2001a y b), y por tanto la precipitación reciclada de origen local tiende a disminuir como resultado de una menor disponibilidad de agua en el suelo y en la atmósfera.

Este diagnóstico todavía es parcial, y significa que todavía se requiere mucho trabajo para entender la dinámica del ENSO sobre la hidro-climatología de Colombia. Varios factores contribuyen a la alta complejidad de esta relación. Uno de ellos es que además del ENSO, existen otros fenómenos como los ya mencionados de la PDO y la NAO, que también afectan la hidro-climatología de Colombia a la escala de tiempo interanual. No parece existir una influencia de la oscilación cuasi-bienal de los vientos estratosféricos (QBO), con las precipitaciones en Colombia, a pesar de la fuerte componente cuasi-bienal existente en los registros de lluvia del país (**Zuluaga et al.**, 2001). Estas interacciones son altamente no lineales y por tanto difíciles de predecir. Otra complejidad proviene del hecho de que todos los eventos del ENSO son diferentes en duración y amplitud, entonces los efectos sobre la hidro-climatología del país son diferentes para cada

evento de El Niño. La evidencia se muestra en la Figura 3, en la cual se presenta la evolución de los caudales medios mensuales de cuatro ríos de Colombia: La Vieja (Cartago, Valle), Luisa (Pavo Real, Tolima), Sumapaz (El Profundo, Cundinamarca), y Lengupá (San Agustín, Boyacá). Allí se presentan los caudales correspondientes a los tres años alrededor de cada evento de El Niño, para los distintos eventos registrados (líneas de diferente color). Se observa la altísima variabilidad de los caudales durante las distintas ocurrencias del evento El Niño, aunque los promedios de los distintos eventos (línea roja más gruesa) confirman el fuerte efecto de El Niño durante el año (0, de inicio) y el año (+1, de finalización), con efecto mayor y más temprano sobre los ríos del occidente, pero más débil y más tardío sobre los ríos del oriente del país.

Desde el punto de vista físico se deduce que, además de los caudales medios mensuales, las dos fases del ENSO afectan los caudales extremos (máximos y mínimos) de distinto período de retorno. Cuando se quiere representar el comportamiento futuro de una variable hidrológica y se conoce una clara influencia de condiciones climáticas globales como el ENSO, no es apropiado emplear una única distribución de probabilidad debido a que la influencia que ejercen dichos fenómenos depende de su fase. En este caso, una serie de tiempo hidrológica se puede tomar como la combinación de varias series provenientes de diferentes distribuciones determinadas por las distintas fases del ENSO. Con estas distribuciones es posible determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo, como la combinación de las probabilidades individuales en cada fase del fenómeno. Para ilustrar la pertinencia e importancia de este tipo de análisis discriminado por fases del ENSO, la Figura 4 muestra el ajuste de una función de distribución de probabilidades log-Normal a los caudales máximos anuales del Río Negro (estación Colorados, código 2306702 del IDEAM) durante los años El Niño, La Niña, y durante años normales. El análisis se ha efectuado según el procedimiento de **Waylen & Caviedes** (1986). Se observa que la función de distribución de probabilidades es muy diferente en cada caso. El análisis de los caudales máximos o mínimos anuales de diferente período de retorno, que son clásicos en diseño hidrológico, deben efectuarse diferenciando las fases del ENSO.

Se ha avanzado en el entendimiento de la dinámica del ENSO sobre Colombia, pero es necesario continuar las investigaciones. En particular, es preocupante ver el despliegue de resultados erróneos de los efectos del fenómeno El Niño sobre la hidrología Colombiana. Por ejemplo, en el reporte de IDEAM sobre los efectos de El Niño (www.ideam.gov.co/fenomenonino/DOCUMENTOEL

NINO.pdf), se indican excesos de precipitación en toda la costa Pacífica Colombiana durante la ocurrencia de El Niño. La evidencia muestra que la situación es exactamente la opuesta, es decir que se presenta una disminución de las lluvias sobre la costa Pacífica durante El Niño, como se observa en los registros en Buenaventura, Quibdó, Lloró y otras estaciones (no mostrados aquí).

4. Escala Anual

El ciclo anual de la hidro-climatología de Colombia está dominado por fenómenos físicos como la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical, asociada con la dinámica trans-ecuatorial de advección de humedad por los vientos alisios del este, la actividad del chorro del Chocó y de los sistemas convectivos de mesoescala. Nos referiremos a estos fenómenos, pero no podemos dejar de mencionar la importancia de la interacción suelo-atmósfera en la regulación del ciclo anual de la hidrología del país (**Cuarteras & Poveda**, 2002; **Vélez et al.**, 2002a).

4.1 Migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical

La oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que se da como resultado del ciclo anual de temperaturas superficiales por efecto de la insolación, constituye el mecanismo físico de mayor importancia para explicar el ciclo anual (o semi-anual) de la hidro-climatología de Colombia. Sobre el centro de Colombia se presentan dos temporadas lluviosas (abril-mayo y octubre-noviembre), y dos temporadas secas (diciembre-febrero y junio-agosto), como resultado del doble paso de la ZCIT sobre el territorio. En lugares extremos de la oscilación de la ZCIT, el ciclo anual es unimodal.

En la Figura 5 se muestra el ciclo anual de precipitación obtenido para estaciones sobre los Andes tropicales de Colombia. Es posible observar un comportamiento bimodal en todas las estaciones, con valores máximos en los períodos abril-mayo y octubre-noviembre, y valores mínimos en diciembre-enero y julio-agosto. Durante octubre-noviembre la ZCIT se encuentra desplazándose hacia el sur, para llegar a su máximo desplazamiento septentrional en el mes de enero (verano del hemisferio sur). Durante la temporada de abril-mayo, la ZCIT se encuentra desplazándose hacia el norte, buscando su posición más meridional durante el mes de julio (verano del hemisferio norte). La posición de la ZCIT está asociada con la intensidad de los vientos alisios del este del hemisferio contrario, y su oscilación no es simétrica alrededor del ecuador terrestre, ya que su posición media se

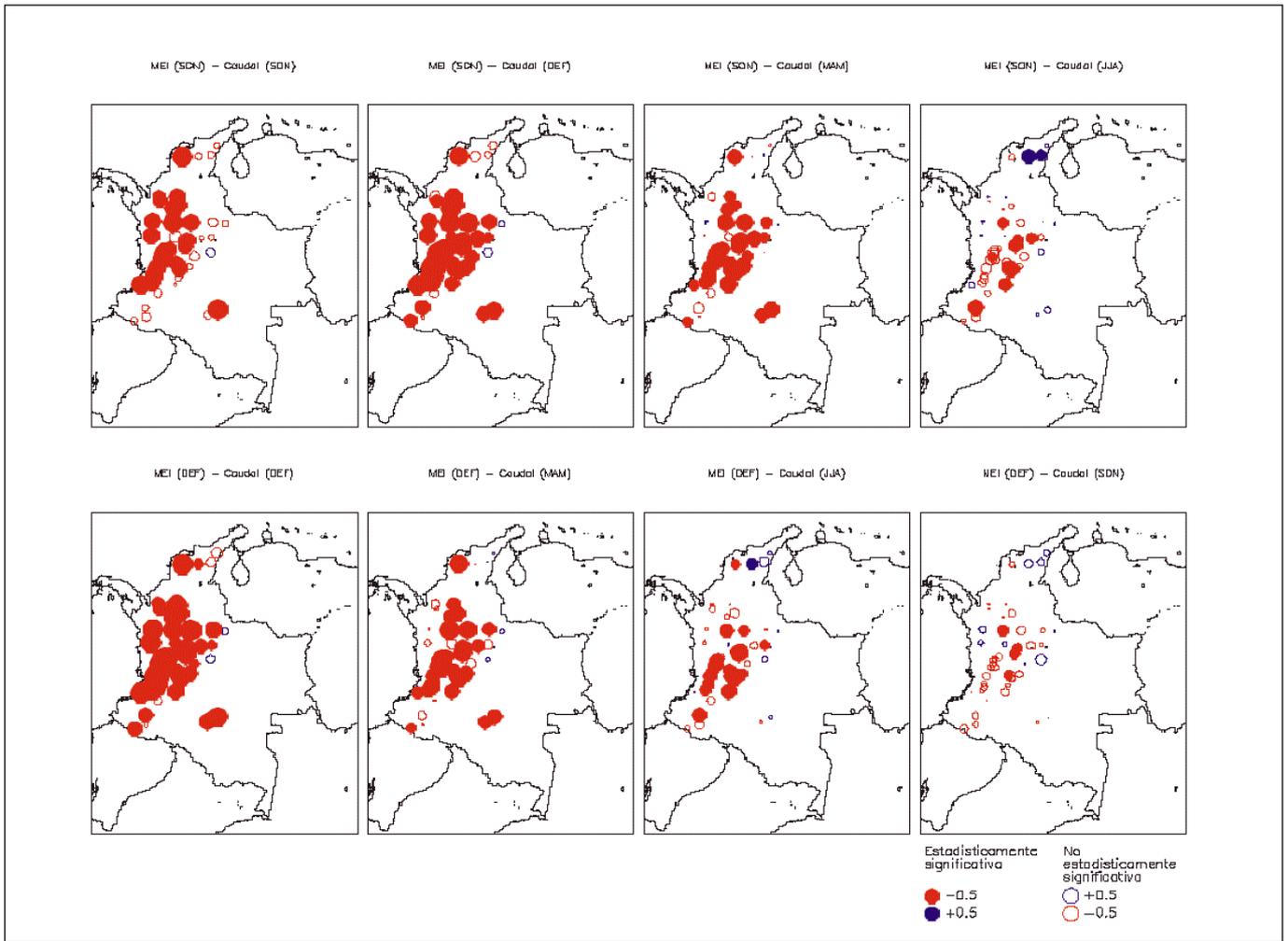


Figura 2. Mapas de las correlaciones trimestrales cruzadas entre la serie del Índice Multivariado del ENSO (MEI), en los trimestres de septiembre-noviembre (SON, arriba) y diciembre-febrero (DEF, abajo), con los registros de caudales medios de ríos de Colombia, durante los trimestres simultáneos y siguientes. El diámetro del círculo es relativo al valor del coeficiente de correlación de referencia (inferior derecha).

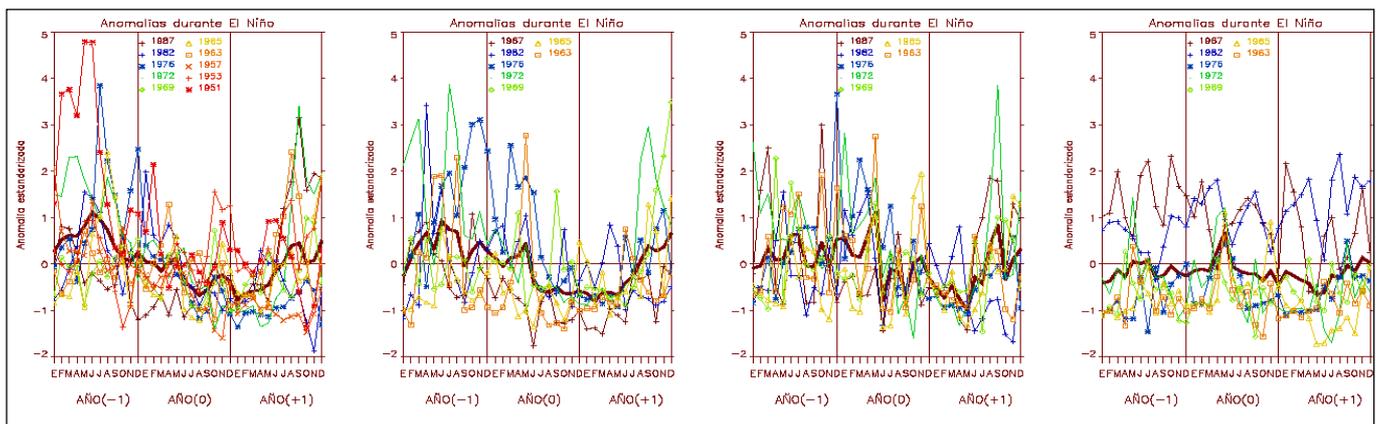


Figura 3. Evolución de las anomalías estandarizadas de los caudales medios mensuales de cuatro ríos de Colombia durante la evolución de eventos El Niño. El Año (-1) corresponde al año previo, el Año (0) corresponde al inicio de El Niño y el Año (+1) corresponde al año de finalización del evento. Las anomalías durante los distintos eventos El Niño se distinguen por el color. La línea gruesa denota el promedio de las anomalías en los eventos registrados de El Niño.

encuentra desplazada alrededor de 5°-10°N (**Philander et al.**, 1996). La ZCIT constituye el lugar preferente para la convergencia superficial de los vientos alisios, y es una región preferente de bajas presiones atmosféricas superficiales, ascenso de vientos húmedos, desarrollo de mecanismos de convección profunda, alta nubosidad y divergencia en la alta atmósfera. En la Figura 6 se muestra

el ciclo anual del campo de divergencia de vientos horizontales a los 925 hPa, y en la Figura 7 el correspondiente al campo de divergencia de vientos a los 200 hPa. La Figura 6 pone de manifiesto la posición de la ZCIT, ya que las zonas con valores negativos del campo de la divergencia de humedad, corresponden a alta convergencia superficial, y por tanto zonas de alta convección atmosférica que desencadena procesos de alta precipitación en el trópico. A su vez, la Figura 7 pone de manifiesto la alta divergencia en el nivel de 200 hPa, asociada con la circulación de la celda de Hadley sobre el trópico Americano. Los mapas de las Figuras 6 y 7 han sido estimados con información del Reanálisis climático del NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction / Nacional Center for Atmospheric Research) de Estados Unidos, con información del período 1958-1998 (**Kalnay et al.**, 1996).

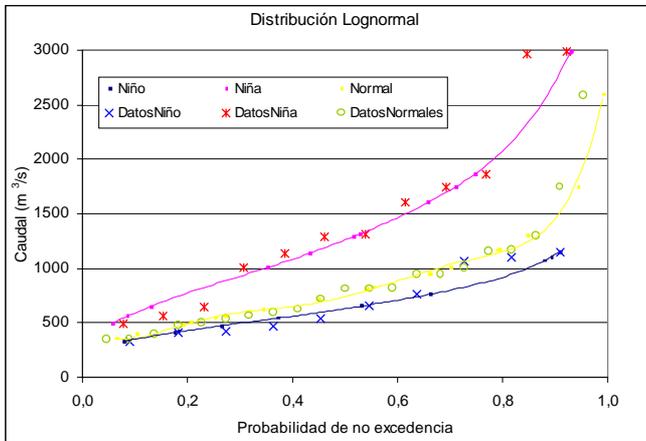


Figura 4. Función de distribución de probabilidad Log-Normal ajustada a los registros de caudales máximos anuales del río Negro (estación Colorados, Cundinamarca), discriminada según los años El Niño, La Niña y años Normales. La abscisa representa la probabilidad de no excedencia de los caudales máximos.

4.2 El Chorro del Chocó

El Océano Pacífico ejerce un control muy importante sobre la hidro-climatología de Colombia, en particular del occidente y centro del país (**Poveda**, 1998), pero a su vez las lluvias sobre los Andes de Colombia ejercen un efecto importante en las precipitaciones del Pacífico al frente de las costas Colombianas (**Mapes et al.**, 2003). Esta doble retroalimentación es un reto de investigación futura. La costa Pacífica de Colombia es una de las regiones más lluviosas del planeta, con precipitaciones sobre

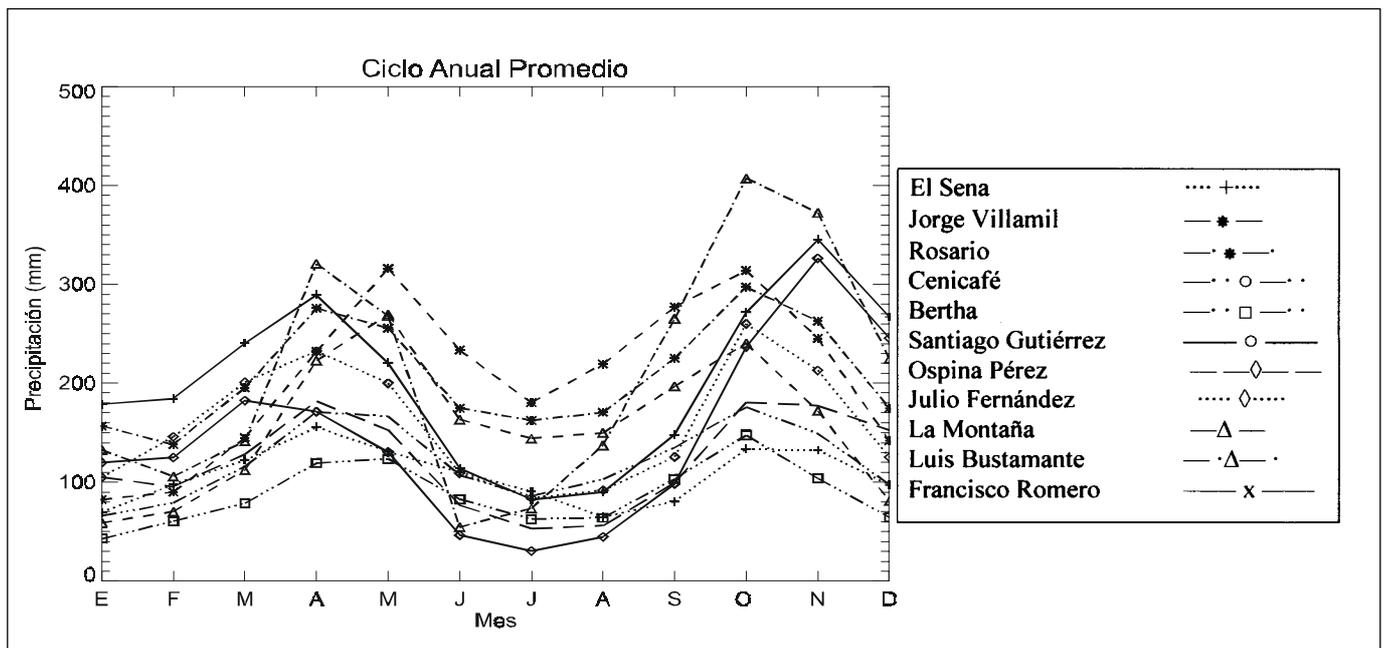


Figura 5. Ciclo anual promedio de la precipitación en diversas estaciones localizadas en los Andes de Colombia (**Poveda et al.**, 2001c).

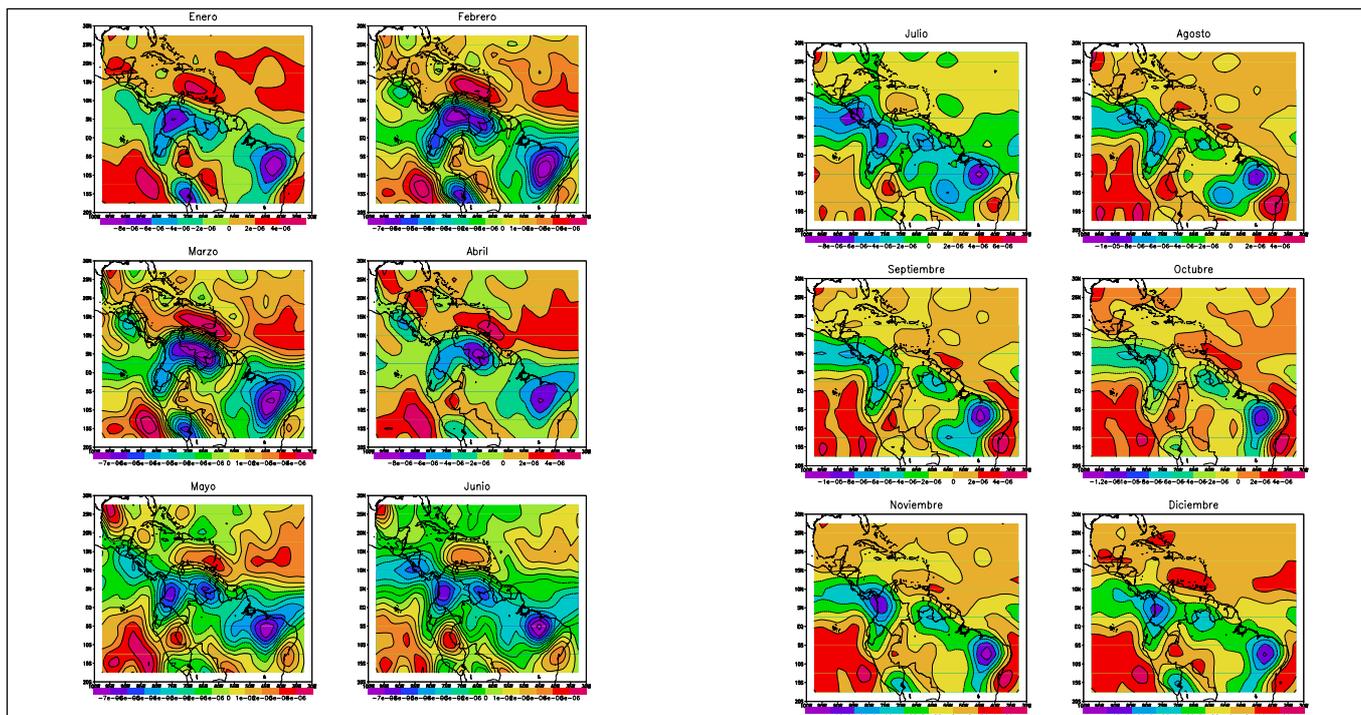


Figura 6. Ciclo anual promedio de la divergencia del viento horizontal [1/s] por 925 hPa, sobre el trópico Americano. Fuente de datos: Reanálisis Climático NCEP/NCAR para el período 1958-1998.

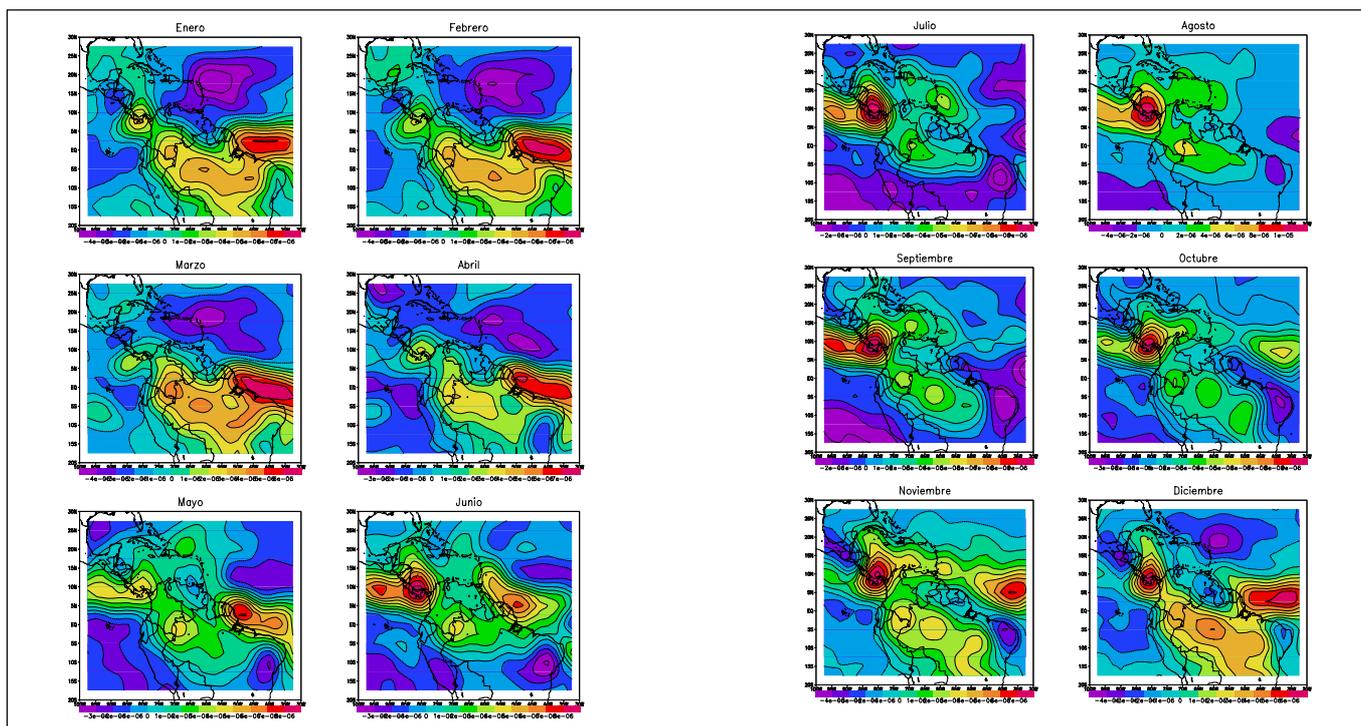


Figura 7. Ciclo anual promedio de la divergencia del viento horizontal [1/s] por 200 hPa, sobre el trópico Americano. Fuente de datos: Reanálisis Climático NCEP/NCAR para el período 1958-1998.

tierra entre 8.000 y 13.000 mm en el promedio anual (López, 1966; López & Howell, 1967; Arnett & Steadman, 1970; Snow, 1976, p. 371; Nieuwolt, 1977; Eslava, 1993). La distribución de la precipitación media anual sobre la región tropical de América del Sur no puede ser explicada únicamente en términos de la advección de humedad por los vientos alisios del este, desde el Caribe y la cuenca Amazónica.

La corriente de vientos en chorro del occidente de Colombia, o chorro del Chocó (Poveda, 1998; Poveda & Mesa, 1999 y 2000), transporta grandes cantidades de humedad desde el Océano Pacífico hacia el interior del país. Usando los datos del Reanálisis de NCEP/NCAR para el período 1958-1998, recientemente hemos estimado que el transporte de humedad promedio anual por los vientos del chorro del Chocó es de $3,78 \times 10^6$ kg/s ($11,9 \times 10^{13}$ kg/año), que equivalen a $3774 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua; casi la mitad del caudal del río Magdalena en su desembocadura. El chorro del Chocó interactúa con la topografía de los Andes occidentales y con los vientos alisios del este para favorecer la convección profunda y que contribuye a producir grandes cantidades de precipitación sobre el occidente del país. La corriente de chorro del Chocó es una corriente de chorro tropical de bajo nivel según la caracterización de Hastenrath (1991, p. 132).

El chorro del Chocó exhibe todos rasgos característicos de los chorros superficiales, según la caracterización de Stensrud (1996). Los vientos del chorro del Chocó exhiben un marcado ciclo anual, siendo más fuertes en los meses de septiembre-noviembre y más débiles durante los meses de febrero-marzo. Tal comportamiento contribuye a explicar las razones por las cuales la segunda temporada lluviosa de septiembre-noviembre es más intensa que la primera de abril-mayo en muchas partes del occidente de Colombia. La corriente de chorro del Chocó obtiene su energía del gradiente de temperaturas superficiales que existe entre la zona de temperaturas más frías de la llamada "lengua fría" de las aguas del Pacífico en Ecuador y Perú, y las temperaturas más cálidas del Pacífico al frente de las costas de Colombia. Este gradiente de temperaturas está asociado con presiones atmosféricas superficiales que inducen la circulación de los vientos desde el Pacífico al interior de Colombia; vientos alisios trans-ecuatoriales del Pacífico que se recurvan e ingresan por el oeste de Colombia.

En la Figura 8 se presenta el ciclo anual del transporte de humedad por los vientos de la corriente del chorro del Chocó, y su comportamiento durante los eventos de El Niño y La Niña. Se observa que el índice del chorro del Chocó se debilita durante El Niño y se intensifica duran-

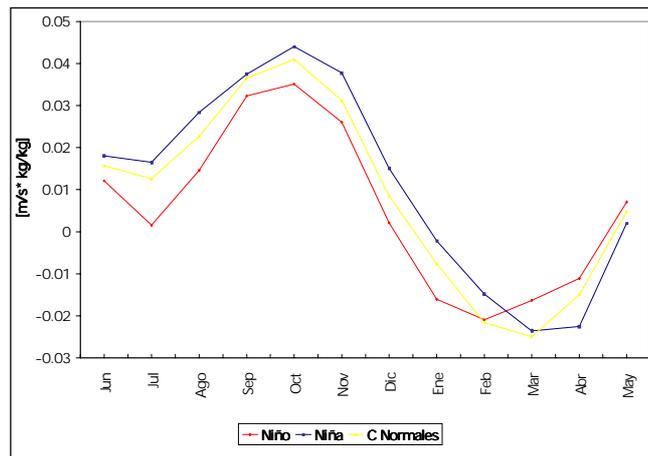


Figura 8. Ciclo anual del transporte de humedad por los vientos de la corriente del chorro del Chocó, y su comportamiento durante los eventos de El Niño y La Niña (Rendón, 2001). El año hidrológico se considera de junio (Año 0) a mayo (Año +1).

te La Niña. Esto contribuye a explicar las anomalías hidrológicas en Colombia durante ambas fases del ENSO. Eso mismo sucede con el gradiente de temperaturas del mar sobre el Océano Pacífico que energizan los vientos del chorro del Chocó (Rendón, 2001; Poveda, 2002), lo cual es consistente con la disminución de las lluvias y los caudales de los ríos colombianos durante El Niño, en particular del centro y occidente del país.

En la Figura 9 se presenta el perfil vertical de los flujos zonales de humedad en 77.5°O y 5°N . La advección de humedad hacia Colombia es más fuerte en el trimestre SON, alcanzando valores hasta de $600 \text{ mm}/\text{mes}$, ya que el chorro del Chocó se presenta desde el Ecuador, de manera débil, se va intensificando hasta alcanzar su máximo hacia $5\text{E}-6\text{EN}$, y luego disminuye cerca de los 10°N . Se observa una fuerte advección de humedad hacia Colombia (del oeste) en JJA y se intensifica en SON, de los 800 hPa hacia abajo, correspondiente con la dinámica de transporte de humedad por los vientos del chorro del Chocó (Cuartas, 2001). Los efectos de ambas fases del ENSO son obvios en la Figura 9.

Existen dos corrientes de vientos en chorro del este de latitud tropical, actuando sobre la geografía de Colombia. Una primera corriente de chorro del este a la altura de los $700-600 \text{ hPa}$, que penetra al continente suramericano proveniente del Océano Atlántico y que es posible detectarla desde el oeste de África, y la segunda se presenta sobre el mar Caribe, pasa sobre la Guajira y San Andrés. Ver los detalles en los trabajos de Poveda (1998), y Poveda & Mesa (1998).

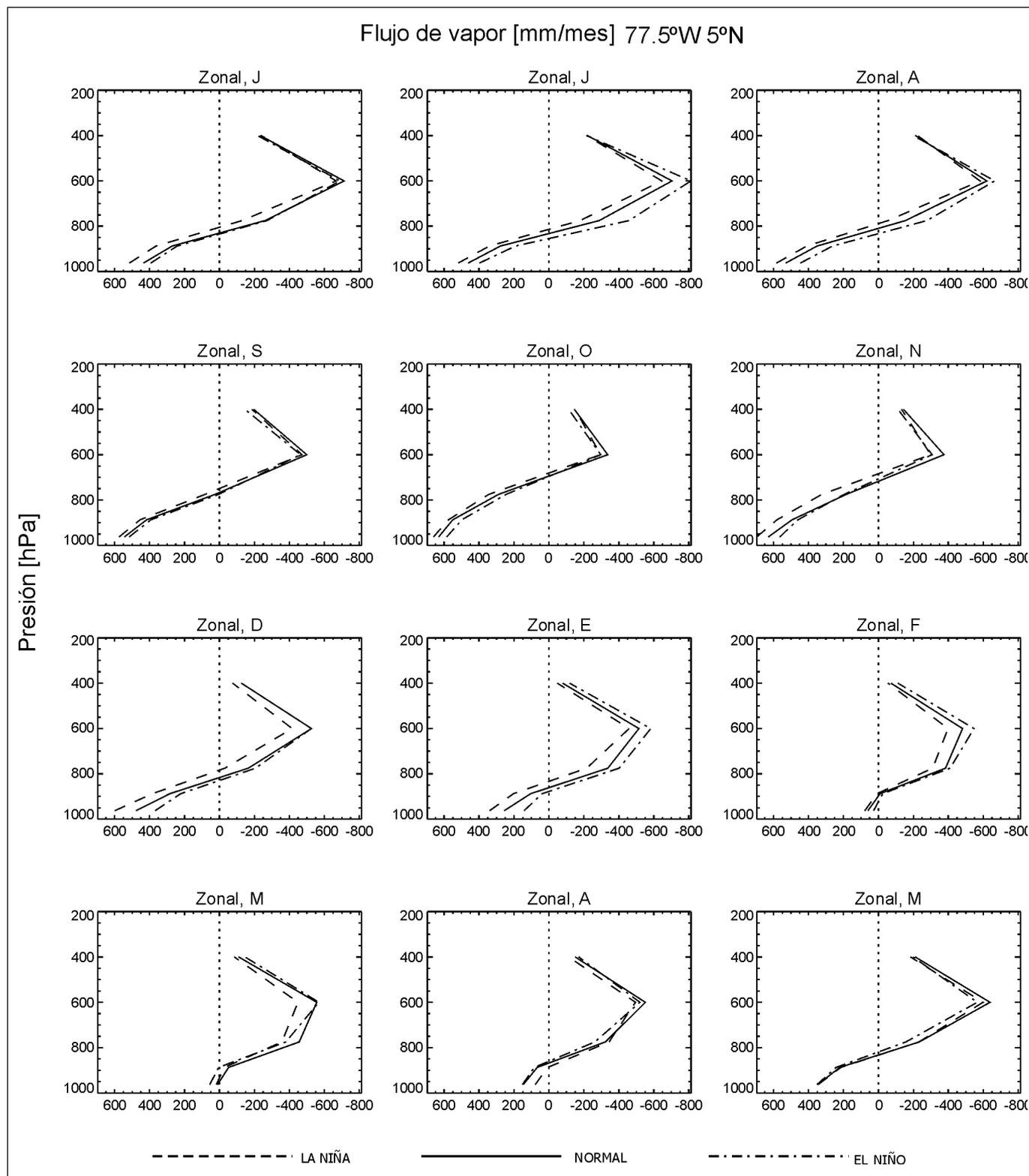


Figura 9. Ciclo anual (junio-mayo) de los perfiles verticales de flujo de humedad zonal [mm/mes] en 77.5°O y 5°N, para los años normales y años El Niño y La Niña (Cuartas, 2001).

4.3 Sistemas Convectivos de Meso-escala

Muchos de los eventos más intensos de precipitación en Colombia se desarrollan en Sistemas Convectivos de Meso-Escala (SCM). La presencia y algunos rasgos de la dinámica de los SCM en el territorio de Colombia fue evidenciada por **Velasco & Frisch** (1987). El trabajo de **Poveda** (1998) conecta la dinámica del chorro del Chocó con la de los SCM sobre el Pacífico Colombiano. El chorro del Chocó y las ondas de gravedad que se generan térmicamente en la atmósfera de Colombia tienen un efecto discernible sobre la precipitación al oeste del país (**Mapes et al.**, 2003). La importancia del ciclo diurno en la dinámica de los SCM y los ambientes atmosféricos (dinámicos, termodinámicos y cinemáticos) en los cuales se desarrollan los SCM se han comenzado a estudiar en **Mejía & Poveda** (2003 a y c), mediante información de satélite de la misión TRMM (“Tropical Rainfall Measuring Mission”), para el año 1998. El diagnóstico permitió identificar la ocurrencia 75.616 eventos durante 1998, con una frecuencia un poco mayor sobre la región oceánica (53.1%) que sobre el continente (46.9%). Del total, sólo se desarrollaron SCM en un 7.1% de los eventos oceánicos y en un 5.9% de los continentales, pero su contribución al total de precipitación anual es extraordinariamente alta, sobre océano (44%) y sobre el continente (38%). La distribución espacial de los eventos con y sin SCM está fuertemente determinada por la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Inter-tropical, durante el ciclo anual. La Figura 10 muestra un sistema convectivo de mesoescala sobre el territorio de Colombia, y la Figura 11

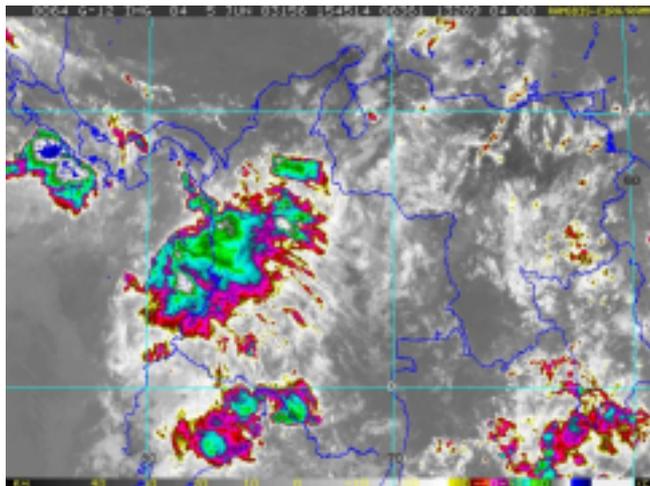


Figura 10. Imagen del satélite geoestacionario GOES, mostrando un sistema convectivo de meso-escala sobre el occidente de Colombia, el 5 de junio de 2003, a las 15:45 UTM.

muestra el ciclo anual de los eventos de precipitación con SCM sobre Colombia, durante 1998. Una de las zonas cuyo ambiente atmosférico es más favorable para la formación de eventos con SCM está al este del Pacífico y sobre la Costa Pacífica Colombiana. Sobre la región Andina en Colombia, el valle del Río Magdalena y el Norte de Antioquia presentan la mayor cantidad de SCM. La cuenca Amazónica y la región del Orinoco en Colombia también presentan alta frecuencia de SCM. Las zonas con menos densidad de eventos están al norte de Colombia y Venezuela y al occidente del Perú. Se observó un predominio de los mayores tamaños de los eventos sobre el océano durante 1998, así como los mayores valores de la intensidad promedio de precipitación en el primer trimestre de 1998, posiblemente asociado a los efectos oceánicos de El Niño.

4.4 Balance de Humedad Atmosférica

El trabajo de **Cuartas** (2002) marca un hito al haber estimado el balance de humedad atmosférica en Colombia, usando la ecuación de largo plazo de conservación de agua atmosférica, con los datos del Reanálisis NCEP/NCAR para el período 1958-1998. Allí se hace el análisis de los flujos de humedad que entran y salen de Colombia, mediante un volumen de control que definido entre 77,5°O y 67,5°O, y entre 2,5°S y 10°N, y en la vertical de 1000 hPa a 300 hPa. La estimación del balance neto de humedad atmosférica de largo plazo, sobre Colombia, es de 1914 mm ± 131 mm (**Cuartas & Poveda**, 2002). La precipitación promedio de largo plazo de 2898 mm/año. La cuantificación de la evaporación real depende del método usado para su cálculo. El estudio de **Vélez, Poveda & Mesa** (2000) presenta una estimación de distintos campos distribuidos de la hidroclimatología de Colombia, y ha dado lugar a la construcción del “Atlas Hidrológico de Colombia” en lenguaje Java, “HidroSIG Java” (**Vélez et al.**, 2002b; **Poveda et al.**, 2003). Allí se ha estimado que la evaporación promedio sobre Colombia es de 1361 mm/año, según el método de la relación complementaria de **Morton** (1983, 1978), y de 1146 mm/año, según el método de Penman. Según la información del Reanálisis NCEP/NCAR para el período 1958-1998, la evaporación promedio multianual sobre Colombia es estimada en 1420 mm/año.

En la Figura 12 se muestran los flujos de humedad zonal y meridional como promedio multianual. La mayor advección de humedad hacia Colombia se presenta en los niveles bajos de presión, y en todas las direcciones. Esta humedad proviene principalmente de los vientos alisios del este y alisios del oeste. El influjo neto entre los 1000 y 925 hPa es igual a 5156 mm/año, entre los 925 y 850 hPa es de 4163 mm/año, y de los 850 hPa hasta el tope de

la atmósfera se da un flujo neto total de humedad fuera de Colombia igual a 3603 mm/año, para un flujo neto total de 5716 mm/año, entrando a Colombia. Hacia el este, el influjo total es igual a 24541 mm/año. Al oeste el influjo de humedad se da en los niveles bajos de presión (entre 1000 y 925 hPa), principalmente a cargo de los vientos del chorro del Chocó, y en los demás niveles se da un transporte de humedad del interior de Colombia hacia el Pacífico tropical. En promedio, al oeste de Colombia el transporte de humedad hacia fuera del país es de 13966 mm/año. Al sur y norte del país se presenta influjo de humedad en los niveles bajos, como ya se dijo, y en los niveles medios y altos se da un fuerte transporte de humedad fuera de Colombia, siendo en promedio de 2686 y 2173 mm/año, por el sur y el norte de Colombia, respectivamente. También se encontró que el mayor transporte de humedad hacia Colombia se da en los trimestres diciem-

bre-febrero y marzo-mayo, con valores promedio de 607 y 505 mm/año, respectivamente. En la Figura 12 se observa que la mayor advección de humedad se presenta por la componente zonal de los vientos, ya que estos transportan mayor cantidad de humedad hacia Colombia (Cuartas, 2001). Durante la ocurrencia de las dos fases del ENSO, la advección neta de humedad hacia Colombia cambia significativamente, con valores de 5036 mm/año en los años El Niño, y de 6690 mm/año en los años La Niña, y en los años normales de 5736 mm/año.

5. Escala Intra-anual

Los fenómenos que mayor influencia ejercen sobre la hidro-climatología de Colombia a la escala intra-anual (días a estaciones), son las oscilaciones de 30-60 días (Poveda, 1998; Hoyos, 1999; Poveda *et al.*, 2002), las

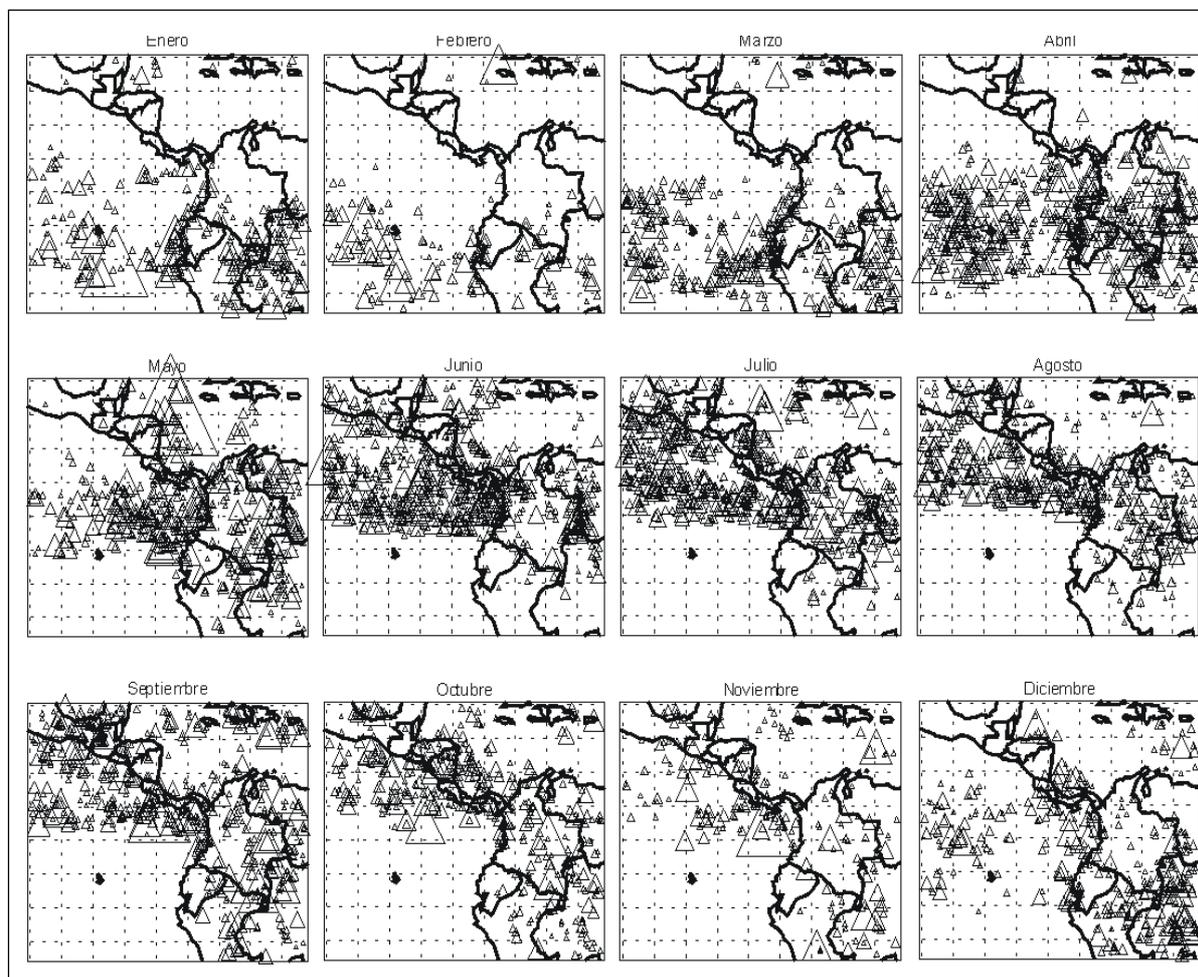


Figura 11. Ciclo anual de la distribución espacial de los eventos mostrados en la Figura 3 para 1998. Fuente de los datos: PR (2A25) y TMI (1B11) de TRMM. El tamaño del triángulo es correlativo con la intensidad del SCM (Mejía, 2001).

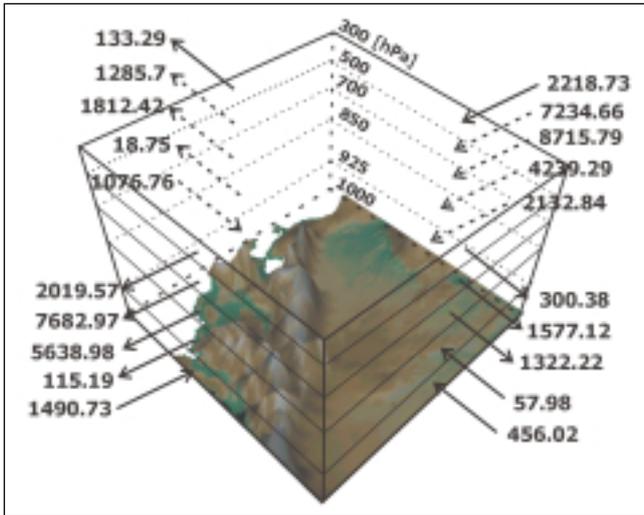


Figura 12. Valores medios de los flujos de humedad sobre la columna atmosférica de Colombia, usando la información del Reanálisis NCEP/NCAR, durante el período 1958-1998 (Cuartas & Poveda, 2002).

ondas tropicales del este (Martínez, 1993; Poveda *et al.*, 2002), los huracanes sobre el Caribe y el Pacífico oriental norte (tesis de huracanes, Poveda *et al.*, 2002), y en las épocas del hemisferio de invierno se presentan frentes fríos que pueden alcanzar la geografía de Colombia. Los fenómenos de la interacción suelo-atmósfera a través del control de la evaporación por la humedad de suelo, y la precipitación reciclada también juegan un papel importante en la modulación de la hidro-climatología de Colombia. En aras de la brevedad sólo se hará referencia a los dos primeros fenómenos.

5.1 Oscilaciones de 30-60 días

La variabilidad de baja frecuencia en los trópicos está dominada por variaciones interanuales asociadas con el ENSO y con variaciones intra-anales asociadas con la oscilación de Madden-Julían (Madden & Julián, 1971, 1972), también llamada oscilación intra-anual. Esta última exhibe variabilidad en la escala de tiempo intra-estacional, con períodos de 30-60 días, dominante en

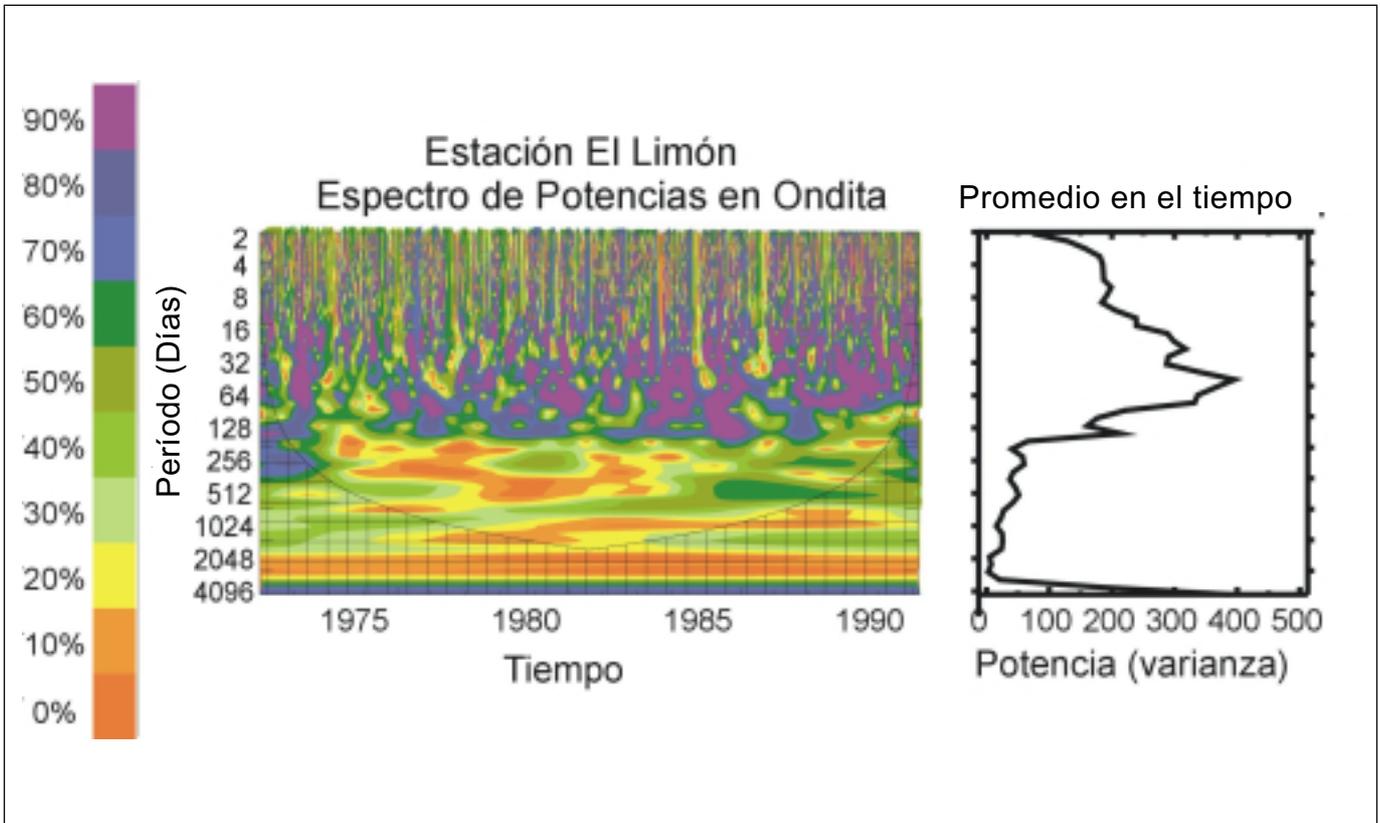


Figura 13. Espectro de potencias localizado, estimado mediante onditas para la serie de precipitación diaria en la estación El Limón (03°40'N, 75°35', altura 990 m), en el período enero 1971- diciembre 1995. La barra de colores indica el porcentaje de la varianza explicada. El cono de influencia achurado en la parte inferior define la región no significativa del espectro.

los trópicos y asociada con una celda de circulación orientada en sentido zonal y con propagación hacia el este. Las anomalías en forma de ondas pueden ser trazadas desde el Océano Índico al Océano Pacífico central y vía Hawai hasta América Central y el norte de América Latina (**Lau & Chan**, 1988). La oscilación de 30-60 días parecería estar relacionada al comienzo y al decaimiento del ENSO, al excitar las inestabilidades del sistema acoplado océano-atmósfera (**Zebiak**, 1989; **Weickmann**, 1991). Sobre Sur América tropical, el modo de oscilación principal de las fluctuaciones climáticas en la banda espectral intra-anual, está en la oscilación de 30-60 días, que se reflejan en el patrón de anomalías de OLR a los 250 mb para el período de 12 años 1979-1990 (**Mo & Kousky**, 1993).

Para ilustrar el efecto de la actividad de las ondas de 30-60 días, la Figura 13 muestra el espectro de potencias en onditas, para la serie de precipitación diaria de la estación El Limón (03°40'N, 75°35'O, altura 990 m; ver **Agudelo, Arias & Salazar**, 2001). La transformada en ondita (**Torrence & Compo**, 1998) permite descomponer una serie de tiempo en el dominio tiempo-frecuencia, y por tanto es posible determinar los modos dominantes de variabilidad, y cómo varían tales modos con el tiempo. La función de tal transformada se define mediante

$$W(\lambda, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \psi_{\lambda, t}(u) du, \text{ para } \lambda > 0, \quad (1)$$

donde λ es el parámetro de escala (dilatación), t es el parámetro de localización (traslación) y $\Psi(t)$ es la ondita madre. Una constante de normalización, $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$, es escogida de tal manera que $\int |\psi_{\lambda, t}(u)|^2 du = \int |\psi(t)|^2 dt$, para todas las escalas. En este trabajo se usa la ondita madre de Morlet, definida mediante $\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2}$. La transformada en onditas, $W_n(s)$, de una secuencia discreta x_n se define como la convolución de x_n con una versión escalada y trasladada de $R_0(t)$. Debido a que la función en ondita $R(t)$ es en general una función compleja, la transformada en ondita $W_n(s)$ también es compleja. Entonces la transformada puede ser dividida en una parte real, $U\{W_n(s)\}$, y una parte imaginaria $T\{W_n(s)\}$, con amplitud, $*W_n(s)*$, y fase, $\tan^{-1}[T\{W_n(s)\}/U\{W_n(s)\}]$. Finalmente, es posible definir el espectro de potencias en onditas como $*W_n(s)*^2$. La Figura 13 permite observar las épocas durante las cuales la banda entre 30-60 días es dominante (color violeta) durante el período de registro. En los trabajos de **Agudelo, Arias & Salazar** (2001), **Vieira & Moreno** (2001) y **Álvarez & Toro** (2001), se ha encontrado que la fase de la oscilación de Madden-Julian afecta fuerte-

mente el ciclo diario de la precipitación en Colombia. Durante la fase oeste se incrementan las precipitaciones en Colombia, en comparación de las cantidades de lluvia que ocurren durante la fase este (ver también **Poveda et al.**, 2002).

5.2 Ondas Tropicales del Este

Es bien conocida la existencia de perturbaciones de verano y otoño (junio-noviembre), sobre el Atlántico tropical norte (**Piersig**, 1936). Se trata de ondas atmosféricas con circulación ciclónica, las cuales se desplazan desde el occidente de África hacia el Atlántico, con un período entre 4-8 días y una longitud de onda de 2000 km. Tales ondas fueron observadas por primera vez en los vientos alisios del este en el mar Caribe en 15°N y 20°N (**Riehl**, 1945; **Riehl & Malkus**, 1958). La existencia de perturbaciones ondulatorias con longitudes de onda entre 3.000 y 4.000 km, velocidad de propagación entre 8-10 m/s y período en el rango de 4-5 días en la ZCIT, fue descubierta por **Chang** (1970) a través de análisis de fotografías diarias de satélite. Las principales características de estas ondas se presentan en **Wallace** (1971), y se relacionan en **Poveda** (1996), y en **Mesa, Poveda & Carvajal** (1997). Las ondas tropicales del este constituyen la génesis de los huracanes sobre el Atlántico Norte y el mar Caribe. El número de tormentas tropicales y huracanes en el Atlántico tropical y el mar Caribe se reduce durante El Niño (**Gray & Sheaffer**, 1992), lo cual indica también una reducción en la cantidad e intensidad de ondas del este. Estas ondas evidentemente pasan por la geografía de Colombia en su camino hacia el Océano Pacífico, y constituyen una fuente importante de variabilidad climática y de precipitaciones, en particular en la zona de la costa del Caribe, el valle de río Magdalena y el oriente del país (**Martínez**, 1993). Para ilustrar el efecto de la actividad de las ondas del este y su variabilidad durante las dos fases del ENSO, la Figura 14 muestra los espectros de potencias en onditas, de la serie de precipitación diaria en la estación Manuel María Mallarino (04°13'N, 76°19'O, altura 1380 m), durante tres años contrastantes del fenómeno ENSO: La Niña (1988), normal (1984) y El Niño (1992). El espectro se muestra para el período junio-noviembre, que coincide con la actividad de las ondas del este. Se observa que la banda de frecuencias entre 4-8 días es muy fuerte a través de todo el registro, excepto tal vez en el período comprendido entre fines de agosto y comienzos de septiembre. Los resultados indican pocas diferencias entre el año La Niña y el año Normal, aunque las bandas de alta frecuencia aparecen más fuertes durante septiembre y octubre durante La Niña. Por el contrario, los resultados para el año El Niño revelan una reducción drástica

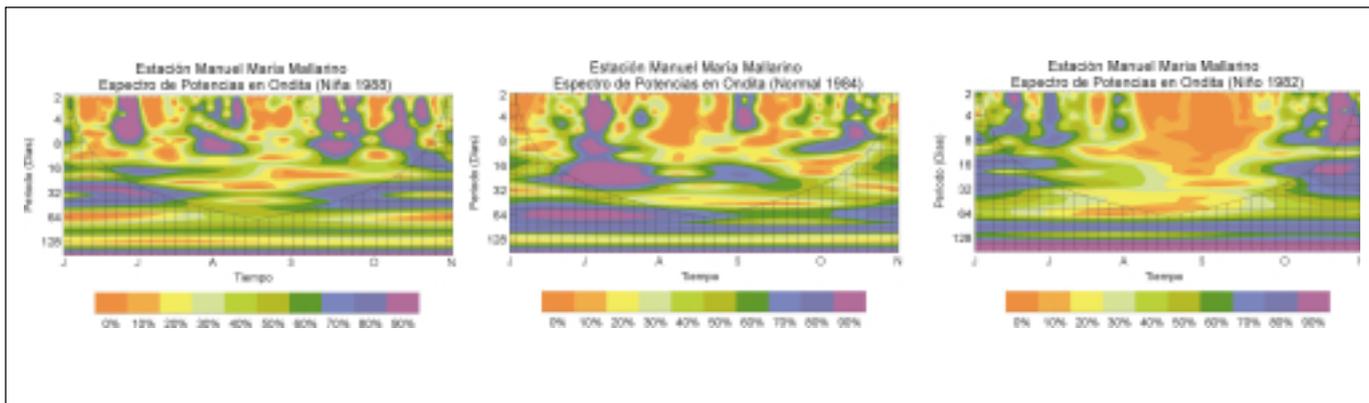


Figura 14. Espectros de potencia localizados, usando la transformada en ondita, para la serie de registros de precipitación diaria en la estación Manuel María Mallarino (ver localización en el texto), durante tres años de diferente fase del fenómeno ENSO. En el eje de las abscisas se muestra el período junio-noviembre en los años de La Niña (1988, izquierda), Normal (1984, centro), y El Niño (1982, derecha). La barra de colores indica la varianza explicada (Agudelo, Arias & Salazar, 2001).

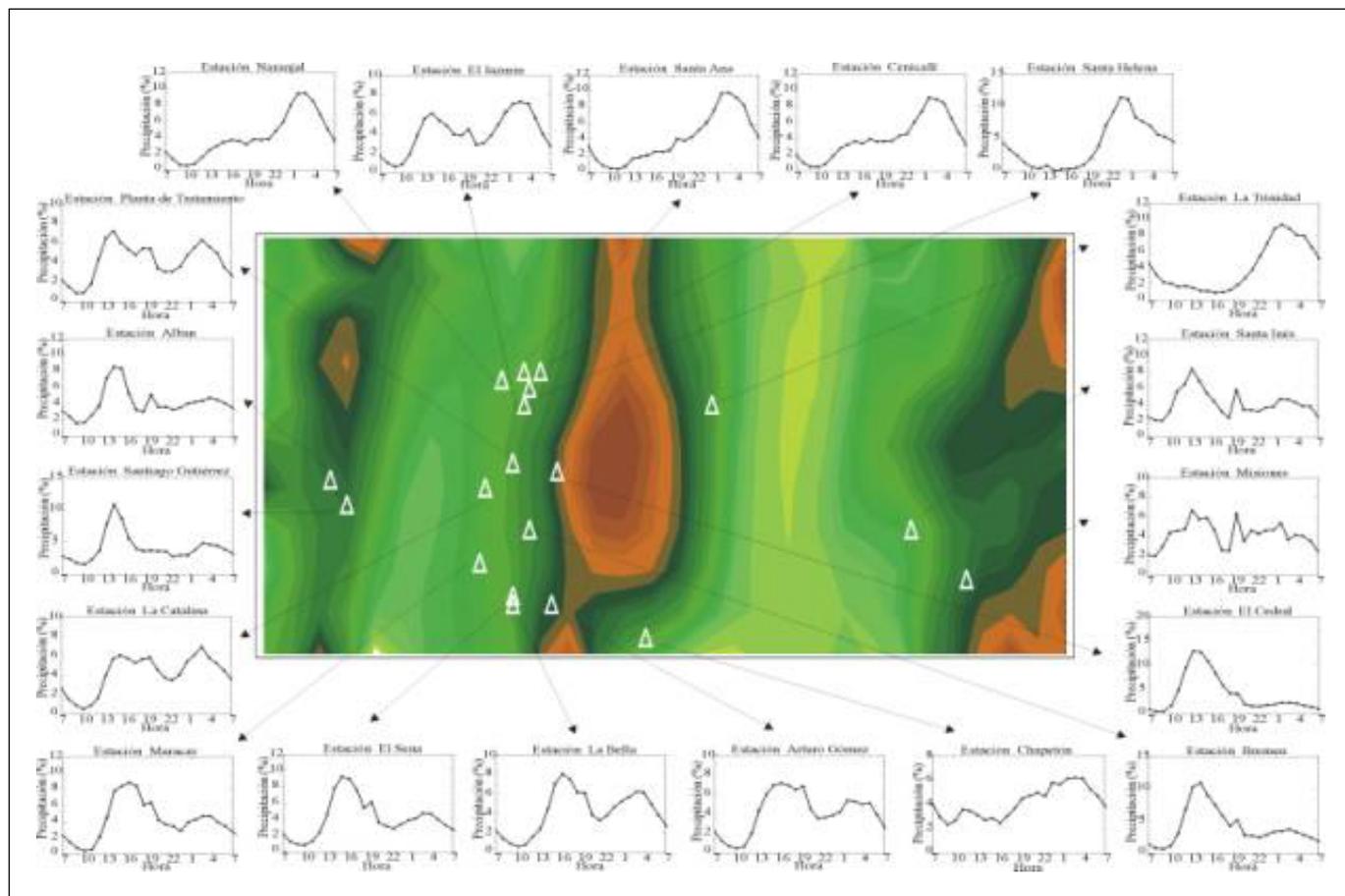


Figura 15. Distribución del ciclo diurno (24 horas desde las 7:00 a.m.) de precipitación promedio de largo plazo, en estaciones localizadas sobre el centro de los Andes tropicales de Colombia. Los colores del mapa corresponden a la topografía de la cordillera central dominando el centro de la gráfica, con los valles de los ríos Magdalena y Cauca a derecha e izquierda, respectivamente. La región está comprendida entre las latitudes 4E27°N y 5E01°N y las longitudes 74E y 76E20°O.

de las bandas de alta frecuencia durante julio-septiembre, lo cual contribuye a explicar los mecanismos físicos por los cuales la precipitación se reduce drásticamente en Colombia durante los eventos de El Niño.

6. Escala Diurna

La amplitud del ciclo diurno de temperaturas es la característica más dominante de la variabilidad climática en el trópico, porque excede en mucho el rango de temperaturas medias del ciclo anual (**Hastenrath**, 1991, p. 6). El ciclo diurno de temperaturas, resultante del ciclo de insolación superficial es un factor fundamental en la formación, desarrollo e intensidad de la convección profunda, mecanismo muy importante en la génesis de la lluvia tropical. El ciclo diurno de la precipitación sobre los Andes tropicales de Colombia ha sido comenzado a estudiar en los trabajos de **Agudelo et al.**, (2001), **Vieira & Moreno** (2001), **Álvarez & Toro** (2001), y **Poveda et al.**, (2002a, 2002b). La Figura 15 despliega los diagramas del ciclo diurno (24 horas desde las 7:00 a.m.) promedio de largo plazo de la precipitación, en sitios localizados sobre los Andes de Colombia. Los diagramas muestran el porcentaje de lluvia que cae a determinada hora del día. De la Figura 15 se desprenden varias conclusiones: (1) el ciclo diurno de las lluvias en Colombia es altamente variable en el espacio; (2) las estaciones exhiben picos unimodales o bi-modales (semi-diurnos), con una influencia muy fuerte de factores locales (**Poveda et al.**, 2003b), y por tanto la búsqueda de patrones regionales coherentes es un reto para la investigación futura. (3) El período comprendido entre las 8:00 a.m. y las 11:00 a.m., es el de menor probabilidad de lluvia en todos los Andes de Colombia. (4) Las estaciones localizadas sobre la vertiente oriental de la cordillera central presentan ciclo diurno uni-modal con precipitaciones de madrugada. (5) El comportamiento del ciclo diurno es variable durante los distintos meses del año, de manera que la uni-modalidad en una estación de registro, durante ciertas épocas del año puede convertirse en bi-modalidad durante otras épocas. Los mecanismos físicos que explican tal comportamiento variable del ciclo diurno tienen que ver con el ciclo diurno de insolación, con procesos de la interacción suelo-atmósfera, con la dinámica diurna de los Sistemas Convectivos de Meso-Escala, y con la circulación de vientos locales y de escala sinóptica, dentro y sobre los valles y vertientes Andinas. Este es un tema de central importancia en el entendimiento de la hidroclimatología de Colombia, sobre el cual merece profundizarse la investigación.

7. Conclusiones

El clima varía de forma natural en todas las escalas temporales, y el cambio ambiental global por acción antropogénica está aumentando la complejidad del sistema climático. Ello confunde y oscurece la capacidad de predicción climática en todas las escalas de espacio y tiempo, pero el entendimiento y predicción de tal variabilidad es un reto central para las ciencias terrestres. Este trabajo ha recorrido algunos aspectos de la variabilidad de la hidro-climatología de Colombia, en un rango de escalas temporales que abarcan desde la escala inter-decadal, dominada por tendencias de largo plazo en las principales variables hidrológicas y climáticas, hasta el ciclo diurno de la precipitación sobre los Andes tropicales. Los fenómenos más importantes que influyen el clima del país a escalas de tiempo interanual se refieren al ENSO y sus dos fases: El Niño y La Niña, pero otros como la Oscilación del Atlántico Norte, y la Oscilación Decadal del Pacífico ejercen un efecto no despreciable, que merece ser entendido en sus interacciones no lineales con el ENSO. El ciclo anual está dominado por la oscilación meridional de la zona de convergencia intertropical, por la dinámica del transporte de humedad por los vientos alisios superficiales del este (**Eslava et al.**, 2002, Revista Academia de Ciencias), así como la circulación de vientos de media y alta atmósfera (**Cuartas & Poveda**, 2002). Estos interactúan con la dinámica de transporte de humedad por los vientos del Chorro del Chocó, y éste a su vez con el ciclo diurno inherente a los Sistemas convectivos de meso-escala, tanto oceánicos como sobre tierra (**Mejía & Poveda**, 2002). La escala intra-anual está fuertemente influenciada por las oscilaciones intra-estacionales de 30-60 días, por las ondas tropicales del este, por los huracanes, y los frentes fríos de altas latitudes.

El clima y el tiempo atmosférico tropicales no sólo responden a fenómenos macro-climáticos, a fenómenos de meso-escala o de escala sinóptica. Esta es una visión muy parcial y limitada que se debe superar, dadas las reducidas escalas espaciales y la importancia de la escala vertical en los mecanismos de convección profunda que dominan la lluvia tropical. Un tema central hacia el futuro es el entendimiento a fondo del papel que juega la interacción suelo-atmósfera en el clima de Colombia, y el papel de control climático que juega la humedad de suelo, y la evapotranspiración para alimentar la precipitación tropical. La precipitación reciclada está entre el 30% y 40% sobre Colombia (**Cuartas & Poveda**, 2002), pero este resultado debe ser entendido en el marco de las distintas escalas espaciales. Este tema es fundamental para entender los balances de agua, energía y Carbono sobre el bosque tropical lluvioso de la Amazonia y del Darién-

Chocó, así como del bosque tropical Andino. Además, estos factores son centrales para poder entender la altísima variabilidad identificada en el ciclo diurno de la precipitación sobre los Andes de Colombia. Es necesario insistir en la necesidad que el IDEAM establezca un programa de medición de la atmósfera Colombiana, que sea acorde con la complejidad de la circulación atmosférica sobre la geografía de Colombia, en particular sobre las regiones Andina, Amazónica y Pacífica.

Agradecimientos

A la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, por el alto honor de designarme como Miembro Correspondiente. Esta síntesis es resultado de investigaciones realizadas durante la última década, y ha sido posible gracias a la colaboración y enseñanzas de muchos colegas y estudiantes. Entre ellos, debo reconocer los valiosos aportes de Óscar José Mesa, Jaime Ignacio Vélez, Jesús Eslava, Álvaro Jaramillo, Edgar Montealegre, Stefan Hastenrath, Cécile Penland, Henry Díaz, Peter Waylen, Vijay Gupta, Brian Mapes, Bruce Milne, Andrés Ochoa, Carlos Ariel Pérez (q.e.p.d.), Luz Adriana Cuartas, John Freddy Mejía, Carlos David Hoyos, Marta María Gil, Natalia Quiceno, Ricardo Mantilla, Claudia Rave, Hernán Moreno, Sara Cristina Vieira, Paola Andrea Arias, Luis Fernando Salazar, Paula Andrea Agudelo, Vladimir Toro, Manuel Zuluaga, y Ángela María Rendón.

Bibliografía

- Agudelo P. A., P. A. Arias, & L. F. Salazar**, 2001. Caracterización del ciclo diurno de precipitación en los Andes Tropicales de Colombia, Región Centro, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Álvarez J. F. & V. G. Toro**, 2001. Caracterización del ciclo diurno de precipitación en los Andes Tropicales de Colombia, Región Norte, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Arnett, A. B. & C. R. Steadman**, 1970. Low-level wind flow over eastern Panama and northwestern Colombia, ESSA Technical Memorandum ERLTM-ARL 26, U. S. Department of Commerce, Air Resources Lab., Silver Spring, Maryland, 73 pp.
- Barry, R. G. & A. M. Carleton**, 2001. Synoptic and Dynamic Climatology, Routledge, Londres, 620 pp.
- Battisti, D. S., & B. Sarachick**, 1995. Understanding and predicting ENSO, *Rev. Geoph.* (33): 1367-1376.
- Carvajal, L. F., J. E. Salazar, O. J. Mesa, & G. Poveda**, 1998. Predicción hidrológica en Colombia mediante análisis espectral singular y máxima entropía, *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XIII (1): 7-16.
- Carvajal, Y., H. Jiménez, & H. Materon**, 1998. Incidencia del fenómeno ENSO en la hidroclimatología del valle del río Cauca, Colombia. *Bulletin Institute Francaise d'Etudes Andines*, 27 (3): 743-756.
- Ceballos, A., & G. Poveda**, 2003. Análisis de frecuencia de caudales máximos y mínimos anuales asociados con las fases del ENSO. En preparación. 2003.
- Chan, J. C. L., & J. Xu**, 2000. Physical mechanisms responsible for the transition from a warm to a cold state of the El Niño-Southern Oscillation, *J. Climate*, 13 (12): 2056-71.
- Chang, C.**, 1970. Westward propagating cloud patterns in the tropical Pacific as seen from time-composite satellite photographs, *Jour. Atmos. Sci.*, 27: 133-138.
- Cuartas, L. A.**, 2001. Balance atmosférico de humedad para Colombia. Tesis M. Sc. no publicada. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- & **G. Poveda**, 2002. Balance atmosférico de humedad y estimación de la precipitación reciclada en Colombia según el Reanálisis NCEP/NCAR. *Meteorología Colombiana*, 5: 49-57.
- Díaz, H. F., & V. Markgraf (eds.)**, 2000. El Niño and the Southern Oscillation. Multiscale Variability and Global and Regional Impacts, Cambridge University Press, 183-204.
- Eltahir, E. A. B., & R. L. Bras**, 1994. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120: 861-880.
- Federov, A. V. & G. S. Philander**, 2000. Is El Niño changing? *Science*, 288 (5473): 1997-2002.
- Foufoula-Georgiou, E., & P. Kumar**, 1994. Wavelets in Geophysics, Academic Press, 372 p.
- Gil, M. M., & N. Quiceno**, 1997. La influencia del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur sobre el ciclo anual de la hidroclimatología de Colombia, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Glantz, M.**, 2000. Currents of Change: Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society, Cambridge University Press.
- & **co-autores (eds.)**, 1991. Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies, Cambridge Univ. Press, 257-284.
- Gray, W. M. y J. D. Sheaffer**, 1991. El Niño and QBO influences on tropical cyclone activity. En: Glantz, M. y co-autores (eds.), Teleconnections linking worldwide climate anomalies Cambridge University Press, Cambridge, 257-284.
- Hastenrath, S.**, 1991. Climate Dynamics of the Tropics, Kluwer, Dordrecht, 488 pp.
- Hoyos, C.**, 1999. Algunas aplicaciones de la transformada de Fourier y la descomposición en ondas a señales hidrológicas y sísmicas. Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2000. Third Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kalnay, E., M. Kanatmisu., R. Kistler & co-autores**, 1996. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 77: 437-470.

- Lau, K. M., & P. H. Chan**, 1988. Intraseasonal and interannual variations of tropical convection: A possible link between 40-50 day oscillation and ENSO?, *J. Atmos. Sci.*, 506-521.
- López, M. E.**, 1966. Cloud seeding trials in the rainy belt of western Colombia. *Water Resour. Res.*, 2: 811-823.
- & W. E. Howell**, 1967. Cloud seeding at Medellín, Colombia, during the 1961-64 dry seasons, *J. Appl. Met.*, 4:54-60.
- Lovelock, J.**, 2000. *Gaia. The practical science of planetary medicine.* Oxford University Press, New York, 192 pp.
- Madden, R. A., & P. R. Julián**, 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, 28: 702-708.
- . 1972. Description of global scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period, *J. Atmos. Sci.*, 29: 1109-1123.
- Mapes, B.E., T. T. Warner, M. Xu, & Negri, A.** 2003. Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part I: Observations and context, *Mon. Wea. Rev.*, 131: 799-812.
- Martínez, M. T.**, 1993. Principales sistemas sinópticos en Colombia y su influencia en el comportamiento del tiempo, *Atmósfera*, 16: 1-10.
- Mejía, J. F., & G. Poveda**, 2003a. Diagnóstico de la precipitación sobre Colombia y el Pacífico oriental durante 1998 mediante datos satelitales de la Misión TRMM. Parte I: Clasificación de sistemas convectivos de mesoescala. En preparación.
- . 2003b. Diagnóstico de la precipitación sobre Colombia y el Pacífico oriental durante 1998 mediante datos satelitales de la Misión TRMM. Parte III: Ambientes atmosféricos de sistemas convectivos de mesoescala. En preparación.
- Mesa, O. J., G. Poveda, & L. F. Carvajal**, 1997a. Introducción al Clima de Colombia, Imprenta Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 390 pp.
- Mesa, O. J., G. Poveda, & L. F. Carvajal**, 1994a. Predicción hidrológica usando redes neuronales, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, 3: 385-396.
- Mesa, O. J., G. Poveda, L. F. Carvajal & J. E. Salazar**, 1994b. Efecto del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur en la hidrología Colombiana, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile 3: 373-384.
- Mesa, O. J., G. Poveda, L. F. Carvajal & J. E. Salazar**, 1997b. Reservoir reliability design under interannual climatic and hydrologic variability. En: *Managing Water: Coping with scarcity and abundance*, Amer. Soc. Civil Eng., San Francisco, USA, 470-476.
- Mo, K. C., & V. E. Kousky**, 1993. Further analysis of the relationship between circulation anomaly patterns and tropical convection. *Jour. Geoph. Res.*, 98, D3: 5103-5113.
- Montealegre, J. E.**, 1996. Análisis del comportamiento de la precipitación en Colombia durante los períodos de ocurrencia de los fenómenos ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) y el anti-Niño, Memorias IV Congreso Colombiano de Meteorología, Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá, 157-169.
- & **J. D. Pabón**, 1992. Características climáticas relevantes durante la ocurrencia de fenómenos ENOS en el nor-occidente suramericano, HIMAT, Bogotá.
- & ———, 2002. Seguimiento, diagnóstico y predicción climática en Colombia, *Meteorología Colombiana* 5: 59-65.
- Morton F.**, 1978. Estimating evapotranspiration from potential evaporation: Practicality of an iconoclastic approach. *J. Hydrol.*, 38: 1-32.
- . 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *J. Hydrol.*, 66: 1-76.
- Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B da Fonseca, & J. Kent**, 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities, *Nature*, 403: 853-858.
- Neelin, J. D., D. S. Battisti, A. C. Hirst, F.-F. Jin, Y. Wakata, T. Yamagata, & S. E. Zebiak**. 1998. ENSO theory, *J. Geoph. Res.*, 103 (7): 14261-90.
- Neelin, J. D., F.-F. Jin, & H.-H. Syu**, 2000. Variations in ENSO phase locking, *J. Climate*, 13 (14): 2570-90.
- Nieuwolt, S.**, 1977. *Tropical Climatology*, John Wiley, New York, 207 p.
- Ochoa, A., & G. Poveda**, 2003. Diagnostics of the spatial distribution of climate change signals in Colombia's hydrometeorology, En preparación.
- Oster, R.**, 1979. Las precipitaciones en Colombia, *Colombia Geográfica*, 4 (2): 144.
- Pérez, C. A., G. Poveda, O. J. Mesa, L. F. Carvajal, & A. Ochoa**, 1998. Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual, *Bulletin Institute Francaise d'Etudes Andines*, 27 (3): 537-546.
- Philander, S. G. H., D. Gu, D. Halpern, G. Lambert, N.-C. Lau, T. Li, & R. C. Pacanowski**, 1996. Why the ITCZ is mostly north of the equator? *J. Climate*, 9 (12): 2958-2972.
- Piersig, W.**, 1936. Schwankungen von luftdruck und luftbewegung sowie ein beitrage zum wettergeschehen im passatgebiet des ostlichen nordatlantischen ozeans, *Archiv der Deutschen Seewarte*, 54 (6): 41.
- Poveda, G.**, 1994a. Funciones Ortogonales Empíricas en el análisis de la relación entre los caudales medios en Colombia y las temperaturas de los océanos Pacífico y Atlántico, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, 4: 131-144.
- . 1994b. Cuantificación del efecto de El Niño y La Niña sobre los caudales en Colombia, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, 107-117.
- . 1996. Modulación de la hidroclimatología de Colombia por el ENSO y otros fenómenos de gran escala, Trabajo de promoción a Profesor Asociado, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

- _____.1997. ¿Atractores extraños (Caos) en la hidro-climatología de Colombia? *Rev. Acad. Col. Cienc.*, **21** (81): 431-444.
- _____.1998. Retroalimentación dinámica entre el fenómeno ENSO y la hidrología de Colombia. Tesis Ph. D., Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- _____.2002. El chorro del Chocó y su influencia sobre la hidroclimatología de la costa Pacífica y el occidente de Colombia, En: Correa, I. D., & J. D. Restrepo (eds.), *Geología y Oceanografía del delta del Río San Juan*, Fondo Editorial Universidad Eafit, Medellín, 169-187.
- _____ & **A. Jaramillo**, 2000. ENSO-related variability of river discharges and soil moisture in Colombia, *Biospheric Aspects of the Hydrologic Cycle*, IGBP, (8): 3-6.
- _____ & **J. F. Mejía**, 2003a. Diagnóstico de la Precipitación sobre Colombia y el Pacífico Oriental durante 1998 mediante datos satelitales de la Misión TRMM. Parte II: Análisis del ciclo diario. En preparación.
- _____ & **J. F. Mejía**, Diagnóstico de la Precipitación sobre Colombia y el Pacífico Oriental durante 1998 mediante datos satelitales de la Misión TRMM. Parte IV: Patrones de escalamiento espacial. En preparación.
- _____ & **O. J. Mesa**, 1993. Metodologías de predicción de la hidrología Colombiana considerando el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), *Atmósfera*, **17**, Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá.
- _____.1995. The relationship between ENSO and the hydrology of tropical South America: The case of Colombia, *Proceedings of the Fifteenth Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, Atherton, CA, USA, Hydrology Days Publications, 227-236.
- _____.1996a. Las fases extremas del ENSO - El Niño y La Niña - y su influencia sobre la hidrología de Colombia, *Ingeniería Hidráulica en México*, **XI**, 21-37.
- _____.1996b. La oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la hidroclimatología de Colombia. *Memorias XVII Seminario Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Guayaquil, Ecuador, **2**: 343-354.
- _____.1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale oceanic atmospheric phenomena, *J. Climate*, **10**: 2690-2702.
- _____.1999. La corriente de chorro superficial del oeste ("del CHOCÓ") y otras dos corrientes de chorro atmosféricas sobre Colombia: Climatología y variabilidad durante las fases del ENSO, *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **23** (89): 517-528.
- _____.2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet, *Geophysical Research Letters*, **27** (11): 1675-1678. June 1.
- _____ & **C. Penland**, 1994. Predicción de caudales medios en Colombia usando modelación Lineal Inversa, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, **4**: 119-129.
- _____ & **W. Rojas**, 1996. Impacto del fenómeno El Niño sobre la intensificación de la malaria en Colombia. *Memorias XII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bogotá, 647-654.
- _____.1997. Evidencias de la asociación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur, *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **21** (81): 421-429.
- _____, **R. A. Smith**, & **O. J. Mesa**, 1995. La hidrología de Colombia frente a fenómenos de escala global: ENSO, calentamiento global y deforestación. *Memorias XVI Congreso Colombiano de Ingeniería Especializada*, ACIEM, Medellín.
- _____, **M. M. Gil**, & **N. Quiceno**, 1998. El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO, *Bulletin Institute Francaise d'Etudes Andines*, **27** (3): 721-731, 1998.
- _____, **O. J. Mesa** y **P. Waylen**, 2003a. Non-linear forecasting of river flows in Colombia based upon ENSO and its associated economic value for hydropower generation. En: Diaz, H, & B. Morehouse (eds.), *Climate and Water: Transboundary Challenges in the Americas*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 351-371.
- _____, **J. M. Ramírez**, & **A. Jaramillo**, 2001. Modelación estocástica de la variabilidad anual e interanual de la humedad del suelo en Colombia bajo diferente cobertura vegetal. *Memorias IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina.
- _____, **C. C. Rave**, & **R. I. Mantilla**, 2001. Tendencias en la distribución de probabilidades de lluvias y caudales en Antioquia, *Meteorología Colombiana*, **3**: 53-60.
- _____, **O. J. Mesa**, **L. F. Carvajal**, & **J. E. Salazar**, 1994. Lluvias en Colombia: Correlación con el clima del Océano Pacífico y análisis de funciones ortogonales empíricas, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, **4**: 93-105.
- _____, **A. Jaramillo**, **M. M. Gil**, **N. Quiceno**, & **R. Mantilla**. 2001a. Seasonality in ENSO related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index (NDVI) in Colombia, *Water Resources Research*, **37** (8): 2169-2178.
- _____, **N. E. Graham**, **P. R. Epstein**, **W. Rojas**, **M. L. Quiñónez**, **I. D. Vélez**, & **W. J. M. Martens**, 2000. Climate and ENSO variability associated with vector-borne diseases in Colombia. En: Diaz, H.F., y V. Markgraf (eds.), *El Niño and the Southern Oscillation, Multiscale Variability and Global and Regional Impacts*. Cambridge University Press, 183-204.
- _____, **O. J. Mesa**, **P. A. Agudelo**, **J. F. Álvarez**, **P. Arias**, **H. Moreno**, **L. F. Salazar**, **V. Toro**, & **S. Vieira**, 2002a. Influencia del ENSO, oscilación de Madden-Julian, ondas del este, huracanes y fases de la luna en el ciclo diario de la precipitación en los Andes tropicales de Colombia, *Meteorología Colombiana*, **5**: 3-12.
- _____, **O. J. Mesa**, **V. Toro**, **P. A. Agudelo**, **J. F. Álvarez**, **P. Arias**, **H. Moreno**, **L. F. Salazar**, **V. Toro**, & **S. Vieira**, 2002b. Diagnostico del ciclo anual y efectos del ENSO sobre la intensidad máxima de lluvias de duración entre 1 y 24 horas en los Andes de Colombia, *Meteorología Colombiana*, **5**: 67-74.

- , **O. J. Mesa, H. Moreno, S. Vieira, P. A. Agudelo, P. A. Arias, L. F. Salazar, V. Toro & J. F. Álvarez**, 2003b. Diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia. En evaluación.
- , **O. J. Mesa, L. F. Carvajal, C. D. Hoyos, J. F. Mejía, A. Cuartas, & A. Pulgarín**, 2002c. Predicción de caudales medios mensuales en ríos Colombianos usando métodos no lineales. *Meteorología Colombiana*, 6: 101-110.
- , **H. A. Moreno, S. C. Vieira, P. A. Agudelo, P. A. Arias, L. F. Salazar, O. J. Mesa, F. Álvarez, V. Toro, A. Jaramillo, & O. Guzmán**, 2001c. Caracterización del ciclo diario de la precipitación en los Andes tropicales de Colombia. *Memorias IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina, 7-11 de mayo de 2001.
- , **W. Rojas, I. D. Vélez, M. Quiñones, R. I. Mantilla, D. Ruiz, J. Zuluaga, & G. Rúa**, 2001b. Coupling between annual and ENSO timescales in the malaria-climate association in Colombia. *Environ. Health Persp.*, 109: 489-493.
- , **J. I. Vélez, O. J. Mesa, C. D. Hoyos, J. F. Mejía, O. J. Barco, & P. L. Correa**, 2002d. Influencia de fenómenos macro climáticos sobre el ciclo anual de la hidrología Colombiana: Cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, 6: 121-130.
- Riehl, H.**, 1945. Waves in the easterlies and the polar front in the tropics, Dept. Meteor. Univ. Chicago, Misc. Report, No. 17.
- Riehl, H., & J. S. Malkus**, 1958. On the heat balance in the equatorial trough zone, *Geophysica*, 6: 505-538.
- Rosenzweig, C.** (ed.), 2001. Impact of El Niño and Climate Variability on Agriculture. American Society of Agronomy Special Publication #63.
- Smith, R. A., G. Poveda, O. J. Mesa, & C. A. Pérez**, 1996. Análisis de Homogeneidad de series de aportes hidrológicos al sector eléctrico Colombiano, *Memorias XII Congreso Colombiano de Hidrología*, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bogotá.
- Snow, J. W.**, 1976. The climate of northern South America, En: Schwerdtfeger, W. (ed.), *Climates of Central and South America*, Elsevier, Amsterdam, 295-403.
- Torrence, C., & G. P. Compo**, 1998. A practical guide to wavelet analysis, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 79 (1): 61-78.
- Trenberth, K. E.**, 1996. El Niño-Southern Oscillation. En: T. W. Giambelluca & A. Henderson-Sellers (eds.), *Climate Change: Developing Southern Hemisphere Perspectives*, Wiley, New York, pp. 145-173.
- Velasco, I., & M. Frisch**, 1987. Mesoscale convective complexes in the Americas, *Jour. Geoph. Res.*, 92, D8, 9591-9613.
- Vélez, J. I., G. Poveda, & O. J. Mesa**, 2000. Balances Hidrológicos de Colombia, Serie del Posgrado en Recursos Hidráulicos, No. 16, 150 pp.
- Vélez, J. I., G. Poveda, O. J. Mesa, C. D. Hoyos, L. F. Salazar, & J. F. Mejía**, 2002a. Modelo de interacción suelo-atmósfera para la estimación de caudales medios mensuales en Colombia, *Meteorología Colombiana*, 6: 81-89.
- Vélez, J. I., O. J. Mesa, G. Poveda, A. F. Borja, J. M. Ramírez, O. O. Hernández, J. A. Urzola, & P. A. Arias**, 2002b. HidroSIG Java: Una herramienta para la visualización de datos hidroclimatológicos, *Meteorología Colombiana*, 6: 65-71.
- Vieira S. C., & H. A. Moreno**, 2001. Caracterización del ciclo diario de precipitación en los Andes tropicales de Colombia. Región Sur, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Waylen, P. R., & C. N. Caviedes**, 1986. El Niño and annual floods on the northern Peruvian littoral, *J. Hydrol.*, 89: 141-156.
- , & **G. Poveda**, 2002. El Niño-Southern Oscillation and aspects of western South America hydro-climatology, *Hydrol. Proc.*, 16: 1247-1260.
- Webster, P. J., & J. Fasullo**, 2000. Atmospheric and surface variations during westerly windbursts in the tropical western Pacific, *Quart. J. Royal Met. Soc.*, 126: 899-924.
- Weickmann, K.**, 1991. El Niño/Southern Oscillation and Madden-Julian (30-60 day) oscillations during 1981-1982, *Jour. Geoph. Res.*, 96: 3187-3195.
- White, W. B., & D. R. Cayan**, 2000. A global El Niño-Southern Oscillation wave in surface temperature and pressure and its interdecadal modulation from 1900 to 1997, *J. Geoph. Res.*, 105 (C5): 11223-11242.
- Zebiak, S.E.**, 1989. On the 30 60 day oscillation and the prediction of El Niño, *J. Climate*, 2: 1381-1387.
- Zuluaga, M. D., J. E. Posada, & G. Poveda**, 2001. Relación entre las fases de la oscilación cuasibienal (QBO), la precipitación mensual y la radiación de onda larga emergente en Colombia. *Memorias IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina.

DIVERSIDAD TAXONÓMICA Y ECOLÓGICA DE LA ENTOMOFAUNA MICÓFAGA EN UN BOSQUE ALTOANDINO DE LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA

por

Eduardo C. Amat-García¹, Germán D. Amat-García² & Luis G. Henao-M.³

Resumen

Amat-García, E.; G. Amat-García & L. G. Henao-M.: Diversidad taxonómica y ecológica de la entomofauna micófaga en un bosque altoandino de la cordillera Oriental de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (107): 223-231. 2004. ISSN 0370-3908.

Se describe la estructura y composición de la comunidad de insectos micófagos encontrados en robledales (*Quercus humboldtii*) de la región de Iguaque (Villa de Leyva-Boyacá). Durante noviembre del 2000 y julio de 2001 se recolectaron 1778 insectos en estado adulto; en laboratorio se criaron 3409 para un total de 5187 individuos distribuidos en 48 morfoespecies. Se establece una clasificación ecológica de la entomofauna (micófagos primarios, micófagos secundarios detritívoros y depredadores) dada por el grado de dependencia al hongo, selección de hospederos y nivel trófico. Se estudia el efecto de la organización de la comunidad de insectos con respecto a factores como tamaño y estado de desarrollo del hongo. La comunidad de insectos estudiada se ajusta al modelo clásico de distribución Log normal y es la más rica en especies si se compara con otros estudios realizados en Colombia. La abundancia de insectos es afectada principalmente por el estado de desarrollo del hongo y tamaño. La riqueza de especies es afectada por el estado de desarrollo del hongo.

Palabras clave: Insectos, hongos, micófagos, comunidad, biodiversidad, Colombia.

Abstract

We describe the structure and composition of the mycophagic insect community of oak woods (*Quercus humboldtii*) in Boyaca-Colombia. From november 2000 to july 2001, 1778 adults insects

1 Biólogo Pontificia Universidad Javeriana. edamat@hotmail.com

2 Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. gamat@ciencias.unal.edu.co

3 Red de Micología-COLOMBIA. Luisenao@cable.net.co

were found and other 3409 were reared in the lab for a total of 5187 insects, belonging to 48 morphospecies, found in 309 fruiting bodies. An insect ecological classification for this fauna (primary mycophagous, secondary mycophagous, detritivorous and predators) is proposed based on the degree of insect dependency on fungi, host selection and tropic level. The effect of fungi size and state of fungi development on the community structure is estimated. The community shows a classical log-normal distribution model. It is the richest community in insect species compared to as other studies in this Country. Insect abundance is modified by fungi size and fungi development state. The richness of species is mainly modified by fungi development state.

Key words: Insects, fungi, mycophagous, community, biodiversity, Colombia.

Introducción

Hongos e insectos hacen parte del grupo de organismos megadiversos del planeta (Cowell & Coddington, 1994); entre ellos existe una variada gama de relaciones, desde los hongos entomopatógenos, cuya dependencia es obligatoria por insectos como recurso alimentario, hasta la estricta dependencia de los insectos por hongos para el mismo fin (Wilding, 1989).

El consumo de alguna estructura fúngica como micelio, cuerpos fructíferos y esporas por un insecto se define como micofagia (Lawrence, 1989). La micofagia es la principal relación que se establece entre insectos y carpóforos de macromicetos; también es la encargada de moldear las características de la interacción entre estos dos grandes taxones. En carpóforos, especialmente del phylum Basidiomycotina, se ha caracterizado una fauna particular de insectos micófagos principalmente representada por los órdenes Diptera y Coleoptera.

Algunos autores consideran este patrón de alimentación como una situación análoga con la herbivoría. Hanski (1989) plantea similitudes y diferencias entre plantas y hongos frente a sus interacciones con los insectos; la inmovilidad, la presencia de sustancias tóxicas y la falta de defensas físicas son condiciones similares, sin embargo la escasa duración temporal y los impredecibles patrones espaciales en los hongos hacen que los insectos micófagos se vean enfrentados a problemas muy diferentes, estas condiciones afectan la ecología y la evolución de los insectos asociados (Ashe, 1987; Leschen, 1994). Debido a las diferencias en la persistencia temporal y en la consistencia estructural, existen claras diferencias entre la fauna de insectos de los Agaricales y la de los Aphyllporales, en general, los insectos asociados a hongos exhiben un alto grado de generalismo (Hanski, 1989).

Se presenta aquí una aproximación al conocimiento de las comunidades de insectos micófagos de Colombia, además de considerar algunos factores que afectan esta

relación, teniendo como especial recurso la micota en bosques de roble, estos ambientes son altamente ricos en macromicetos, especialmente Agaricales (Mueller & Halling, 1995).

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se halla localizada geográficamente entre los 5° 39' y 5° 42' latitud norte y 73°20' y 73°24' longitud oeste, a 2700 m.; está situada en la vereda Capilla, municipio de Villa de Leyva, Boyacá, Colombia. Pertenecce a la zona subhúmeda, donde predomina un régimen bimodal con dos picos de precipitación y una marcada temporada seca. El área corresponde a la zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo (BhMB), conformando un paisaje de pajonales y de matorrales cuya vegetación arbustiva está dominada por *Macleania rupestris*, *Escallonia myrtilloides*, *Pentacalia* spp, *Gaiadendrom* sp y *Bucquetia glutinosa*. La vegetación arbórea está dominada por *Clusia* spp. y *Quercus humboldtii* (Shutze, 1999).

Muestreo y cría

Entre noviembre de 2000 y julio del 2001 se realizaron 12 salidas de campo con muestreos en una área control de robledal de aproximadamente 10 Ha. Durante los recorridos de muestreo se colectaron los carpóforos o cuerpos fructíferos de los macromicetos encontrados. Para cada carpóforo se utilizó un envase plástico garantizando así el confinamiento de larvas y adultos de los insectos presentes.

En el laboratorio se separaron los hongos de acuerdo con su estado de desarrollo. Una vez separados los hongos se completó la información con el examen de las muestras, características físicas, color, altura, diámetro del píleo, presencia, número de insectos por morfoespecie y estado de desarrollo. En la preparación de las muestras de hongos se disectó una parte del carpóforo; esta se introdujo

en un sobre de papel y se secó en horno para muestras botánicas a una temperatura aprox. de 25°, este manejo permite la preservación de la muestra para su posterior determinación taxonómica.

Para la cría de insectos se utilizaron cámaras de cría compuestas de recipientes de vidrio de boca ancha con una capa aséptica de tierra negra (hasta formar una capa de aprox. de 2 cm); este último sustrato se incorporó con el fin de albergar los insectos que después de alimentarse del tejido fúngico buscan suelo para seguir su desarrollo al estadio de pupa. El montaje está cubierto por una malla de nylon. Cada hongo se localizó en el interior sobre la capa de tierra, y se cerró herméticamente con la malla o el tapón; el montaje se almacenó en un lugar oscuro y seco, debido al comportamiento fotofóbico de las larvas y también para evitar la contaminación por hongos.

Periódicamente se revisaron las cámaras de cría para extraer los nuevos adultos que emergían; estos se registraron y cuantificaron. Cada cámara se mantuvo por dos meses después de su montaje. Los individuos colectados en campo y obtenidos por cría se preservaron en alcohol al 70% y fueron depositados en la Colección de Entomología del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia.

Análisis de los datos

Para determinar la estructura de la comunidad a partir de las distribuciones de abundancia de las especies se consideró el número de individuos por especie y se conformaron clases de abundancia con sus respectivos modelos gráficos. Los datos resultantes de la comunidad fueron procesados de acuerdo con los modelos: serie Logarítmica, log Normal y palo quebrado.

Para establecer el modelo de abundancia al cual se ajustan los datos, fueron ejecutadas sus respectivas pruebas de bondad de ajuste χ^2 ; esta prueba confirma si las frecuencias observadas están suficientemente próximas a las esperadas conforme a la H_0 ; en este caso H_0 = los datos muestreados se ajustan al modelo de distribución de abundancias.

Para calcular el número de especies esperadas en la comunidad se utilizaron estimadores no paramétricos Chao 1 y Chao 2, además de ACE que es un estimador de riqueza de especies basado en la abundancia e ICE basado en la presencia/ausencia de la especie (Coddington, 2000).

Se utilizó el programa estadístico EstimateS 6.0 b (Cowell, 2000) que adopta un algoritmo para estimar el

promedio de la tasa a la cual las especies han sido colectadas. Finalmente, se construyó la curva de acumulación de especies, además de los modelos gráficos derivados de Chao 1, Chao 2, ICE y ACE generados por el programa. Se interpretó el comportamiento de las curvas de especies observadas, de únicos (singletons), de duplicados (doubletons) y el cálculo de los estimativos no paramétricos para deducir qué tan representativa es la entomofauna bajo las condiciones del muestreo adoptado.

Para comparar la riqueza de esta fauna con otros trabajos similares se utilizó el método de Rarefacción (Simberloff citado por Stiling, 1996). Se comparó la riqueza obtenida por Gutiérrez (1998) en Bosques de roble en Antioquia, Whertheim *et al.* (2000) para bosques deciduos y de coníferas en Dwingelderveld-Holanda y Hackman & Meinander (1979) en Finlandia, para un tamaño de muestra de 2000 individuos.

Con el propósito de establecer las relaciones entre insectos-hongos y la preferencia de hospederos, se cuantificaron las frecuencias de las familias de insectos encontrados en las diferentes familias de hongos hospederos y los datos se sometieron a un Análisis de Correspondencia Simple. El Análisis de Correspondencia Simple nos permite hacer una descripción de los perfiles o distribuciones condicionales en la relación insectos-hongos, representadas en un plano factorial; este modelo gráfico indica que una proximidad entre puntos se puede interpretar como una dependencia estadística (χ^2); este método analítico permite obtener información acerca de la relación entre hongos hospederos y sus insectos micófitos asociados.

A partir de las cuantificaciones obtenidas del Análisis de Correspondencia se aplicó un Análisis de Agrupamiento, el cual congrega a hongos e insectos en grupos, de tal forma que sea homogénea la distribución de insectos (en términos de composición y abundancias) con respecto a los hongos. El análisis también agrupa homogéneamente la distribución de hongos hospederos (en términos de selección de hospedero) con respecto a los insectos encontrados dentro de los grupos.

Según las preferencias por el hospedero, el grado de dependencia por el hongo y su permanencia en este durante su desarrollo, la entomofauna se dividió en cuatro categorías tróficas:

- **Fungívoros primarios:** insectos cuya asociación con el hongo es obligada, exhiben una leve preferencia por algunos grupos de hongos, tienden a presentarse en los primeros estadios del hongo aunque es común

también encontrarlos en estados más desarrollados de maduración.

- **Fungívoros Secundarios:** insectos cuya asociación no es del todo dependiente; se encuentran principalmente en los últimos estados de desarrollo del hongo especialmente cuando este inicia su proceso de descomposición.
- **Detritívoros:** se alimentan de una amplia variedad de material orgánico en descomposición incluyendo hongos, al igual que los fungívoros secundarios, se encuentran en los últimos estados avanzados de desarrollo del hongo.
- **Predadores:** este grupo se alimenta principalmente de los individuos inmaduros de los grupos anteriormente descritos; en esta categoría se incluyen los insectos que conforman el último escalón de la cadena trófica incluyendo insectos parasitoides.

Teniendo en cuenta el modelo clásico área-especies (**Mac Arthur & Wilson**, 1967) en el que se relaciona el tamaño de una isla y su número de especies, se cuantificó análogamente la relación entre el tamaño del carpóforo y abundancia y riqueza de especies de la entomofauna presente.

Se calculó el volumen aproximado del hongo teniendo en cuenta el diámetro del píleo y la altura del estípite como si este fuera un cilindro; a este valor se le restó un cuarto del total del volumen y se obtuvo un volumen final que representa una aproximación al volumen verdadero del hongo. El volumen calculado fue utilizado como un índice del tamaño del hongo y el cual permitió comparar las variables. Por medio del coeficiente r de correlación de Pearson se compararon las variables tamaño-riqueza de especies y tamaño-abundancia.

En la evaluación del efecto del estado de desarrollo del hongo sobre la abundancia de la entomofauna se comparó la abundancia relativa de insectos para cada uno de los siguientes estados de desarrollo:

- **Estado 1:** Carpóforos inmaduros, con el píleo poco extendido y el himenio en ocasiones cubierto por el velo, fase previa a la maduración.
- **Estado 2:** Carpóforos maduros, píleo extendido. fase de liberación de esporas por primera o única vez.
- **Estado 3:** Carpóforos en descomposición después de la liberación de esporas. Húmedos o secos.
- **Estado 4:** Carpóforos en descomposición, húmedos o secos formando parte de los componentes del suelo.

Se realizó un análisis de varianza y la prueba de agrupamiento de Duncan para establecer las diferencias dentro del mismo estado de desarrollo del hongo y entre los cuatro estados de desarrollo. También se evaluó el efecto de cada estado de desarrollo con respecto a la riqueza de especies por medio del análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Kruskal-Wallis.

Resultados

Relación especies/ abundancia

Se encontraron 1778 individuos en estado adulto y en laboratorio se criaron otros 3409 para un total de 5187 insectos distribuidos en 48 morfoespecies, 21 familias y 3 órdenes. Las familias más abundantes son: Drosophilidae, Endomychidae Scatopsidae y Derodontidae; las menos abundantes están representadas por una única especie con un número bajo de individuos.

Se observa que las especies se distribuyen normalmente, según ordenes de abundancia; esto significa la existencia de especies muy abundantes hasta algunas especies muy raras. La figura 1 que relaciona las clases de abundancias con el número de especies por clase describe claramente este patrón.

Se realizaron varias pruebas para determinar el modelo de abundancia que mejor se ajustara con los datos obtenidos. Según metodología planteada por **Magurran** (1988), se examinaron los modelos log normal, logarítmica y palo quebrado utilizando como criterio de bondad de ajuste la prueba de chi-cuadrado (Tabla 1).

Como se observa en la tabla 1, para la muestra de 5187 individuos el valor $X^2 = 10.57$ para $gl=10$ se obtuvo un P

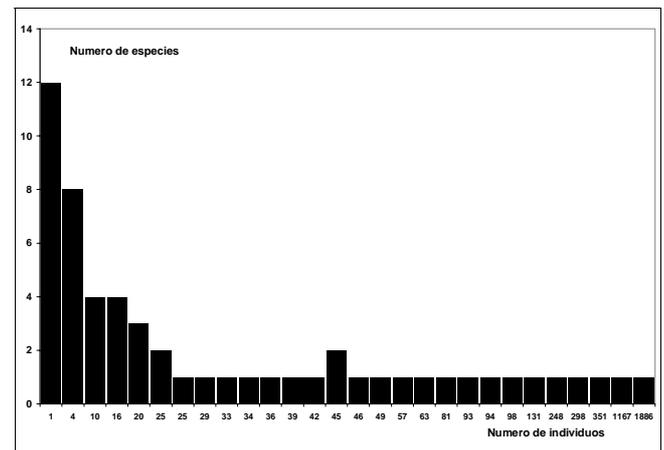


Figura 1. Distribución de abundancias en la comunidad de insectos micófagos de los robledales de Iguaque (Boyacá, Colombia).

Tabla 1. Valores de probabilidad y de prueba de bondad de ajuste a los modelos de distribución de abundancias (log normal, logarítmico y palo quebrado) en la comunidad de insectos micófitos de los robledales de Iguaque (Boyacá, Colombia).

Modelo	GI	χ^2	Valor de P
Log normal	10	10.57	0.47
Logarítmica	10	3143.34	0
Palo quebrado	10	118.37	1,08332E-20

valor = 0.47. Como la probabilidad es mayor que el nivel de significancia fijado ($\alpha=0.05$), no se puede rechazar la H_0 , por lo tanto con los datos obtenidos en este estudio se puede concluir estadísticamente que los datos concuerdan con el modelo de abundancia de especies log normal.

El número de especies encontradas depende principalmente del número de muestras que se hayan tomado, así que las especies más comunes estarán representadas en las primeras muestras y a medida que se incrementa el muestreo es posible que otras especies más raras se añadan a la cuenta; por esta razón la curva de acumulación de especies permite establecer qué tan completo fue el muestreo, además de relacionar una medida de esfuerzo de muestreo con el número acumulado de especies por cada incremento en el esfuerzo; también es útil para comparar la riqueza esperada y la observada (Cowell & Coddington, 1994).

La representación de la curva de acumulación de especies de insectos con respecto al número de hongos colectados, las estimas para ACE, ICE, Chao1 y el comportamiento de las curvas de singletons (únicos) y Doubletons (duplicados) se modelan gráficamente en la figura 2. Las comparaciones bajo la técnica de rarefacción (Simberloff, 1972 citado por Stiling, 1996) con otras entomofaunas de micetócolos indican que en este estudio se alcanzan los más altos valores de diversidad (Figura 3); el trabajo de Hackman & Meinander (1979) en Finlandia registra 112 especies pero se desconoce el número total de individuos.

Bajo la consideración que especies de una misma familia guardan similitud en sus patrones de alimentación, se encontró un total de 25 especies de fungívoros primarios, 13 especies de fungívoros secundarios, 7 especies de detritívoros y 3 especies de depredadores; en este último grupo se incluye una especie de avispa parasitoide (Tabla 2). Al cuantificar cada nivel trófico de acuerdo con la abundancia relativa, los fungívoros primarios mantienen un predominio amplio, con respecto al resto de categorías (Figura 4).

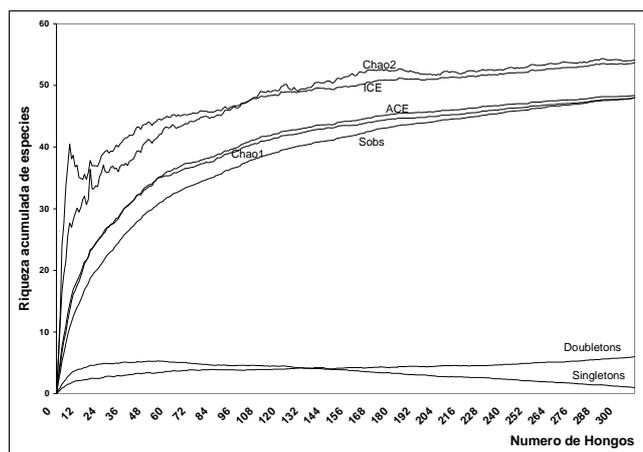


Figura 2. Curva de acumulación de especies (S obs) y curvas para los estimadores no paramétricos de riqueza Chao1, Chao2, ICE y ACE.

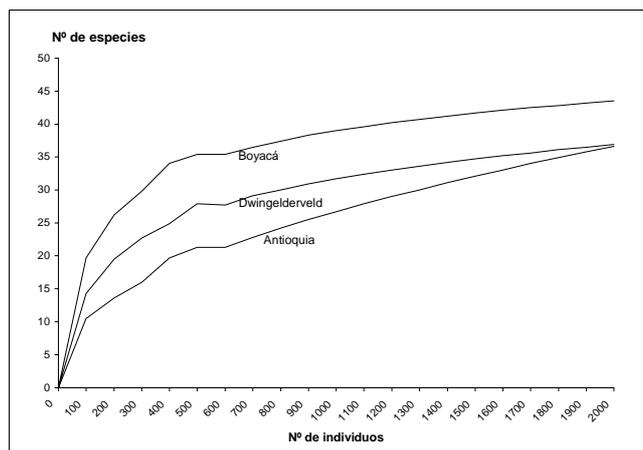


Figura 3. Curvas de rarefacción y estimación de la diversidad de insectos micófitos en bosques de roble de Colombia (Boyacá y Antioquia), comparada con la diversidad en un bosque de zona templada (Dwingelderveld-Holanda).

Selección de hospederos

La ordenación de las familias de insectos y hongos bajo el análisis de correspondencia permitió hacer una descripción de los perfiles o distribuciones condicionales en la relación insecto-hongo.

A partir de la cuantificación obtenida en el análisis de correspondencia, se aplicó el análisis de clusters el cual muestra cuatro grupos bien definidos (Figura 5). El primero lo componen las familias de insectos más estrechamente asociados a la familia Russulaceae, grupo que se caracteriza por la mayor frecuencia de familias de insectos afines (8 familias), el segundo grupo lo componen las

Tabla 2. Caracterización trófica de las familias en la comunidad de insectos micófagos en robledales de Iguaque (Boyaca-Colombia).

Micófagos primarios	Micófagos secundarios	Detritívoros	Depredadores
Drosophilidae	Leiodidae	Pselaphidae	Tachinidae
Mycetophilidae	Psychodidae	Formicidae	Elateridae
Endomychidae	Derodontidae	Anisopodidae	Proctotrupidae
Staphylinidae	Sciaridae	Ceratopogonidae	
	Chloropidae	Muscidae	
	Scatopsidae	Tipulidae	
	Phoridae	Scarabaeidae	

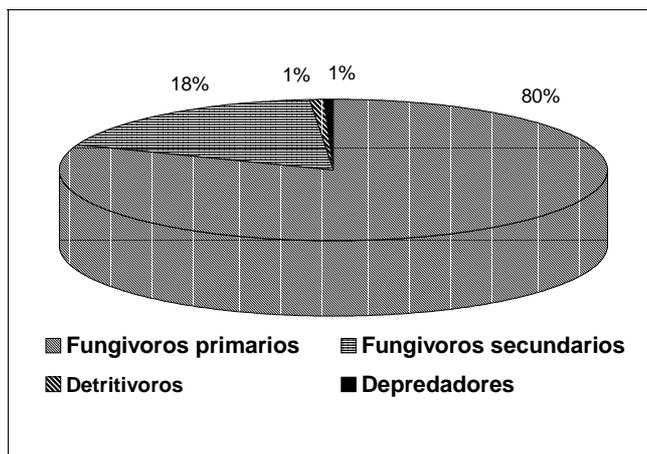


Figura 4. Predominio ecológico de las categorías tróficas según la abundancia relativa de la comunidad de insectos micófagos en robledales de Iguaque (Boyacá, Colombia).

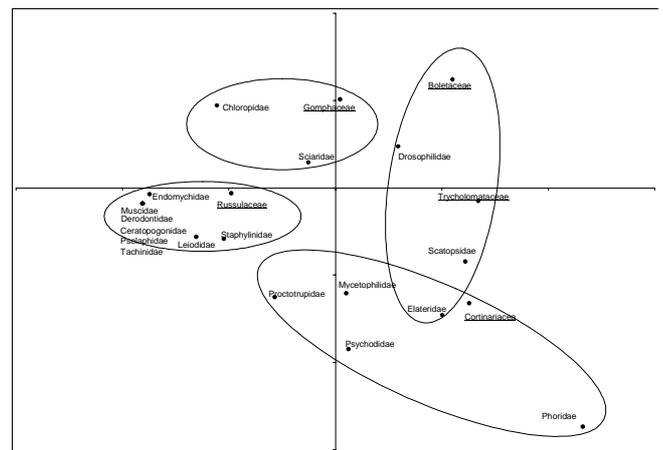


Figura 5. Ordenación de las agrupaciones insecto-hongo más estrechamente relacionados encontrados en la comunidad de insectos micófagos en bosques de roble (Boyacá-Colombia).

familias de insectos más relacionadas con la familia Cortinariaceae (4 familias). Los dos últimos grupos son los compuestos por la familia Trycholomataceae y Boletacea con 3 familias de insectos y Gomphaceae con 2 familias estrechamente asociadas.

Relación área-especies

El modelo clásico de área-especies (MacArthur & Wilson, 1967) no se ajusta en la relación tamaño hongo-riqueza de micetócolos; adicionalmente, los valores del coeficiente de correlación son muy bajos (Tabla 3) esto indica que no hay evidencia estadística para afirmar que haya una relación entre el tamaño del hongo y riqueza y abundancia de insectos micófagos.

Relación estado de desarrollo-diversidad de insectos

El valor de $p > F$ para las fuentes de variabilidad estados de desarrollo del hongo es menor de 0.01, lo cual

Tabla 3. Coeficiente de correlación r de Pearson para abundancia y riqueza de especies de insectos micófagos con respecto al tamaño del hongo.

	Abundancia		Riqueza	
Tamaño	Coeficiente r	0.17175	Coeficiente r	-0.02569
	Valor de P	0.0127	Valor de P	0.7120

indica que con un nivel de significancia del 99% existe evidencia estadística para afirmar que existen diferencias entre las abundancias de los insectos encontrados para cada estado de desarrollo del hongo (Tabla 4). La prueba de comparación de medias de Duncan agrupa los estados 1 y 2, esto indica que entre estos estados de desarrollo no hay diferencia significativa en la abundancia de insectos encontrados. También se puede afirmar que el estado 3 de desarrollo del hongo se asocia con el mayor número de insectos (Tabla 5).

Tabla 4. Análisis de varianza para abundancia de insectos micófagos con respecto al estado de desarrollo de los hongos.

General Linear Models Procedure					
Variable dependiente: Abundancia de insectos micófagos					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr>F
Model	3	2.01286329	0.67095443	13.5	0.0001
Error	44	2.226236770	0.05141745		
Corrected Total	47	4.275230999			

Tabla 5. Agrupación por el test de Duncan para evaluar abundancias de insectos micófagos de acuerdo al estado de desarrollo de los hongos.

Duncan Grouping	Estado de desarrollo	N	Mean
A	3	12	0.54000
B	4	12	0.33380
C	2	12	0.12123
C	1	12	0.00498

Como se registró una baja cantidad de hongos en los estados 1 y 2, en el estudio de varianza y su agrupamiento se asumió como un solo estado de desarrollo; de esta forma el valor de $p > \chi^2$ fue =0.0325, lo que indica una diferencia significativa entre el estado del hongo y la riqueza de especies de insectos. Es consistente afirmar, en consecuencia, que el estado 3 se asocia con el mayor valor de riqueza de insectos asociados. Debido a que se registró una baja cantidad de hongos en estados 1 y 2, en el estudio de varianza y su agrupamiento se asumió como un solo estado de desarrollo; de esta forma el valor de $p > \chi^2$ fue =0.0325, lo que indica una diferencia significativa entre el estado del hongo y la riqueza de especies de insectos (Tabla 6). Es consistente afirmar, en consecuencia, que el estado 3 se asocia con el mayor valor de riqueza de insectos asociados.

Análisis y discusión

De acuerdo a la distribución de las abundancias, la comunidad exhibe una distribución especies-abundancia del tipo log normal; la mayoría de comunidades biológicas se ajustan a este modelo (Krebs, 1985); May (1975) sugiere que este tipo de distribución se debe a un considerable número de especies en la comunidad y que sus abundancias dependen de múltiples factores operando de manera independiente. Algunos de estos factores, como tamaño del hongo y selección del hospedero se discuten en este estudio, sin embargo los patrones temporales, las dinámicas poblacionales, la predación, la competencia intraespecífica, las estrategias de ciclos de vida y los procesos químicos y físicos reguladores de la interacción deben tenerse en cuenta para explicar de manera causal la modelación en cuanto a la composición y estructura de la comunidad identificada en este trabajo.

La modelación gráfica de los estimadores de riqueza describe curvas con comportamientos asintóticos (Figura 2), lo cual indica una baja probabilidad de encontrar más especies de insectos, (Cowell & Coddington, 1994; Coddington, 2000). El comportamiento de los únicos describe un ascenso y luego tiende a 0, la curva de duplicados se presenta un poco retrasada en comparación con los únicos, estos patrones observados permiten concluir que

Tabla 6. Análisis de varianza de Kruskal -Wallis para evaluar la riqueza de especies de insectos micófagos con respecto al tamaño del hongo.

Análisis de varianza para variable: Riqueza					
Clasificación por variable: Estado de desarrollo					
Estado	N	Mean	Among MS	Whitin MS	
1-2	4	7.250000	156.333333	40.694444	
3	4	19.750000	F valor	Prob>F	
4	4	13.250000	3.842	0.0622	
Análisis de Varianza para variable; Riqueza					
Classified by Variable: Estado de Desarrollo					
Estado	N	Sum of scores	Expected Under Ho	Std Dev Ander Ho	Mean Score
1-2	4	11.0	26.0	5.83614651	2.7500000
3	4	36.0	26.0	5.83614651	9.0000000
4	4	31.0	26.0	5.83614651	7.7500000
Kruskall-Wallis Test (Chi-Square Approximation)			CHISQ=6.8505 DF=2		Prob>CHISQ=0.0325

la comunidad se encuentra adecuadamente muestreada (**Coddington**, 2000).

La fauna aquí estudiada es la más rica en especies, resultado que era de esperarse por la situación geográfica, el régimen climático y la diversidad de hábitats en Colombia. La comunidad está dominada por familias de insectos generalistas (*Drosophilidae*, *Sciaridae*, *Scatopsidae* y en menor grado *Mycetophilidae*) que representan el 67% del total de insectos asociados. Este grado de generalismo puede explicarse por una alta presión selectiva hacia este comportamiento y por el bajo costo energético producto de las interacciones insecto-hongo (**Hanski**, 1989).

Existen varias familias poco frecuentes con algún grado de selectividad; estos grupos conforman cuatro claras asociaciones que sugieren una clara conformación de dos subcomunidades, los insectos más estrechamente asociados a hongos de la familia *Russulaceae* y los relacionados con *Cortinariaceae*. *Russulaceae* y *Cortinariaceae* representan familias de órdenes bien diferenciados tanto en su composición química como en sus características ecológicas. Las otras dos agrupaciones son incipientes por sus bajas frecuencias tanto de hongos como de insectos, además están representadas por insectos generalistas de la asociación.

Hanski (1989) plantea dos hipótesis para entender el marcado generalismo en estas comunidades, la primera hace referencia a la estabilidad del recurso, cuando aumenta la estabilidad temporal del hongo disminuye el grado de polifagia y viceversa. La segunda hipótesis se refiere a que las diferencias en la calidad del recurso son mínimas como para hacer uso indistinto del tipo de recurso. La poca estabilidad temporal de los hongos encontrados en este trabajo [*Russula* sp de 4-a 7 días, *Lactarius* sp de 6 a 18 días y *Ramaria* sp de 15 días a un mes, (**Ruiz** com. pers., 2002)] y las asociaciones entre hongos-insectos selectivos y las diferencias químicas entre los grupos de hongos, pueden dar evidencia del cumplimiento de la primera hipótesis.

La gran mayoría de insectos que integra esta relación son micófitos primarios, verdaderos consumidores de hongos tanto en su estado larval como en estado adulto muy pocos insectos con hábitos detritívoros o descomponedores hacen parte de la comunidad, al igual que depredadores o parasitoides la figura representa un modelo simplificado de la estructura trófica de la comunidad.

El modelo área-especies no se ajusta a esta comunidad lo que indica que los insectos hacen uso indiferente de acuerdo con el tamaño del hospedero; son claras las dife-

rencias de la riqueza y abundancia de la entomofauna con respecto a cada categoría de tamaño. Sin embargo se sugiere identificar un grupo de hongos específico para tratar de deducir un patrón más claro. En este estudio la utilización de un solo grupo específico de hongos no hubiese generado la cantidad de datos suficiente para generar alguna conclusión.

El estado de desarrollo juega un papel importante en la relación; podemos afirmar la existencia de tres diferentes estados de desarrollo; con respecto a la diversidad de insectos, el estado I y II pueden considerarse el mismo; el estado de desarrollo preferido para los insectos es el estado III, estado que posiblemente provee una mejor calidad del recurso ya que el tejido fúngico está maduro y aún no se encuentra a disposición de agentes descomponedores.

El conocimiento obtenido en este estudio contribuirá a redefinir hipótesis con respecto al carácter particular de la riqueza y diversidad de los insectos micófitos y a las interacciones insecto-hongo macromiceto en el neotrópico. Una acertada interpretación de las dinámicas de estas comunidades requiere un extenso acervo de datos que incluyan las dimensiones espaciales y temporales (**Devries & Walla**, 2001).

Agradecimientos

Los autores expresan sinceros agradecimientos al Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, al Instituto Alexander von Humboldt y al Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria (Pronatta) del Ministerio de Agricultura; estas instituciones fueron fundamentales para el desarrollo del estudio, especialmente en la fase de laboratorio. A Santiago Grillo por su valiosa colaboración en el análisis estadístico y a Angélica Ruiz por la ayuda en la determinación de muestras fúngicas.

Bibliografía

- Ashe, J.A.** 1987. Egg Chamber production, egg protection and clutch size among fungivorous beetles of the genus *Eumicrota* (Coleoptera:Staphylinidae) and their evolutionary implications. *Zoological Journal of the Linnean Society* 90: 255-273.
- Coddington, J.** 2000. Criterios cuantitativos para el inventario adecuado utilizando estimadores de riqueza. *Memorias 1'er Congreso Colombiano de Zoología*, mayo 12 al 18. I.C.N
- Collwell, R.** 2000 EstimateS, Estatistical estimation of species richness and shared species from Samples. Version 6.01b. University of Connecticut. <http://www.viceroy.eeb.uconn.edu/estimates>.
- Colwell, R. & J. Coddington.** 1994. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. Págs. 1-31. en: *Hawksworth, D.L* (ed.)

- The quantification and estimation of organismal biodiversity. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. Londres.
- Devries, J.P. & T.R. Walla** 2001. Species diversity and community structure in neotropical fruit-feeding butterflies. Biological journal of Linnean Society. 74: 1-15
- Gutiérrez, A.N.** 1998. Entomofauna asociada a Agaricales de bosques de *Quercus humboldtii* en algunos municipios del departamento de Antioquia. Trabajo de Grado (Biólogo) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, carrera de Biología. Medellín 264 p.
- Hackman, W. & M. Meinander.** 1979. Diptera feeding as larvae macrofungi in Finland. Ann. Zool. Fennici 16: 50-83.
- Hanski, I.** 1989. Fungivory: Fungi, Insects and Ecology. Págs. 25-68 en: Wilding, N.M. Collins,
- Hammond, P.M., J.F. Webber (eds.)** Insect – Fungus Interactions. Academic Press. New York.
- Krebs, J.C.** 1985. Ecología-Estudio de la distribución y la abundancia. Harla, S.A. Industria Editorial Mexicana. México D.F. México. 753p.
- Lawrence, J.F.** 1989. Mycophagy in the Coleoptera: Feeding Strategies and Morphological Adaptations. Págs. 1-23 en: Wilding, N.M. Collins, P.M. Hammond, J.F. Webber (eds.) Insect – Fungus Interactions. Academic Press. New York.
- Leschen, R.A.** 1994. Ecological and Behavioral Correlates among Mycophagous Coleoptera. Folia. Entomol. Mex. 92: 9-19
- Mac Arthur, P.H. & E.O. Wilson** 1967 the theory of island biogeography. Princeton University Press.
- Magurran, A.** 1988. Ecological Diversity and Its Measurement. Princeton University Press. Princeton, New Jersey.
- Mueller, G.M. & R.E. Halling** 1995. Evidence for high biodiversity of agaricales (Fungi) in neotropical montane *Quercus* forest 302-313 en: Steven P. Curchill (ed) Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forest, The New York Botanic Garden.
- Stiling, P.D.** 1996. Ecology: theories and applications. Segunda edición. Prentice Hall, New Jersey. 537 p.
- Shutze, K.** 1999. La cobertura vegetal del municipio de Villa de Leyva. Primera edición. Instituto de Investigaciones Biológicas, Alexander Von Humboldt. Villa de Leyva, Boyacá. Colombia.
- Wilding, N.** 1989. Introduction chapter. pág x en: Wilding, N.M. Collins, P.M. Hammond, J.F. Webber (eds.) Insect – Fungus Interactions. Academic Press. New York.
- Wertheim, B., J. G. Sevenster., I.E. Eijs & J. Van Alphen.** 2000. Species diversity in a mycophagous insect community: the case of spatial aggregation vs. resource partitioning. Journal of Animal Ecology 69: 335-351.

HERBIVORÍA EN UNA GIMNOSPERMA ENDÉMICA DE COLOMBIA, *ZAMIA ENCEPHALARTOIDES* (ZAMIACEAE) POR PARTE DE *EUMAEUS* (LEPIDOPTERA: LYCAENIDAE)

por

Favio González¹

Resumen

González, F.: Herbivoría en una gimnosperma endémica de Colombia, *Zamia encephalartoides* (Zamiaceae) por parte de *Eumaeus* (Lepidoptera: Lycaenidae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (107): 233-243, 2004. ISSN: 0370-3908.

Zamia encephalartoides (Zamiaceae), endémica de un enclave andino seco en Colombia, es conocida a partir de pocas poblaciones en áreas intervenidas y geológicamente inestables, por lo cual está en riesgo de extinción. Se documenta por primera vez en Colombia la herbivoría de la mariposa *Eumaeus* cf. *minijas* Huebn. (Lycaenidae) en esta planta. Hay alta frecuencia de juveniles en hojas y conos tanto poliníferos como ovulíferos; la mariposa emplea hojas, esporofilos y semillas como sitios de oviposición, como alimento en los estados larvarios y como sustrato para las crisálidas. Las posturas constan de numerosos huevos. Las orugas son aposemáticas, gregarias y se alimentan exclusivamente de esta planta, por lo cual deben haber desarrollado tolerancia y mecanismos de asimilación de los compuestos tóxicos de *Zamia*. En cámara de cría, el ciclo de huevo a emergencia del imago duró ca. 50 días. El alto número de hojas producidas por estación hace poco probable que ocurra daño significativo o riesgo inminente por efecto de herbivoría en *Z. encephalartoides*. No se observó daño extremo a la planta por herbivoría, excepto en tres conos ovulíferos. No obstante, el reducido número de poblaciones y de individuos de esta planta puede disminuir aún más debido a factores relacionados con el sistema de polinización y con la sobreexplotación no técnica e indiscriminada de sus semillas. Por su parte, existe riesgo para la mariposa debido al uso de insecticidas en el área y al deterioro del hábitat local.

Palabras clave: Cycadales, *Eumaeus*, herbivoría, Lepidoptera, Lycaenidae, *Zamia encephalartoides*, Zamiaceae.

¹ Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, A.A. 7495, Bogotá, fagonzalezg@unal.edu.co

Abstract

Zamia encephalartoides (Zamiaceae), a threatened, endemic species from a dry, andean location of Colombia, is known from a few populations located in disturbed, geologically unstable slopes. The first report of herbivory by the butterfly *Eumaeus* cf. *minijas* Huebn. (Lycaenidae) on this plant is here documented. A high frequency of juvenile stages on leaves and male and female cones was detected; the butterfly uses leaves, sporophylls and seeds of this plant for laying their eggs, for food of their caterpillars and for mechanical support for their pupae. Eggs are laid in groups. Caterpillars are aposematic and gregarious and feed exclusively on this plant, which indicates that they have acquired tolerance and mechanisms to sequester the toxic metabolites present in *Zamia*. Under artificial conditions, life cycle from egg to imago emergence spans 50 days. It is unlikely that damage due to herbivory severely affects survival of *Z. encephalartoides*, as this plant produces many leaves on each growing season. Strong damage was not observed, except in three female cones. Factors affecting the pollination system and the over-exploitation of seeds can further decrease the low number of populations and individuals of this plant. As for the butterfly, survival is threatened due to the continuous use of insecticides and habitat destruction in the area.

Key words: Cycadales, *Eumaeus*, herbivory, Lepidoptera, Lycaenidae, *Zamia encephalartoides*, Zamiaceae.

Introducción

Existen plantas cuya historia es muy antigua y, por lo tanto, representan relictos evolutivos comparables a los dinosaurios. Hace unos 65 millones de años, los dinosaurios desaparecieron del planeta, al igual que gran parte de la flora dominante. No obstante, gimnospermas del orden Cycadales, el único no extinto de la clase Cycadopsida, han sobrevivido por lo menos desde ese entonces, por lo cual son consideradas “fósiles vivientes”. Las primeras evidencias fósiles de Cycadales datan del Carbonífero, específicamente del Pensilvaniano superior (Stewart & Rothwell, 1993; Taylor & Taylor, 1993; Norstog & Nicholls, 1997). Las Cycadales están actualmente distribuidas en los trópicos y subtrópicos de América, África, Asia y Australia, y parecen ser el grupo más basal de gimnospermas actuales y, por ende, de espermatófitas.

El orden Cycadales consta de tres familias: Cycadaceae, con el único género *Cycas*, ampliamente distribuido en S Japón, Archipiélago Malayo, SE Asia, Filipinas, Indonesia, Nueva Guinea, N Australia, India, Sri Lanka, Madagascar y posiblemente la costa oriental de África; Stangeriaceae, con los géneros *Bowenia*, de N. Australia, y *Stangeria*, de Sur África; y Zamiaceae, con los géneros *Ceratozamia*, de México, Guatemala y Belice, *Chigua*, de NW Colombia, *Dioon*, de México y Honduras, *Encephalartos*, de África, *Lepidozamia*, de Australia, *Macrozamia*, de Australia, *Microcycas*, de W Cuba, y *Zamia*, ampliamente distribuido en América, desde S Estados Unidos hasta Brasil, Bolivia y N Chile (Norstog & Nicholls, 1997).

Las Zamiaceae constan de aproximadamente 180 especies. En nuestro país se encuentran por lo menos 18, siete de ellas endémicas. Aunque en la flora nativa de Colombia solo está representada dicha familia, se han introducido al país por lo menos dos especies ornamentales de Cycadaceae. Las Zamiaceae se distinguen de las Cycadaceae por los foliolos carentes de vena central (aunque en *Chigua* se forma una vena aparentemente central por anastomosis de venas laterales) pero con venas laterales, el ápice de los microsporofilos agudo o peltado, y la formación de conos femeninos por agrupación de numerosos megasporofilos y semillas; en Cycadaceae los foliolos presentan una vena media prominente, carecen de venas laterales, el ápice de los microsporofilos es acuminado, y los óvulos se originan en la margen de megasporofilos laminares que no forman conos femeninos.

Las Zamiaceae son dioicas, y sus individuos varían en tamaño, según la especie, desde plantas acaules hasta árboles de varios metros de altura. En *Zamia* se produce una serie anual de hojas, la cual puede contener de 1-30 o más hojas, según la especie (cf. p. ej. Clark *et al.*, 1992; Robertse & Claassen, 1995); en algunas especies, en particular aquellas con tallo subterráneo, el crecimiento es muy lento y producen una sola hoja por año. El follaje de estas plantas está formado por una roseta de hojas, dispuestas hacia los extremos del tronco, el cual puede ser único o dividido. Las estructuras reproductivas (tanto los microsporangios como los megasporangios) se organizan en conos o estróbilos, algunos de los cuales pueden alcanzar hasta 80 cm largo y 15 kg de peso. Las semillas son numerosas, rojas, anaranjadas o blanco-amarillentas (Figs. 1, 3D).

La importancia de las Zamiaceae radica en varios aspectos. Desde el punto de vista evolutivo, se caracterizan por una larga historia y por caracteres genotípicos y fenotípicos distintivos dentro de las plantas con semilla, como p. ej. la vernación circinada y los gametos masculinos móviles. Desde el punto de vista biológico y ecológico, en su mayoría son plantas cuyas estrategias reproductivas son poco conocidas; muchas Zamiaceae, incluidas las dos especies de *Chigua* y varias de las especies colombianas de *Zamia*, son conocidas únicamente a partir de una o unas pocas colecciones, y han sido observadas en campo en muy contadas ocasiones, por lo cual la información es bastante escasa. Desde el punto de vista de la botánica económica, es de mencionar la importancia de estas plantas como fuente de alimento en varios países del mundo, a pesar de que poseen compuestos extremadamente tóxicos (Sacks, 1996). En la región del Pacífico colombiano, las semillas de algunas especies de *Zamia* (comúnmente conocidas como "chigua") son usadas en alimentación humana.

Muchas especies de Zamiaceae están amenazadas o en peligro extremo de extinción, lo cual ha llevado a su inclusión en las listas de la convención CITES (Norstog & Nicholls, 1997; Osborne *et al.*, 1999; Stevenson, 2001; World Conservation Monitoring Centre, 1996). No pocas especies de *Zamia* han sido sometidas a explotación ilegal e indiscriminada por parte de comerciantes y colectores privados, lo cual ha puesto en peligro la supervivencia de muchas de ellas, especialmente de las endémicas y de las que poseen mayor valor en el mercado internacional de plantas exóticas; a esto se suma el bajo número de individuos y a la distribución reducida de muchas de éstas. Otros factores que ponen en peligro a las especies de Zamiaceae son la destrucción del hábitat donde crecen y la extinción local de sus posibles insectos polinizadores. La entomofilia es por lo general asociada a plantas con flores (Crepet, 1979), pero las Zamiaceae son excepcionales en este sentido, ya que aunque carecen de flores, la polinización parece ocurrir por acción de coleópteros (Fawcett & Norstog, 1993; Norstog *et al.*, 1986; Norstog & Nicholls, 1997; Tang, 1987a, b, 1993). Este factor es crítico en plantas dioicas, tales como las Zamiaceae, debido a que el polen debe desplazarse del individuo polínifero al ovulífero, que con frecuencia se hallan separados por distancias considerables. Se ha planteado que estos insectos polinizadores han coevolucionado con la especificidad en la relación de ciertos coleópteros con plantas del orden Cycadales (Crowson, 1991; Oberprieler, 1995a, b) y con la tolerancia que han desarrollado estos insectos a los com-

puestos tóxicos de estas plantas (Sacks, 1996; Schneider *et al.*, 1999).

Colombia es el país en el cual las Zamiaceae alcanzan su mayor diversificación morfológica (Sabato, 1990). Dos géneros de esta familia son nativos de la flora de Colombia: *Chigua*, con dos especies, es endémico de nuestro país. *Zamia*, el género del orden Cycadales con la mayor diversidad morfológica, cariológica y ecológica (Sabato, 1990; Norstog & Nicholls, 1997), consta de cerca de 55 especies principalmente concentradas en el Neotrópico. Se distribuyen desde los 30° N y 18° S en Georgia y La Florida (Estados Unidos), México, Centro América, Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú, Brasil y Bolivia (Norstog, 1990). Las especies de *Zamia* crecen por lo general en bosques primarios no perturbados, a elevaciones que van desde el nivel del mar hasta los 2700 m; muchas son endémicas y crecen en áreas restringidas. En Colombia se conocen 17 especies de *Zamia*, ocho de las cuales son endémicas: *Z. amplifolia* Masters, *Z. disodon* D. Stev. & Sábato, *Z. encephalartoides* D. Stev., *Z. hymenophyllidia* D. Stev., *Z. melanorrhachis* D. Stev., *Z. montana* A. Br., *Z. wallisii* A. Br. y *Z. oligodonta* Calderón-Sáenz & D.W. Stevenson (Calderón-Sáenz & D.W. Stevenson, 2003).

Los enclaves subxerofíticos interandinos en Colombia han sido poco estudiados en cuanto a los componentes bióticos y ecológicos. Se cree que las condiciones secas en estos enclaves han limitado o reducido la biodiversidad. Esta aproximación, bastante cuestionable, ignora la presencia de elementos endémicos importantes en la historia de la vegetación de tales áreas. La especie estudiada en este trabajo, *Zamia encephalartoides*, es propia de uno de dichos enclaves, y es una de las pocas plantas que pueden crecer en las condiciones secas y cálidas predominantes en esta región; por su gran porte (hasta de 2 m alto) y abundante follaje, esta especie aporta una considerable cantidad de cobertura vegetal y de biomasa. No obstante, corre alto riesgo de extinción, ya que es endémica, el número de poblaciones y de individuos es bajo, se extraen sus semillas indiscriminadamente, y crece en una zona bastante restringida, frágil y expuesta a una influencia antrópica continua por la expansión de cultivos y cría de ganado.

Este trabajo presenta los resultados obtenidos del estudio de *Zamia encephalartoides* y la herbivoría en ésta por parte de la mariposa *Eumaeus* cf. *minijas* Huebn. El presente trabajo es el primer registro documentado de dicha relación en Colombia, y pretende evaluar la herbivoría en relación a la conservación de esta especie de *Zamia* endémica de Colombia.

Materiales y métodos

Inicialmente, se censaron las poblaciones de *Zamia encephalartoides* existentes. En un periodo de dos años, se efectuaron cinco etapas de muestreo a fin de establecer la fenología de la planta y las observaciones pertinentes. El ciclo del vida del lepidóptero hallado fue realizado en parte *in situ* (oviposición, eclosión, primeros estados larvarios, localización de las crisálidas y comportamiento y dieta del adulto); el resto del ciclo larvario fue seguido en condiciones cámara de cría en la Universidad Nacional de Colombia. La identificación preliminar del género fue efectuada con base en **Norstog & Nicholls** (1997) y la identificación de la especie como *Eumaeus* cf. *minijas* fue efectuada por G. Lamas (Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú). Los ejemplares testigo del presente estudio son: *Z. encephalartoides* ♂ (*F. González et al.* 3580, 4002); *Z. encephalartoides* ♀ (*J. L. Fernández-Alonso et al.* 19536; *F. González* 3581); *Eumaeus* cf. *minijas* (*F. González*, Z-001, Z-002, Z-003, Z-004 y Z-005). Estas colecciones se depositaron en la Universidad Nacional de Colombia y en el Instituto Alexander von Humboldt.

Resultados y discusión

***Zamia encephalartoides* (Figs. 1-3).** Planta arborescente con troncos hasta de 2 m alto y 25 cm diám. y ápices de crecimiento protegidos por una serie de catafilos de base cuneada y ápice acuminado, hasta de 5 cm de largo y 2 cm de ancho. Las hojas son compuestas (Figs. 2 A, B, 3 C) hasta de 1 m largo; el pecíolo es inerte (Figs. 2 A, C, D, 3 A) y llega a medir de 15-25 cm de largo; el raquis es inerte y sostiene de 20-40 pares de foliolos (Fig. 2 A, B); los foliolos son imbricados, sésiles, lanceolados, cada uno hasta de 20-35 cm de largo y 1-3 cm de ancho, con base cuneada, ápice agudo y margen entera y revoluta, fuertemente coriáceos y no surcados (Figs. 2 A, B, 3 H). Los conos poliníferos son cilíndricos, 20-30 cm de largo, 3-5 cm de diámetro, con un pedúnculo 5-8 cm de largo, blanco-amarillentos cuando jóvenes (Fig. 2 D) y amarillo dorado a marrón claro al madurar (Fig. 2 A); los microsporofilos poseen una región basal interna fértil, alrededor de la cual se forman numerosos microsporangios, y una región distal expuesta, estéril, formada por seis caras fuertemente inclinadas, las cuales rodean un área central ligeramente cóncava. Los conos ovulíferos son cilíndricos a ovoide-cilíndricos, 25-40 cm de largo, 10-15 cm de diámetro, de color marrón claro cuando jóvenes (Fig. 2 B), verde oscuro al madurar (Fig. 1); los macrosporofilos son numerosos, peltados, y cada uno sostiene dos semillas. Las semillas son blancas

a blanco-amarillentas (Fig. 1) y llegan a medir de 3-4 cm de largo y 1.5-2 cm de diámetro.

La especie es endémica del área de estudio y crece en matorrales secos, en zonas rocosas muy expuestas y pendientes. Durante el presente estudio fueron localizadas tres poblaciones, la más grande de las cuales consta de ca. 50 individuos adultos (algunos en estado reproductivo) y de plántulas; además, se detectaron cerca de 15 individuos aislados creciendo en áreas pendientes de difícil acceso. La especie forma parte del estrato arbustivo en comunidades vegetales donde también se encuentran especies de *Ayenia*, *Borreria*, *Condylidium*, *Cordia*, *Crotalaria*, *Croton*, *Euphorbia*, *Galinsoga*, *Jatropha*, *Lantana*, *Lippia*, *Opuntia*, *Piper*, *Simsia* y *Turnera*, en los estratos herbáceo y arbustivo; y especies de *Bursera*, *Cavanillesia*, *Cecropia*, *Gyrocarpus*, *Maclura*, *Ochroma*, *Pithecellobium*, *Prosopis*, *Randia*, *Stenocereus*, *Tephrosia*, *Thevetia* y *Zanthoxylum*, como elementos arbóreos de porte mediano a pequeño. Dos de las pocas epífitas crecen sobre *Zamia encephalartoides*: un musgo del género *Fabronia* (Fabroniaceae), que cubre gran parte de la superficie de los troncos de esta *Zamia*; y la orquídea *Brassavola nodosa* (L.) Lindley.

Zamia encephalartoides fue ilustrada por primera vez durante la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada, aunque su *status* taxonómico fue un enigma hasta hace unos pocos años (**Stevenson**, 2001). Dos de las iconografías en dicha obra, la número 18, a color (reproducida aquí en la Fig. 1), y la número 19, monocroma, representan un cono ovulífero y algunos detalles de la semilla y del embrión con su respectivo suspensor, siendo la primera ilustración conocida de embriones en Zamiaceae. Al momento de la publicación (**Díaz-Piedrahita**, 1985) las láminas fueron provisionalmente identificadas como *Z. cf. muricata* Willd. No obstante, las ilustraciones detallan con extraordinaria precisión las características del cono ovulífero y de las semillas, y el color blanco-amarillento distintivo de las semillas de esta especie, lo cual permiten asignar dichas ilustraciones con toda certeza a *Z. encephalartoides*.

Fenología. Durante el presente trabajo se pudo establecer que un individuo adulto de *Zamia encephalartoides* puede desarrollar hasta 16 troncos. Esta característica no es común en las Zamiaceae y suele presentarse únicamente en especies arborescentes o arbustivas (**Stevenson**, 2001). A la vez, cada tronco puede formar su propia serie anual de aprox. 26-34 hojas y por lo menos un cono, lo cual sin duda, es una ventaja crucial para la supervivencia y propagación de esta planta. Con las observaciones de campo disponibles, se estima que las hojas pueden



Figura 1. *Zamia encephalartoides*. Iconografía de la Flora de la Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada (Díaz-Piedrahita, 1985; reproducida con permiso).

permanecer funcionales por cerca de dos años o más, luego de lo cual los foliolos se desprenden mediante una zona de abscisión basal. Los conos poliníferos jóvenes son crasos y con poco tejido mecánico (Fig. 2 D) y se tornan escariosos al madurar (Fig. 2 A); la dehiscencia de los microsporangios es acrópeta y coincide con una fuerte emisión de olor y una separación de las hileras de los microsporofilos que expone el polen; este proceso dura 48-72 horas. Durante el presente trabajo la maduración de los conos poliníferos ocurrió una vez al año, hacia el segundo semestre del año (octubre-noviembre de 1996, agosto de 1999, octubre-noviembre de 2000 y noviembre de 2001). Los conos ovulíferos se producen y desarrollan a lo largo del año, pero su desarrollo es muy lento en comparación con los poliníferos; cuando jóvenes no emiten ningún olor particular, pero cuando los óvulos están receptivos, el cono abre por entre dos de las ca. 16 hileras de esporofilos a la vez, dejando expuestos los óvulos de dichas hileras por cierto tiempo, y simultáneamente hay emisión de olor; un cono ovulífero puede permanecer meses en etapa de desarrollo, al final de la cual puede producir aproximadamente 340-380 óvulos; por lo tanto,

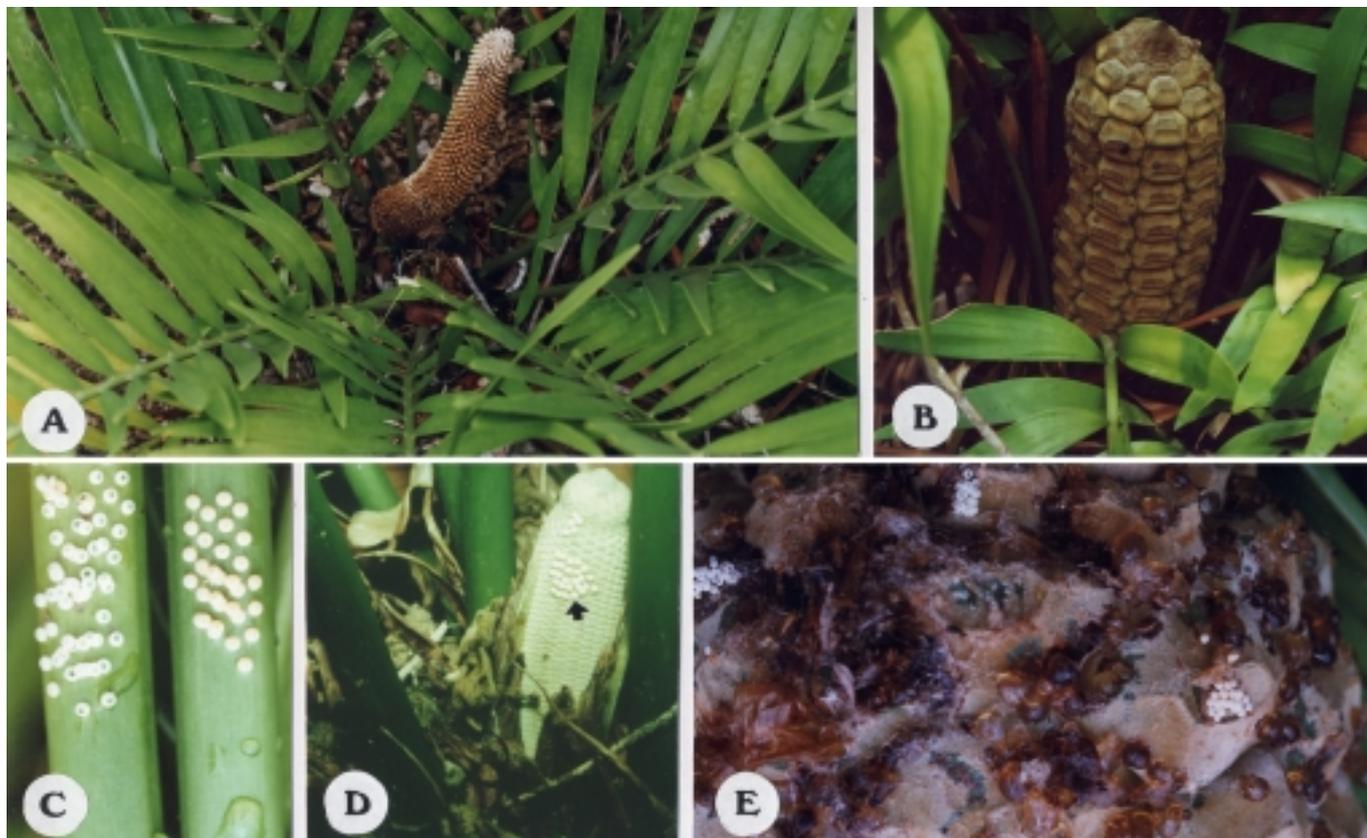


Figura 2. *Zamia encephalartoides*. **A.** Individuo ♂. **B.** Individuo ♀. **C.** Postura de *Eumaeus* cf. *minijas* en el peciolo de *Z. encephalartoides*. **D.** Postura de *E. cf. minijas* en un estróbilo polinífero joven. **E.** Postura de *E. cf. minijas* en un estróbilo ovulífero.

la disponibilidad de óvulos y semillas es más prolongada que la de polen, ya que dura gran parte del año. El desarrollo y crecimiento de las semillas hace que los esporofilos se separen y desprendan junto con las semillas; éstas se dispersan de manera pasiva, por lo cual comienzan a germinar usualmente cerca del cono madre.

Lepidóptero asociado a *Zamia encephalartoides* (Figs. 2-4). La especie asociada a *Zamia encephalartoides* pertenece a la familia Lycaenidae, subfamilia Theclinae, género *Eumaeus* y puede corresponder a *E. minijas* Hübner. Se observaron posturas en el pecíolo (Figs. 2 C, 3 A) y el raquis (Fig. 3 B), así como en los conos poliníferos (Fig. 2 D) y ovulíferos (Fig. 2 E). Las posturas son gregarias y constan de 18-57 huevos, por lo cual se puede deducir que una sola hembra puede colocar este mismo número de huevos. Los huevos son semiesféricos, de color blanco-cremoso de ca. 0.6-0.8 mm de diámetro, con superficie densamente gemada (Fig. 3 A, B). Los huevos eclosionan de 5 a 9 días luego de la postura. Las orugas emergen a través de una apertura distal en el huevo (Figs. 2 C, E, 3 A, B). En primer estado, es amarillenta, mide ca. 1-1.5 mm largo y está recubierta de setas largas (hasta de 1 mm largo) densamente distribuidas (Fig. 3 B). Las orugas son gregarias desde sus primeros estados y consumen preferentemente los folíolos y el raquis de las hojas jóvenes (Fig. 3 C); sin embargo, también se observó que consumen la sarcotesta (Fig. 3 D) y los micro- y macroesporofilos jóvenes. A partir del final del primer estado, en el cual logran 4-5 mm, las orugas son de color rojo brillante con 7 líneas amarillas, una en la parte dorsal de cada segmento (Fig. 3 C, D) y presentan algunas setas negruzcas, las cuales llegan a medir hasta 1 mm largo. En último estado las orugas alcanzan una longitud de 2.3-3 cm. El período larvario en cámara de cría duró aproximadamente en total de 40-50 días, aunque pudo verse afectado por las condiciones artificiales, ya que en otras especies de *Eumaeus* dura únicamente 18 días (Bagget, 1982; Landolt, 1984; Rawson, 1961). Se detectó canibalismo en condiciones de cámara de cría, lo cual está reportado en literatura en campo en La Florida (Bagget, 1982; Landolt, 1984); este factor puede ser importante para la reducción del número viable de orugas. Al final del período larvario, las orugas se agrupan, cesan de alimentarse y de moverse, se adhieren al sustrato, se cubren parcialmente con seda e inician un período de pre-crisálida de 5-7 días (Fig. 3 E, F), luego del cual cambian a crisálida, en cuyo estado duran de 24-28 días. Las crisálidas son pardas o anaranjado-parduscas, con puntos negruzcos pequeños, y también poseen setas (Fig. 3 G, H). Las crisálidas se fijan al sustrato por la parte posterior (cremáster; Fig. 3 G, H). Las crisálidas son estriduladas, esto es, producen un sonido por frotación de

algunos de sus segmentos. Antes de la emergencia del imago, la cubierta de la crisálida se oscurece y se ensancha levemente. Los imagos emergieron al final de la tarde, lo cual contrasta con los reportes de *Eumaeus atala* en La Florida (Bagget, 1982; Landolt, 1984), cuyos imagos emergen durante las primeras horas del día. En cámara de cría los imagos sobrevivieron hasta 5 días.

Los imagos de *Eumaeus* cf. *minijas* son de tamaño medio; el macho es más pequeño que la hembra (Fig. 4). La cabeza y el tórax son negros. La envergadura alar llega a 5-5.6 cm en la hembra (Fig. 4 A, B) y 4.2-4.5 cm en el macho (Fig. 4 C, D). El patrón de coloración del macho y de la hembra de *Eumaeus* cf. *minijas* es similar. La superficie superior de las alas anteriores es negra en su mayor parte, con dos áreas de color verde iridiscente en la parte basal de cada ala en la hembra (Fig. 4 A), y negra a lo largo de las márgenes, con un área de color azul metálico en el área central en el macho (Fig. 4 C). La superficie superior de las alas posteriores es negra, con algunos tintes muy pequeños y poco definida de color verde iridiscente en la base, y una hilera de 4-5 marcas verde iridiscente de ca. 2-4 mm diámetro en la zona submarginal posterior en la hembra (Fig. 4 A), y negra con un área poco conspicua y poco definida de color azul iridiscente en la base, y una hilera de 6-7 marcas verde claras de ca. 1-3 mm diámetro en la zona submarginal posterior en el macho (Fig. 4 C). La superficie inferior en ambos sexos es negra en las alas anteriores, y negra con tres hileras de marcas (6-7 en la hembra, y 6-8 en el macho) verde iridiscente formando una serie de arcos concéntricos en la parte posterior de las alas posteriores (Fig. 4 B, D); estas marcas son de aproximadamente el mismo tamaño de las marcas en la superficie superior, aunque las del arco medio son más grandes que las de los arcos anterior y posterior; la superficie inferior de las alas posteriores adyacente al abdomen presenta un área anaranjada marginal de ca 3 x 2 mm (Fig. 4 B, D). Las márgenes de ambos pares de alas presentan un reborde ciliar blanco característico del género *Eumaeus* (Fig. 4), razón por la cual se les llama comúnmente "hairstreak butterflies". En ambos sexos el abdomen es negro en la superficie superior y anaranjado brillante en la inferior.

Eumaeus cf. *minijas* exhibe un vuelo errático y lento, a muy baja altura (cerca del suelo) y se posa generalmente sobre las hojas, con las alas cerradas. Sus fuentes de alimento en el área son *Cestrum alternifolium* (Jacq.) Schulz. (Solanaceae), *Chaptalia nutans* (L.) Polak. (Asteraceae), *Cnidoscolus tuberosus* (Muell. Arg.) John (Euphorbiaceae), *Cordia curassavica* (Jacq.) R. & S., (Boraginaceae), *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. (Lamiaceae), *Lantana*



Figura 3. Ciclo de vida de *Eumaeus cf. minijas*. **A.** Postura antes de eclosionar. **B.** Postura al momento de la eclosión. **C.** Orugas de tercer estado en el raquis de *Zamia encephalartoides*. **D.** Orugas de penúltimo estado alimentándose de la sarcotesta de *Z. encephalartoides*. **E.** *Eumaeus cf. minijas* en pre-crisálida, vista ventral. **F.** Pre-crisálida, detalle de la cabeza. **G.** Crisálidas en cámara de cría. **H.** Crisálidas, empleando como sustrato un foliolo de *Zamia encephalartoides*.



Figura 4. *Eumaeus* cf. *minijas*. A. Hembra, vista dorsal. B. Hembra, vista ventral. C. Macho, vista dorsal. D. Macho, vista ventral.

canescens HBK. (Verbenaceae), *Lippia origanoides* HBK. (Verbenaceae), *Melochia pyramidata* (HBK) Tr. & Pl. (Sterculiaceae), *Randia aculeata* L. (Rubiaceae), *Ruellia tuberosa* L. (Acanthaceae), y *Simsia fruticulosa* (Sprengel) S.F. Blake (Asteraceae), entre otras. El color y el comportamiento de *Eumaeus* son típicas de los insectos con defensas químicas: son gregarias y presentan coloración aposemática, ya que contrastan colores brillantes en todos los estados de su ciclo de vida como signo de advertencia; además, los imagos muestran vuelo lento y poca respuesta de vuelo cuando son perturbados. Se observó una gran cantidad de posturas y orugas de mariposas en los meses de febrero, abril y junio. La cantidad de estados juveniles de *Eumaeus* disminuye considerablemente en noviembre. Fueron observados imagos en marzo de 2000, y febrero, abril y junio, 2001.

Las plantas del orden Cycadales producen dos tipos específicos de metabolitos secundarios: los azoxyglicósidos (e.g. cicasina y macrozamina) concentrados principalmente en las hojas y caracterizados por un

aglicon-metilazometanol conocido como el MAM; y un amino-ácido no proteico llamado ácido alfa-amino-beta-metilaminopropionico o BMAA (Norstog & Nicholls, 1997; Schneider *et al.* 1999). Estos compuestos, en particular la cicasina, son bastante citotóxicos especialmente en mamíferos. Dichos metabolitos afectan principalmente el hígado y el sistema nervioso. Parece que el BMAA es una poderosa neurotoxina en mamíferos que puede causar esclerosis amiotrófica lateral, una lesión neurológica en humanos que produce síntomas de parkinsonismo (Sacks, 1996). Dicha patología se ha detectado en poblaciones que consumen semillas o almidón extraído de los troncos de Cycadales y que no han sido debidamente procesados para consumo humano. De hecho, una de las primeras intoxicaciones debidas a esta causa que se han documentado afectó a los marineros del capitán Cook. Aún, se cree que el polen al ser liberado al ambiente puede ser tóxico para humanos (Norstog & Nicholls, 1997).

Las larvas de *Eumaeus* han desarrollado la capacidad de acumular y/o detoxificar este compuesto en sus tejidos

(Rothschild *et al.*, 1986). La cicasina es retenida también por las pupas y por los imagos, lo cual hace que esta mariposa sea tóxica para predadores durante todos los estados de su ciclo de vida (Rothschild, 1992). En los imagos, se ha detectado la acumulación de cicasina en el cuerpo, (con una mayor concentración en las alas), los huevos y el espermátforo (Bowers & Larin, 1989; Schneider *et al.*, 1999). La acumulación de cicasina y macrozamina a partir de Cycadales no es, sin embargo, exclusiva en *Eumaeus*, ya que se presenta también en polillas geométridas en Sur África (Donaldson, 1991, Donaldson & De Wet Bösenberg, 1995 a, b; Donaldson *et al.*, 1995). También se han detectado rastros de cicasina en los coleópteros asociados a estas plantas, aunque no se sabe si éstos son capaces de acumular dicho compuesto en sus tejidos (Schneider *et al.*, 1999).

El presente es el primer registro documentado y detallado de la relación *Eumaeus-Zamia* en Colombia. Dicha relación de herbivoría ha sido estudiada en especies de Norte- y Centro América y México (Landolt, 1984; Norstog & Nicholls, 1997). Por ejemplo, las orugas de *Eumaeus atala* (Poey) Röber, conocida comúnmente como “atala”, “atala hairstreak” o “coontie hairstreak”, usa como planta hospedera exclusivamente a especies de *Zamia* (e. g. *Z. integrifolia* L. fil.). Durante el presente trabajo no se observó la presencia de orugas de *Eumaeus* cf. *minijas* en ninguna otra planta de la vegetación aledaña, lo cual corrobora la relación de exclusividad entre *Eumaeus* y *Zamiaceae*. Desde el punto de vista coevolutivo, esta relación no parece responder a un evento de cladogénesis paralela; por el contrario, la notable antigüedad de las Cycadales con respecto a los lepidópteros (los cuales datan de no antes del Cretáceo inferior; cf. p. ej. Crepet & Friis, 1987; Grimaldi, 1999) sugiere fuertemente que esta relación es de colonización posterior de *Eumaeus* hacia *Zamiaceae*, y que por lo tanto, no es un factor causal en la diversificación inicial de las *Zamiaceae*.

Conservación

La relación de oviposición y herbivoría obligadas de esta mariposa con *Zamia*, y el elevado número (hasta de 30) de orugas por individuo en *Z. encephalartoides* pueden afectar el número de algunas hojas por individuo, pero muy rara vez afecta las estructuras reproductivas de esta planta. La alta tasa de producción anual de hojas en *Z. encephalartoides* (26-34 hojas por tronco por año), la gran cantidad de tejido vegetativo por hoja, y el consumo alternativo de tejidos blandos de los conos y de las semillas por parte de las orugas de *Eumaeus* cf. *minijas* son factores que amortiguan el daño causado por herbivoría,

por lo cual no se afecta de forma significativa la supervivencia, regeneración o reproducción de la población de esta planta en condiciones naturales. Bajo estas mismas condiciones, la gran cantidad de biomasa producida por esta planta es capaz de sostener las poblaciones locales de la mariposa. Existen reportes de que esta mariposa puede ser una plaga en especies cultivadas de *Zamia* en La Florida (cf. Landolt, 1984).

Muchas especies del orden Cycadales son consideradas en peligro de extinción y por lo tanto han sido incluidas en los listados de CITES. En cuanto a las especies colombianas, las dos especies de *Chigua* se encuentran en el Apéndice I de CITES y las de *Zamia* en el Apéndice II. Los factores inminentes de riesgo para las poblaciones de *Zamia encephalartoides* son la destrucción de su hábitat, la sobreexplotación no técnica e indiscriminada de sus semillas para obtención de plantas ornamentales *ex situ* (un factor de riesgo para muchas especies de *Zamiaceae* en Colombia) y la reducción o extinción de su posible polinizador *Pharaxonotha*, debido al uso indiscriminado de insecticidas en los cultivos aledaños. Durante el presente trabajo se detectó la asociación con coleópteros de una especie de *Pharaxonotha*, que puede ser el vector de polen en *Z. encephalartoides* (estas observaciones se presentarán en un artículo aparte).

Se observó que existe una limitación mecánica y por espacio físico para que todas las semillas viables de un cono individual logren desarrollarse y alcanzar el estado adulto. Esto se hace aún más drástico, ya que las semillas no poseen ningún mecanismo de dispersión a grandes distancias, lo cual dificulta el establecimiento de adultos en áreas diferentes a los alrededores de la planta madre. Los individuos aislados observados quizás se han dispersado por rodamiento de las semillas en lugares con bastante pendiente. En vista de lo anterior, existe una producción mayor de semillas viables que aquella que puede sobrevivir. Esto hace de *Zamia encephalartoides* un caso excelente para que se pueda explotar técnicamente como planta ornamental, estableciendo viveros locales para propagar técnicamente la especie a partir de plántulas viables en sus primeros estados de desarrollo que no podrán sobrevivir *in situ* por falta de espacio físico y sustrato necesario. De esta forma no se diezman las poblaciones silvestres y se puede ofrecer a los habitantes locales una forma de aprovechar racionalmente esta planta en el mercado de plantas ornamentales.

Como factores menores de riesgo para *Z. encephalartoides* se encuentran las infestaciones esporádicas por cóccidos en el follaje de algunos individuos, y la granivoría por parte de insectos del orden Thysanoptera,

los cuales minan la cubierta de la semilla. A lo anterior se suma la inestabilidad del terreno y el daño mecánico de los troncos por pastoreo.

Por todo lo anterior, se recomienda no coleccionar más esta especie, ya que colecciones reiteradas de la misma población pueden provocar un daño severo; además, en caso necesario, si se detecta una reducción de polinizadores de *Z. encephalartoides* debido a las altas concentraciones de insecticidas en las áreas aledañas, se debe recurrir a la polinización artificial a fin de asegurar la viabilidad de esta especie de *Zamia*.

Con respecto a *Eumaeus*, hasta el momento no se disponen de estudios en la sistemática y el estado actual de conservación de las especies de este género en Colombia, aunque se puede inferir que la diversificación y conservación de las especies o poblaciones locales de esta mariposa son directamente proporcionales a la diversificación y grado de conservación de las especies nativas de *Zamia* en nuestro país. Esta es una razón más para recomendar urgentemente la preservación de los hábitat naturales y de las poblaciones de las 16 especies de *Zamia* nativas de Colombia, algunas de las cuales se encuentran en estado inminente de extinción (Stevenson, 2001). En cuanto a la especie de *Eumaeus* aquí estudiada, existe un riesgo inminente para la conservación de esta mariposa si las poblaciones locales de *Z. encephalartoides* se ven afectadas.

Se ha documentado que *E. atala* estuvo a punto de extinguirse en Estados Unidos debido a la reducción drástica de su especie hospedera por destrucción de hábitat y sobreexplotación como planta ornamental (Baggett, 1982). Esta mariposa no fue vista ni colectada en La Florida entre 1937 y 1959 (Rawson, 1961), pero se ha recuperado debido a que su hábitat nativo ha sido preservado y recuperado, y a que su planta hospedera ha sido reintroducida en la zona. No obstante, *E. atala* subsp. *florida* sigue siendo considerada en peligro de extinción en el estado de La Florida (Estados Unidos; New, 1993), bajo el rango T3 de The Nature Conservancy, lo cual significa que es una especie muy rara y localizada en su areal total de distribución, o hallada localmente en un número de entre 21 y 100 individuos, y que está en peligro en todo su areal de distribución.

Agradecimientos

A la Academia de Ciencias del Tercer Mundo por la financiación parcial del presente trabajo. Al Instituto Alexander von Humboldt, institución que aprobó y financió parcialmente el presente proyecto dentro de la convo-

catoria del Programa Becas para la Conservación de Especies de Fauna y Flora en Peligro de Extinción, año 2000; agradezco particularmente el interés y la colaboración recibida de A. M. Franco y L. M. Renjifo. Al Dr. G. Lamas por confirmar la identificación de *Eumaeus*. En la Universidad Nacional de Colombia, agradezco la colaboración de M. A. Bello, J. L. Fernández, A. Galindo, J. Hernández, O. Vargas, K. Vergara, por su colaboración durante la fase de campo; M. A. Bello también realizó importantes comentarios en el manuscrito. S. González colaboró en la toma de fotografías. Agradezco muy especialmente a los pobladores de la región, por toda su colaboración.

Bibliografía

- Baggett, H.D. 1982. Florida atala. In R. Franz (ed.), Rare and Endangered Biota of Florida. Vol. 6. Invertebrates. University Press of Florida. Gainesville, Florida, USA. Pp. 75-77.
- Bowers, M.D. & Z. Larin. 1989. Acquired chemical defense in the lycaenid butterfly, *Eumaeus atala*. J. Chem. Ecol. 15: 133-146.
- Calderón-Sáenz, E. & D.W. Stevenson. 2003. Una nueva especie de *Zamia* L. (Zamiaceae) de los Andes de Colombia y clave actualizada para las especies del género en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 27 (105): 485-490.
- Clark, D.B., D.A. Clark & M.H. Grayum. 1992. Leaf demography of a neotropical rain forest cycad, *Zamia skinneri* (Zamiaceae). Amer. J. Bot. 79: 28-33.
- Crepet, W. 1979. Insect pollination: a paleontological perspective. Bioscience 29: 102-108.
- & E.M. Friis. 1987. The evolution of insect pollination in angiosperms. In E.M. Friis, W. Chaloner & P.R. Crane (eds.), The Origins of Angiosperms and their Biological Consequences. Cambridge University Press, Cambridge, USA. Pp. 181-201.
- Crowson, R.H. 1991. The relations of coleoptera to Cycadales. In M. Zunino, X. Beltes & M. Blas (eds.) Advances in Coleopterology. AEC. Barcelona, España. Pp. 13-28.
- Díaz-Piedrahita, S. 1985. Cicadáceas. Flora de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada 3: 23-25, t. 18-20.
- Donaldson, J.S. 1991. Adaptation to the host plant and the evolution of host relationship in cycad weevils (Coleoptera: Brentidae). Ph.D. Thesis, U. Cape Town, South Africa.
- & J. De Wet Bösenberg. 1995a. Duration of developmental stages of the male gametophyte in the interval between pollination and release of spermatozooids in *Encephalartos altensteinii*. In P. Vorster (ed.), Proceedings of the Third International Conference on Cycad Biology. The Cycad Society of South Africa, Stellenbosch, South Africa. Pp. 415-422.
- & J. De Wet Bösenberg. 1995b. Life history and host range of the leopard magpie moth, *Zerenopsis leopardina* Felder (Lepidoptera: Geometridae). Afric. Entomol. 3: 103-110.

- , **I. Nänni & J. De Wet Bösenberg**. 1995. The role of insects in the pollination of *Encephalartos cycadifolius*. In **P. Vorster** (ed.), Proceedings of the Third International Conference on Cycad Biology. The Cycad Society of South Africa, Stellenbosch, South Africa. Pp. 423-434.
- Fawcett, P. & K. Norstog**. 1993. *Zamia pumila* in South Florida: a preliminary report on its pollinators *R. slossoni*, a snout weevil and *P. zamiae*, a clavicorn beetle. In **D.W. Stevenson & K.J. Norstog** (eds.), Proceedings of the Second International Conference on Cycad Biology. Palm and Cycad Societies of Australia, Milton, Queensland, Australia. Pp. 109-120.
- Grimaldi, D.** 1999. The co-radiations of pollinating insects and angiosperms in the Cretaceous. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 86: 373-406.
- Landolt, P.J.** 1984. The Florida atala butterfly, *Eumaeus atala florida* Rueber (Lepidoptera: Lycaenidae) in Dade County, Florida. *Florida Entomologist* 67: 570-571.
- New, T. R.** (ed.) 1993. Conservation biology of Lycaenidae (Butterflies). Occasional Paper of the IUCN Species Survival Commission No. 8. IUCN, The World Conservation Union, Gland, Switzerland.
- Norstog, K.J.** 1990. Studies of cycads reproduction at Fairchild Tropical Garden. *Mem. New York Bot. Gard.* 57: 63-81.
- & **T. Nicholls**. 1997. The Biology of the Cycads. Cornell University Press, Ithaca, NY.
- , **D.W. Stevenson & K.J. Niklas**. 1986. The role of beetles in the pollination of *Zamia furfuracea* L. fil. (Zamiaceae). *Biotropica* 18: 300-306.
- Oberprieler, R.G.** 1995a. The weevils (Coleoptera:Curculionoidea) associated with cycads 1. Classification, relationships, and biology. In **P. Vorster** (ed.), Proceedings of the Third International Conference on Cycad Biology. The Cycad Society of South Africa, Stellenbosch, South Africa. Pp. 295-324.
- . 1995b. The weevils (Coleoptera: Curculionoidea) associated with cycads 2. Host specificity and implications for cycad taxonomy. In **P. Vorster** (ed.), Proceedings of the Third International Conference on Cycad Biology. The Cycad Society of South Africa, Stellenbosch, South Africa. Pp. 335-365.
- Osborne, R., D.W. Stevenson, & K.D. Hill**. 1999. The world list of cycads. In **C. J. Chen** (ed.), Biology and Conservation of Cycads. Proceedings of the Fourth International Conference on Cycad Biology. Panzhihua, China. International Academic Publishers, Beijing, China. Pp. 224-239.
- Rawson, G. W.** 1961. The recent rediscovery of *Eumaeus atala* (Lycaenidae) in Southern Florida. *J. Lepid. Soc.* 15: 237-244.
- Robbertse, P.J. & M.I. Claassen**. 1995. Vegetative and reproductive cycles of some *Encephalartos* species in Pretoria gardens. In **P. Vorster** (ed.), Proceedings of the Third International Conference on Cycad Biology. The Cycad Society of South Africa, Stellenbosch, South Africa. Pp. 295-324.
- Rothschild, M.** 1992. Egg protection by the atala hairstreak butterfly (*Eumaeus atala florida*). *Phytochemistry* 31: 1959-1960.
- , **Nash, R.J., & E. A. Bell**. 1986. Cycasin in the endangered butterfly *Eumaeus atala florida*. *Phytochemistry* 25: 1853-1854.
- Sabato, S.** 1990. West Indian and South American cycads. *Mem. New York Bot. Gard.* 57: 173-185.
- Sacks, O.** 1996. The Island of the Colorblind. Macmillan, London, U. K.
- Schneider, D., K. Fiedler, B. Kornmaier, P. Lounibos, M. Wink, F. Sporer, A. Tei & J. Ziesmann**. 1999. Cycads - Palmferns - and their insects (herbivores and pollinators). Abstract No. 1. Esito VI (European Symposium for Insect Taste and Olfaction). <http://www.esito-symp.org/talks.html>.
- Stevenson, D.W.** 2001. Cycadales. Flora de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 90 pp.
- Stewart, W.N. & G.W. Rothwell**. 1993. Paleobotany and the Evolution of Plants. Second edition. Cambridge University Press. Cambridge, USA.
- Tang, W.** 1987a. Insect pollination in the cycad *Zamia pumila* (Zamiaceae). *Amer. J. Bot.* 74: 90-99.
- . 1987b. Heat production in cycad cones. *Bot. Gaz.* 148: 165-174.
- . 1993. Heat and odour production in cycad cones and their role in insect pollination. In **D.W. Stevenson & K.J. Norstog** (eds.), Proceedings of the Second International Conference on Cycad Biology. Palm and Cycad Societies of Australia, Milton, Queensland, Australia. Pp. 140-147.
- Taylor, T. N. & E. L. Taylor**. 1993. The Biology and Evolution of Fossil Plants. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- World Conservation Monitoring Centre**. 1996. Checklist of CITES species. Cites Secretariat and World Conservation Monitoring Centre, Genève, Switzerland & Cambridge, U. K. 400 pp.

COTAS A NUEVA FÍSICA POR MEDIO DE OPERADORES EFECTIVOS DE DIMENSIÓN SEIS

por

Roberto Martínez¹ & Diego Torres²

Resumen

Martínez, R. & D. Torres: Cotas a nueva física por medio de operadores efectivos de dimensión seis. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (107): 245-252, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se estudian acoplamientos anómalos del bosón de Higgs con los bosones vectoriales neutros Z y γ en el marco de una teoría efectiva parametrizada por medio de operadores de dimensión seis invariantes ante el grupo de simetrías $SU(2)_Y \otimes U(1)_L$. Se acotan los parámetros f_{WW}/Λ^2 , f_{BB}/Λ^2 , f_{BW}/Λ^2 y $f_{\Phi,1}/\Lambda^2$ mediante resultados experimentales, y se estudian posibles desviaciones del modelo estándar originadas por la nueva física en los decaimientos $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow \gamma Z$.

Palabras clave: Operadores efectivos, teorías efectivas, modelo estándar.

Abstract

We study the anomalous coupling of Higgs bosons with the neutral gauge boson Z and γ in the context of an effective theory with six dimension invariant operators under $SU(2) \otimes U(1)$ symmetry. We find bounds for the f_{WW}/Λ^2 , f_{BB}/Λ^2 , f_{BW}/Λ^2 and $f_{\Phi,1}/\Lambda^2$ parameters using the experimental results. We also consider deviations from the Standard Model due to new physics application to the processes decay $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow \gamma Z$.

Key words: Effective operators, effective theories, standar model.

1. Introducción

El Modelo Estándar de las interacciones electrodébiles (ME) es una teoría de gauge basada en el grupo de simetrías $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ con un rompimiento que deja

invariante el grupo $U(1)_Q$ del electromagnetismo. Esta teoría tiene gran aceptación en la comunidad internacional por sus predicciones y aciertos. Entre ellos tenemos los descubrimientos de los quarks pesados charm, bottom y el top más recientemente. Otros de los grandes

¹ Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física, Bogotá, romart@ciencias.unal.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física, Bogotá, diegot@ciencias.unal.edu.co

aciertos es la predicción de corrientes neutras en el modelo y el descubrimiento del bosón de gauge Z , portador de la interacción débil. También se infiere de los experimentos del colisionador electrón positrón en el CERN que el número de neutrinos ligeros es tres y, por ende, únicamente se pueden tener tres familias. Las correcciones radiativas a un loop o correcciones cuánticas han sido también probadas experimentalmente. A pesar de estos aciertos, el modelo todavía no se puede considerar como la teoría final de las interacciones fundamentales. Existen problemas para explicar por qué deberían existir únicamente tres familias y las relaciones de las masas de los fermiones es un completo enigma.

La masa del quark top es de 175 GeV y las masas de los neutrinos son del orden de los "eV", es decir, las diferencias de masas corresponden a 11 cifras significativas. Todos los fenómenos de bajas energías a escalas menor de 1 GeV tampoco se pueden explicar con una teoría fundamental con un grupo de gauge $SU(3)_C$ porque los estados que se realizan en la naturaleza, son estados ligados de quarks generando una teoría fuertemente interactuante la cual no es perturbativa. Otro punto de fundamental importancia es el origen del rompimiento espontáneo de la simetría el cual es fundamental para dotar las partículas con masa, tanto fermiones como campos de gauge. Dicho mecanismo deja un reducto, el Higgs, el cual es un campo de espín cero, carga electromagnética igual a cero y la masa es un parámetro desconocido en el modelo.

La teoría electrodébil la propuso E. Fermi para explicar el decaimiento radiativo de los átomos debido a que la teoría electromagnética predice una vida media demasiado pequeña comparada con los experimentos. Fermi propuso un Hamiltoniano de interacción similar al electromagnetismo pero cambiando la constante de interacción

$$H = \frac{G_F}{\sqrt{2}} J_\mu^\dagger(\text{muón}) J^\mu(\text{electrón}), \quad (1)$$

donde el Hamiltoniano propuesto tiene corrientes que

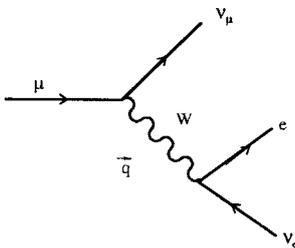


Figura 1: Decaimiento $\mu \rightarrow e\nu_\mu\nu_e$ en el Modelo Estándar.

conservan la paridad. Posteriormente Cheng y Lee en 1956 propusieron una teoría donde la paridad se viola en esta interacción y en 1958 la señora Wu encontró en el laboratorio, en el decaimiento de Cobalto 60, que efectivamente se presentaba un máximo de violación de la paridad y que el neutrino tiene quiralidad izquierda. El Hamiltoniano propuesto por Fermi originalmente es una teoría efectiva con un lagrangiano de interacción de dimensión de momento igual a seis y la constante de acoplamiento G_F con unidades de momento igual a -2 . Dicha teoría es efectiva y ésta debe obtenerse de una teoría mas fundamental, donde se han integrado modos pesados los cuales se manifiestan en la constante de acoplamiento con unidades de momento.

Al construir la teoría fundamental con simetría $SU(2)_I \otimes U(1)_Y$ (ME), el lagrangiano de interacción está dado por

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{ig}{2\sqrt{2}} \bar{\psi}(l)\gamma_\mu(1-\gamma_5)\psi(\nu_l)W^{\nu-} \\ & + \frac{ig}{4\cos\theta_W} \bar{\psi}(\nu_l)\gamma_\mu(1-\gamma_5)\psi(\nu_l)Z^\mu \\ & - \frac{ig}{4\cos\theta_W} \bar{\psi}(l)\gamma_\mu [(1-\gamma_5) - 4\sin^2\theta_W] \psi(l)Z^\mu \end{aligned} \quad (2)$$

donde θ_W es el ángulo de Weinberg, l denota los leptones electrón o muón y ν_l los neutrinos electrónicos o muónicos. W_μ^\pm son los campos de gauge portadores de las corrientes cargadas de la interacción débil y Z el de la corriente neutra. El Hamiltoniano efectivo o la amplitud de probabilidad para el decaimiento $\mu \rightarrow e\nu_\mu\nu_e$, de la figura 1, se escribe en la forma

$$\begin{aligned} H = & \frac{ig}{2\sqrt{2}} \bar{\psi}(\nu_\mu)\gamma_\mu(1-\gamma_5)\psi(\mu) \frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2 - M_W^2} \\ & \times \frac{ig}{2\sqrt{2}} \bar{\psi}(e)\gamma_\nu(1-\gamma_5)\psi(\nu_e) \\ \simeq & -i \frac{g^2}{8M_W^2} \bar{\psi}(\nu_\mu)\gamma_\mu u(1-\gamma_5)\psi(\mu) \\ & \times \bar{\psi}(e)\gamma_\nu u(1-\gamma_5)\psi(\nu_e), \end{aligned} \quad (3)$$

donde se supone que el momento transferido q se desprecia comparado con la masa del campo de gauge W_μ , es decir, $q^2 - M_W^2 \approx -M_W^2$. Si comparamos con el Hamiltoniano propuesto originalmente por Fermi para describir fenómenos de bajas energías, del orden de 1 GeV, para el decaimiento beta o para el decaimiento del muón, la constante de acoplamiento efectiva propuesta por Fermi es

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_W^2}, \quad (4)$$

donde en la teoría fundamental tenemos un campo de gauge portador de la interacción débil W con una masa de 80.4 GeV. A bajas energías este campo no se puede producir y por esta razón en una teoría a esta escala se puede ver como un modo que se ha integrado de una teoría fundamental, el cual se refleja en la constante de acoplamiento con unidades de momento igual a -2 .

2. Teoría

En este marco de las teorías efectivas queremos estudiar las interacciones del Higgs con el fotón y el campo Z . Como mencionamos esta partícula no se ha detectado y su observación en el laboratorio es bastante difícil. El modo de decaimiento mas importante, si su masa es inferior a 180 GeV, es en dos fermiones, en particular en dos quarks bottom, porque dicho acoplamiento, Higgs fermion fermion, es proporcional a la masa del fermion. Sin embargo, este modo es muy difícil de observar experimentalmente debido al ruido en el estado final.

El decaimiento en dos fotones está suprimido en el modelo, sin embargo al considerar las correcciones radiativas a un loop o las correcciones cuánticas de la teoría, este modo se presenta cuando en el loop aparecen campos de gauge W o fermiones con carga electromagnética y los fotones se acoplan a estas partículas virtuales en el loop. Este decaimiento es 10^{-3} veces menor que el decaimiento en dos quark bottom, sin embargo su ruido es relativamente pequeño haciendolo mas importante para la detección del Higgs. Por esta razón estos modos de corrientes neutras son muy importantes a pesar de estar suprimidos en la teoría.

La técnica de correcciones radiativas es bastante compleja en el ME. Tampoco tenemos una teoría fundamental a escalas de energía mayor que la escala de la teoría electrodébil aceptable que permita determinar con precisión cuales serían las correcciones cuánticas de los modos de decaimiento del Higgs en canales neutros. Por esta razón adoptaremos una teoría efectiva donde, a la escala electrodébil, los modos pesados se han integrado quedando la simetría remanente $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$. Dicha teoría efectiva la construiremos con los campos de la teoría electrodébil, lo cual implicaría tener mas de 80 operadores efectivos de dimensión seis[7]. De este conjunto seleccionaremos solo aquellos operadores efectivos que contenga la interacción del Higgs con modos neutros.

Si escribiéramos la teoría efectiva de la forma

$$\mathcal{L} = \sum_i \frac{f_i}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i \quad (5)$$

entonces las constantes de acoplamiento son de la forma f_i/Λ^2 con unidades de masa igual a -2 y \mathcal{O}_i son los operadores de dimensión seis mostrados a continuación

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{BW} &= \Phi^\dagger \hat{\mathbf{B}}_{\mu\nu} \hat{\mathbf{W}}^{\mu\nu} \Phi, \\ \mathcal{O}_{WW} &= \Phi^\dagger \hat{\mathbf{W}}_{\mu\nu} \hat{\mathbf{W}}^{\mu\nu} \Phi, \\ \mathcal{O}_{BB} &= \Phi^\dagger \hat{\mathbf{B}}_{\mu\nu} \hat{\mathbf{B}}^{\mu\nu} \Phi, \\ \mathcal{O}_W &= (D_\mu \Phi)^\dagger \hat{\mathbf{W}}^{\mu\nu} D_\nu \Phi, \\ \mathcal{O}_B &= (D_\mu \Phi)^\dagger \hat{\mathbf{B}}^{\mu\nu} D_\nu \Phi, \\ \mathcal{O}_{\Phi,1} &= (D_\mu \Phi)^\dagger \Phi^\dagger \Phi D^\mu \Phi, \end{aligned} \quad (6)$$

con Φ los campos de Higgs dobletes de $SU(2)$, D_μ la derivada covariante asociada al grupo de gauge $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$, $\hat{\mathbf{B}}_{\mu\nu} = i(g'/2)B_{\mu\nu}$ y $\hat{\mathbf{W}}_{\mu\nu} = i(g/2)\sigma^a W_{\mu\nu}^a$ donde $B_{\mu\nu}$ y $W_{\mu\nu}^a$ son los tensores de curvatura asociados a los campos de gauge de los grupos $U(1)_Y$ y $SU(2)_L$ respectivamente. El lagrangiano efectivo generado por los operadores efectivos anteriores es

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{eff} &= g_{H\gamma\gamma} H A_{\mu\nu} A^{\mu\nu} + g_{HZ\gamma}^{(1)} A_{\mu\nu} Z^\mu \partial^\nu H \\ &+ g_{HZ\gamma}^{(2)} H A_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} + g_{HZZ}^{(1)} Z_{\mu\nu} Z^\mu \partial^\nu H \\ &+ g_{HZZ}^{(2)} H Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} + g_{HZZ}^{(3)} H Z_\mu Z^\mu \end{aligned} \quad (7)$$

donde $A(Z)_{\mu\nu} = \partial_\mu A(Z)_\nu - \partial_\nu A(Z)_\mu$, y los acoplamientos efectivos están dados por

$$\begin{aligned} g_{H\gamma\gamma} &= \left(\frac{gM_W}{\Lambda^2} \right) \frac{\sin^2 \theta_W (f_{BB} + f_{WW} - f_{BW})}{2} \\ g_{HZ\gamma}^{(1)} &= \left(\frac{gM_W}{\Lambda^2} \right) \frac{\sin \theta_W (f_W - f_B)}{2 \cos \theta_W} \end{aligned}$$

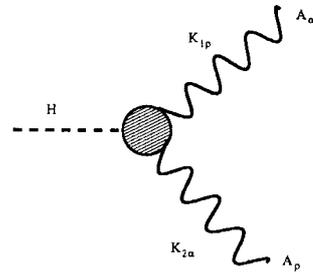


Figura 2: Decaimiento $H \rightarrow \gamma\gamma$.

$$\begin{aligned}
g_{HZ\gamma}^{(2)} &= \left(\frac{gM_W}{\Lambda^2} \right) \frac{\sin \theta_W}{2 \cos^2 \theta_W} \\
&\times [2 \sin^2 \theta_W f_{BB} - 2 \cos^2 \theta_W f_{WW} \\
&\quad + \cos 2\theta_W f_{BW}] \\
g_{HZZ}^{(1)} &= \left(\frac{gM_W}{\Lambda^2} \right) \frac{\cos^2 \theta_W f_W + \sin^2 \theta_W f_B}{2 \cos^2 \theta_W} \\
g_{HZZ}^{(2)} &= - \left(\frac{gM_W}{\Lambda^2} \right) \left[\frac{\sin^4 \theta_W f_{BB}}{2 \cos^2 \theta_W} \right. \\
&\quad \left. + \frac{\cos^4 \theta_W f_{WW} + \cos^2 \theta_W \sin^2 \theta_W f_{BW}}{2 \cos^2 \theta_W} \right] \\
g_{HZZ}^{(3)} &= 2 \left(\frac{M_W^3}{g\Lambda^2} \right) \frac{f_{\Phi,1}}{\cos^2 \theta_W} \quad (8)
\end{aligned}$$

Si suponemos que los acoplamientos f_i son del orden de la unidad y la nueva física o los modos que hemos integrado, que generaron estos operadores efectivos los modos aparecen a la escala de un TeV, entonces podemos suponer $\Lambda \approx 1000$ GeV. En este caso los acoplamientos efectivos se esperan que sean del orden de $M_W/\Lambda^2 \approx 10^{-4}$. Podría tenerse modos de la escala alta que no se desacoplen y dichos acoplamientos efectivos fueran uno o dos ordenes de magnitud mayor, lo cual favorecería enormemente los decaimientos del Higgs en los modos neutros $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow \gamma Z$ o $H \rightarrow ZZ$.

Un punto interesante es determinar los acoplamientos de los operadores efectivos generados a un loop por el ME. El ancho de decaimiento de $H \rightarrow \gamma\gamma$ esta dado por

$$\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{g_{H\gamma\gamma}^2}{\pi} m_H^3, \quad (9)$$

donde $g_{H\gamma\gamma}$ es el acoplamiento el cual puede ser generado mediante correcciones radiativas en el ME, ó mediante la teoría efectiva con las constantes de la ecuación (8), figura 2. Realizando el cálculo a un loop en el ME,

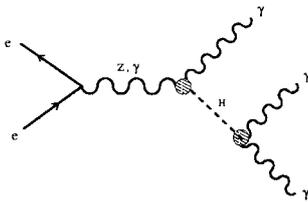


Figura 3: Proceso $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma\gamma$.

el ancho de decaimiento está dado por la expresión

$$\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma)_{MS} = \frac{\alpha^2 g^2}{1024\pi^3} \frac{m_H^3}{M_W^2} |I|^2. \quad (10)$$

Comparando las dos expresiones la constante efectiva que produce el ME debido a las correcciones a un loop está dada por:

$$g_{H\gamma\gamma} = \frac{\alpha g}{16\pi M_W} |I| \quad (11)$$

donde $|I|$ se mostrará explícitamente mas adelante en la ecuación (21). En este caso el valor límite de la constante efectiva a un loop del ME es

$$g_{H\gamma\gamma} \approx 1 \times 10^{-6} \quad (12)$$

Un análisis similar se puede hacer para el caso del decaimiento $H \rightarrow \gamma Z$ donde los valores obtenidos serían del mismo orden de magnitud.

3. Cotas a los parámetros

Acotar los parámetros de los operadores efectivos se realiza de manera indirecta usando resultados experimentales. En esta sección acotaremos cuatro de los seis parámetros. Dos de ellos (f_{BB}/Λ^2 y f_{WW}/Λ^2), serán acotados por medio de la sección eficaz del proceso $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma\gamma$, cuyo diagrama se ve en la figura 3, y el paquete *CompHEP*. Los otros dos parámetros (f_{BW}/Λ^2 y $f_{\Phi,1}/\Lambda^2$) serán acotados usando la masa del Z y del W [2].

Los resultados experimentales que usamos son de la colaboración OPAL[1]. Hemos sustraído el background del modelo estándar y hemos supuesto que la nueva física contribuye con la diferencia entre los resultados experimentales y la contribución proveniente de la electrodinámica cuántica. En la tabla 1 resumimos los datos usados en nuestro análisis.

\sqrt{S} (GeV)	\mathcal{L} (pb^{-1})	"MS"	"Exp"	σ_{anom} (pb)
130	2.69	1.0 ± 0.2	2	0.37 ± 0.07

Tabla 1: Datos usados del experimento OPAL; \mathcal{L} es la luminosidad integrada. "MS" eventos producidos por el modelo estándar. "EXP." eventos medidos experimentalmente. σ_{anom} es la sección eficaz anómala obtenida y la cual suponemos que es originada por la nueva física.

Las sección eficaz la calculamos usando el paquete *CompHEP*[3]. Las regiones permitidas para los operadores $f_{BB}/\Lambda^2 \times f_{WW}/\Lambda^2$, para diferentes masas del Higgs, se ven en las figura 4. En la medida en que la masa del Higgs aumenta, los parámetros van adquiriendo un mayor valor para evitar que la amplitud se desacople. De esta manera una masa muy pesada para el Higgs podría hacer que estos procesos adquieran una mayor importancia, si comparamos los valores obtenidos para f_i/Λ^2 con el valor predicho para la contribución a un loop del ME, ecuación (12). La simetría observada en las figuras es debida a que las únicas constantes que entran en el proceso son $g_{H\gamma\gamma}$ y $g_{HZZ}^{(2)}$ de la ecuación (8). Teniendo en cuenta que estamos suponiendo $f_{BW} = 0$, entonces la contribución anómala para el acople $H\gamma\gamma$ es cero si $f_{BB} = -f_{WW}$, lo cual coincide con el resultado obtenido en la gráfica.

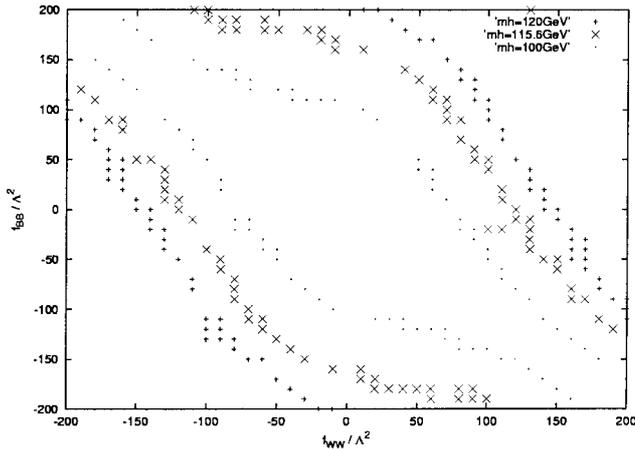


Figura 4: Regiones permitidas para el plano $f_{BB}/\Lambda^2 \times f_{WW}/\Lambda^2$ para una masa del Higgs entre 100 GeV y 120 GeV. Los valores para los ejes están dados en TeV^{-2} .

4. Cotas a los parámetros f_{BW} y $f_{\Phi,1}$

Los efectos dados por los parámetros f_{BW} y $f_{\Phi,1}$ son observables y, de experimentos de alta precisión como violación de paridad atómica, masa del W y decaimiento del μ , podemos hallar restricciones a los parámetros substrayendo del modelo estándar las contribuciones a las amplitudes. Los experimentos actuales son sensibles a efectos de un loop. Y, por tanto, se deben incluir estos efectos en cualquier tipo de análisis realizado. Los parámetros f_{BW} y $f_{\Phi,1}$, afectan las amplitudes de corrientes neutras (CN) y de corrientes cargadas (CC) a nivel árbol. En el caso de $f_{\Phi,1}$, éste afecta la masa del Z y de esta manera modificará el propagador.

Para determinar los valores de f_{BW} y $f_{\Phi,1}$ de la masa del Z y W , veamos como se corrige el propagador del campo de gauge debido a un operador efectivo o una corrección cuántica. La expresión en general para el propagador se escribe como

$$\frac{i}{p^2 - M_{phys}^2 + i\Gamma M_{phys}}, \quad (13)$$

donde M_{phys} es la masa física y Γ es el ancho de decaimiento de la partícula[4]. Este propagador puede ser expandido en teoría de perturbaciones como:

$$\begin{aligned} \frac{i}{p^2 - M_{phys}^2 + i\Gamma M_{phys}} = & \\ \frac{i}{p^2 - m^2} + \frac{i}{p^2 - m^2} \frac{1}{i} \Sigma(p) \frac{i}{p^2 - m^2} & \\ + \frac{i}{p^2 - m^2} \frac{1}{i} \Sigma(p) \frac{i}{p^2 - m^2} \frac{1}{i} \Sigma(p) \frac{i}{p^2 - m^2} + \dots, & \end{aligned} \quad (14)$$

donde $\Sigma(p)$ se le denomina el término de autointeracción, y puede ser escrito en la forma

$$\Sigma(p) = \text{Re}(\Sigma) + i\text{Im}(\Sigma). \quad (15)$$

obteniendose

$$\begin{aligned} M_{phys}^2 &\equiv M^2 - \text{Re}(\Sigma(p)), \\ \Gamma &\equiv \frac{\text{Im}(\Sigma(p))}{M_{phys}}. \end{aligned}$$

Una representación gráfica de la ecuación (14) se encuentra en la figura 5. El valor de $\Sigma(p)$ dependerá de las partículas que participen en los loops internos. Si agregáramos nueva física al ME con un parámetro f_i

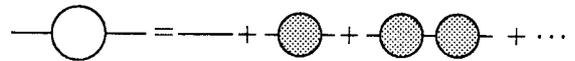


Figura 5: Representación gráfica de la ecuación (14). El círculo en blanco representa el propagador total, los círculos en gris representan las expansiones en el término de autoenergía $-i\Sigma$.

a determinar, la contribución a la masa de la partícula sería

$$M_{phys}^2 = M_{gm}^2 - \text{Re}(\Sigma(p))_{ME} - \text{Re}\Sigma(f_i)_{NP}, \quad (16)$$

donde $\Sigma(p)_{ME}$ contiene la contribución a un loop del quark Top y el Higgs, $\Sigma(f_i)_{NP}$ es la contribución dada por la nueva física. En particular los operadores \mathcal{O}_B y $\mathcal{O}_{\phi,1}$ contribuyen a $\text{Re}(\Sigma(f_i)_{NP})$ lo cual permite que los parámetros f_{BW} y $f_{\phi,1}$ se puedan acotar usando resultados experimentales recientes. Los valores que se obtienen usando la ecuación (16) son [8]:

$$f_{BW} = 3.7 + 0.085x_H \pm 2.4, \quad (17)$$

$$f_{\phi,1} = 0.30 - 0.028x_H + 0.32x_t \pm 0.16. \quad (18)$$

donde

$$\begin{aligned} x_H &= \ln \frac{M_H}{100\text{GeV}}, \\ x_t &= \frac{M_t - 175\text{GeV}}{100\text{GeV}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Para $m_H = 130$ GeV y $m_t = 175.4$ GeV obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{f_{BW}}{\Lambda^2} &= 3.7 \pm 2.4 \text{ TeV}^{-2}, \\ \frac{f_{\phi,1}}{\Lambda^2} &= 0.29 \pm 0.16 \text{ TeV}^{-2}, \end{aligned}$$

donde se ha tenido como base el hecho de que los otros operadores se anulan.

5. Desviaciones con respecto al modelo estándar

Los decaimientos del Higgs en $\gamma\gamma$ y $Z\gamma$ son afectados por las interacciones anómalas de los operadores de dimensión seis los cuales pueden contribuir a nivel de un loop. Nuestro interés se centrará en el estudio de desviaciones respecto al ME de los decaimientos $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow Z\gamma$.

5.1 $H \rightarrow \gamma\gamma$

La expresión para el decaimiento $H \rightarrow \gamma\gamma$ predicha por el ME a un loop y la contribución de los operadores efectivos se puede expresar en la forma

$$\begin{aligned} \Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma) &= \frac{\alpha \sin^2 \theta_W M_W^2 M_H^3}{4} \left| \frac{f_{BB} + f_{WW}}{\Lambda^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{f_{BW}}{\Lambda^2} + \frac{\alpha}{8\pi \sin^2 \theta_W m_W^2} I \right|^2, \end{aligned} \quad (20)$$

con

$$I = \sum_i N_{ci} e_i^2 F_i, \quad (21)$$

$i = \text{espín-0, espín-1/2 y espín-1}$, e es la carga eléctrica en unidades de la carga del electrón. N_{ci} es la multiplicidad del color (1 para leptones y 3 para quarks). Las funciones F_i están dadas por,

$$F_1 = 2 + 3\tau + 3\tau(2 - \tau)f(\tau),$$

$$F_{1/2} = -2\tau [1 + (1 - \tau)f(\tau)], \quad (22)$$

$$F_0 = \tau [1 - \tau f(\tau)], \quad (23)$$

con

$$\tau = \frac{4m_i^2}{m_H^2},$$

y

$$f(\tau) = \begin{cases} \left[\arcsin \left(\sqrt{1/\tau} \right) \right]^2 & \text{si } \tau \geq 1, \\ -\frac{1}{4} \left[\ln \left(\frac{1+\sqrt{1-\tau}}{1-\sqrt{1-\tau}} \right) \right]^2 & \text{si } \tau < 1. \end{cases} \quad (25)$$

En la figura 6 comparamos el valor predicho por ME y el valor corregido debido a la contribución de los operadores efectivos. Vemos como el valor de los operadores puede aumentar de manera significativa el ancho de decaimiento de este proceso. Dichos valores son muy importantes, porque desviaciones experimentales del ME confirmarían la contribución de nueva física,

5.2 $H \rightarrow \gamma Z$

Este proceso es muy similar al proceso $H \rightarrow \gamma\gamma$; la contribución al modelo estándar es a un loop, y de nuevo las contribuciones de los operadores de dimensión seis

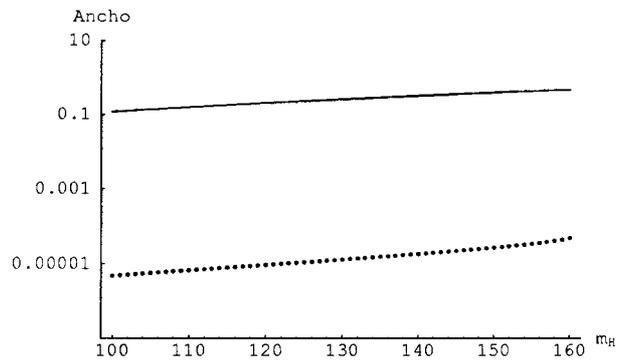


Figura 6: Decaimiento $H \rightarrow \gamma\gamma$, la línea continua es para valores de los operadores $\frac{f_{BB}}{\Lambda^2} = \frac{f_{WW}}{\Lambda^2} = 100\text{GeV}^{-2}$ y los demás operadores con un valor de cero, la línea punteada es modelo estándar puro. Los valores para la masa y el ancho de decaimiento están dados en GeV.

son a nivel árbol. El ancho total para este proceso está dado por

$$\Gamma(H \rightarrow Z\gamma) = \frac{\alpha(m_H^2 - M_Z^2)^3 M_Z^2}{16M_H^3} \left| \frac{f_W - f_B + 4\sin^2\theta_W f_{BB}}{\Lambda^2} - \frac{4\cos^2\theta_W f_{WW}}{\Lambda^2} + \frac{2(\cos^2\theta_W - \sin^2\theta_W)f_{BW}}{\Lambda^2} + \frac{\alpha}{2\pi s_W c_W m_Z^2} A \right|^2. \quad (26)$$

De (26) vemos que la parametrización del ME está dada por la función compleja $A = A_F + A_W$ [5]; A_F y A_W se pueden escribir como:

$$A_F = \sum_f N_{cf} \frac{-2e_f (T_f^{3L} - 2e_f \sin^2\theta_W)}{\sin\theta_W \cos\theta_W} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & \times [I_1(\tau_f, \lambda_f) - I_2(\tau_f, \lambda_f)], \\ A_W = & -\cot\theta_W [4(3 - \tan^2\theta_W)I_2(\tau_W, \lambda_W) \quad (28) \\ & + ((1 + 2/\tau_W)\tan^2\theta_W - (5 + 2/\tau_W)) \\ & \times I_2(\tau_W, \lambda_W)]. \end{aligned}$$

donde

$$\tau_f \equiv \frac{4m_f^2}{m_H^2}, \quad \lambda_f \equiv \frac{4m_f^2}{m_Z^2}, \quad \tau_W \equiv \frac{4m_W^2}{m_H^2}, \quad \lambda_W \equiv \frac{4m_W^2}{m_Z^2},$$

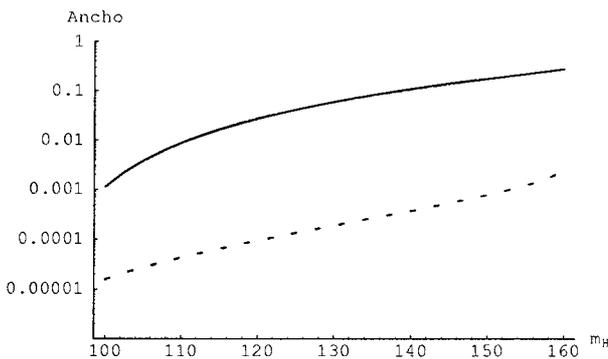


Figura 7: Decaimiento $H \rightarrow Z\gamma$, la línea continua es para valores de los operadores $\frac{f_{BB}}{\Lambda^2} = \frac{f_{WW}}{\Lambda^2} = 100 \text{ GeV}^{-2}$ y los demás operadores con un valor de cero, la línea punteada es modelo estándar puro. Los valores para la masa y el ancho de decaimiento están dados en GeV .

y las funciones I_1 e I_2 están dadas por

$$\begin{aligned} I_1(a, b) &= \frac{ab}{2(a-b)} + \frac{a^2b^2}{2(a-b)^2} [f(a) - f(b)] \\ &+ \frac{a^2b^2}{2(a-b)^2} [g(a) - g(b)], \\ I_2(a, b) &= -\frac{ab}{2(a-b)} [f(a) - f(b)], \\ g(\tau) &= \begin{cases} \sqrt{\tau-1} \text{Arcsin}(1/\sqrt{\tau}), & \text{si } \tau \geq 1 \\ \frac{1}{2}\sqrt{1-\tau} \left[\ln \left(\frac{1+\sqrt{1-\tau}}{1-\sqrt{1-\tau}} \right) \right] & \text{si } \tau \leq 1. \end{cases} \end{aligned}$$

La función $f(\tau)$ ha sido presentada en (25).

En la figura 7 vemos la comparación entre ME y la contribución dada por dos valores para f_{WW}/Λ^2 y f_{BB}/Λ^2 . Nuevamente observamos que hay aporte significativo al ancho de decaimiento de este proceso por parte de los operadores.

6. Conclusión

En este artículo se han estudiado teorías mas allá del ME mediante el uso de operadores efectivos, los cuales son útiles para parametrizar interacciones a bajas energías de teorías a mas altas energías, en las cuales se han integrado los modos pesados, a modo de ejemplo mostramos que la interacción a cuatro fermiones en la teoría de Fermi es una interacción efectiva del ME.

Se estudiaron los acoplamientos anómalos del Higgs con los bosones neutros Z y γ , y se acotaron cuatro de los seis nuevos parámetros del nuevo lagrangiano efectivo. Para ello hemos usado resultados experimentales.

Se mostrarán los posibles efectos de una teoría efectiva en los decaimientos $H \rightarrow \gamma\gamma$ y $H \rightarrow \gamma Z$, observandose una notable contribución que depende de los valores de los nuevos parámetros.

Toda posible confirmación de los resultados del presente trabajo están sujetos a la existencia de un bosón de Higgs liviano.

Agradecimientos

Los autores agradecen a COLCIENCIAS y Fundación Banco de la República, al igual que al Grupo de Física Teórica y Altas Energías de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Referencias

- [1] OPAL Collaboration, **K. Ackerstaff** et al., Eur. Phys. J. C1 (1998) 31.
- [2] **Alam, S., Dawson & R. Szalapski**. Phys. Rev. D57 (1998) 1577.
- [3] **Puknov, A., E. Boos, M. Dubinin, V. Edneral, V. Ilyin, D. Kovalenko, A. Kryukov & V. Savrin**. CompHEP- a package for evaluation of Feynman diagrams and integration over multi-particle phase space. INP MSU-94-36/358, SNUTTP 94-116 (Seoul, 1994); hep-ph/9908288, 6 de agosto de 1999.
- [4] **Itzykson, C. & J.B. Zuber**. Quantum field theory, McGraw-Hill, 1985. pg. 291-292. Singapoore.
- [5] **Gunion, J.H., Haber, G. Kane & S. Dawson**. The Higgs Hunter guide, Addison-Wesley, 1990. New York.
- [6] **Wudka José**. hep-ph/0002180 v1, 16 feb. 2000.
- [7] **Buchmüller W. & D. Wyler**. Nucl. Phys. B268 (1993) 155.
- [8] **Alam, S., S. Dawson & R. Szalapski**. Phys. Rev. D57 (1998) 1577.

LA CIENCIA DE SIMULAR PROPIEDADES DE MATERIALES

por

Álvaro L. Morales*

Resumen

Morales, A.: La ciencia de simular propiedades de materiales. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (107): 253-263, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se presentan cuatro casos de simulación de propiedades de materiales. En el primer caso existen medidas experimentales y se trata de elaborar una teoría que las reproduzca. En el segundo caso hay evidencia experimental de la existencia de un defecto y se trata de diseñar una teoría que permita realizar experimentos más definitivos. En el caso siguiente se trata de estudiar un sistema muy complejo con base en aproximaciones relativamente simples pero que dan información importante. El último caso es netamente experimental y se realiza una simulación experimental del mismo. En todos los casos se hace énfasis en la física y en los métodos teóricos y experimentales.

Palabras clave: Ciencia de Materiales, Espectroscopia Mössbauer, Espectroscopia de Aniquilación de Positrones, Sistemas de Baja Dimensionalidad.

Abstract

We present four cases of simulating material properties simulation. The first case is based on existing experiments to develop an appropriate theory to reproduce them. In the second case there is experimental evidence of a defect and an attempt is made to develop a theory from which definite experiments can be designed. The following case treats a complicated system with simple theoretical approach that, nevertheless, provides useful information. The last case is purely experimental and an experimental simulation is performed. In all cases emphasis is given to the physics of the properties and to theoretical or experimental methods.

Key words: Materials Science, Mössbauer Spectroscopy, Positron Annihilation Spectroscopy, Low Dimensional Systems.

* Grupo de Estado Sólido, Instituto de Física, Universidad de Antioquia, A.A. 1226, Medellín, Colombia. Correo-e: amoral@fisica.udea.edu.co

Introducción

La última década ha visto el desarrollo vertiginoso en la obtención de propiedades de materiales ya sea mediante cálculos teóricos, por medidas experimentales o ambos. La comunidad científica ha acuñado el término simulación para los métodos usados en estos casos para denotar la complejidad creciente de las propiedades estudiadas, aunque este término es sinónimo del más tradicional modelación. Los avances tecnológicos y el desarrollo de métodos matemáticos y físicos para la inclusión de muchas partículas, del orden de 100.000 a 500.000, y sus interacciones por medios computacionales y los avances en técnicas experimentales para medir más exactamente y en una variedad más amplia muchas propiedades han sido la causa para ampliar el lenguaje necesario para expresar dichos desarrollos. Es importante resaltar que la posibilidad de realizar estudios con mayor profundidad y complejidad ha llevado a un estilo de trabajo interdisciplinario donde varios grupos de trabajo realizan una tarea específica. A continuación se presentan cuatro casos de simulaciones, con énfasis en los procesos físicos que se quieren estudiar, la metodología para llegar a alguna respuesta razonable, y finalmente se concluye sobre las bondades del resultado final.

Espectro Auger CVV de Li y Al

La espectroscopia Auger CVV (**Almbladh & Morales, 1989**, y referencias allí citadas), Coraza-Valencia-Valencia, mide la energía de los electrones de valencia Auger que son emitidos de los sólidos. El fenómeno Auger CVV es secundario al proceso de fotoemisión. En este último un electrón es expulsado del material usando radiación electromagnética, rayos X, o radiación de partículas, bombardeando el sólido con electrones. Para nuestros propósitos nos restringiremos a un proceso primario que expulsa electrones de la coraza atómica, el núcleo y los electrones que permanecen fuertemente ligados a él, especialmente de las capas K y L. Al perder un electrón la coraza atómica adquiere una carga positiva adicional con respecto a las demás corazas atómicas del sólido, a esta pérdida nos referiremos como a la creación de un hueco en la coraza. En estos términos, el proceso Auger CVV consiste en que un electrón de valencia decae a llenar el hueco dejado en la coraza y la energía de la transición es tomada por otro electrón de valencia el cual sale del sólido permitiendo la medida de su energía (ver la figura 1). Es importante anotar que si el tiempo de vida del hueco es corto en comparación con el tiempo de relajación de la etapa primaria, donde se producen excitaciones tales como fonones (vibraciones colectivas de la red),

plasmones (excitaciones colectivas de los electrones de conducción) y pares electrón-hueco (excitaciones alrededor del nivel de Fermi donde electrones son excitados a niveles por encima del nivel de Fermi dejando huecos por debajo del mismo), estas excitaciones podrían estar presentes en el momento de ocurrir la emisión Auger y afectar el espectro, para los sistemas aquí tratados no ocurre este fenómeno. De acuerdo con estos razonamientos el estado cuántico inicial de la transición Auger es el estado que contiene un hueco en la coraza atómica y el estado final es el estado cuántico fundamental del sólido con un electrón que viaja hacia el exterior (figura 1).

Visto el proceso Auger desde la configuración espacial, figura 1, la coraza atómica al perder un electrón queda cargada positivamente y los electrones de conducción son atraídos mediante la interacción Coulombiana y se apilan alrededor de la coraza respectiva. Este apilamiento de electrones apantalla el potencial de Coulomb de la coraza tan efectivamente, para el caso de Al y Li y en general para los metales simples, que las corazas primeros vecinos no se dan cuenta de la aparición de dicho potencial. Cuando ocurre la transición Auger estos electrones se deben alejar, y restaurar la distribución periódica de los mismos, para regresar al estado fundamental del sólido. Este movimiento es una corriente eléctrica; y analizada desde el punto de vista de las energías, los electrones se mueven a estados vacíos por encima del nivel de Fermi dejando estados vacíos por debajo del mismo (llamados huecos), estos pares electrón hueco formados interactúan por medio del potencial Coulombiano y forman una excitación colectiva del sólido llamada pares electrón-hueco. Estas excitaciones pueden tener una influencia dramática en el espectro Auger CVV.

El resultado del experimento Auger CVV, para Li y Al, es mostrado en la figura 2 con el símbolo (+). Para simular este espectro, en otras palabras, para obtener partiendo de las leyes de la mecánica cuántica un espectro teórico que reproduzca el experimental y nos dé claridad acerca de cómo ocurre este proceso y cuáles son las interacciones dominantes en el mismo, debemos acudir a los métodos más sofisticados existentes en la literatura científica. En este caso usamos la teoría de funcionales de densidad (TFD) (**Hohenberg & Kohn, 1964; Kohn & Sham, 1965**) implementada a través del método LMTO, combinación lineal de orbitales de muffin-tin (molde de ponqué), (**Andersen, 1975**). Esta teoría nos proporciona los efectos de “un electrón”, que consisten en considerar que cada electrón se mueve en el campo promedio de todas las otras partículas en el sólido, y ha demostrado dar un conocimiento básico de una gran clase de propie-

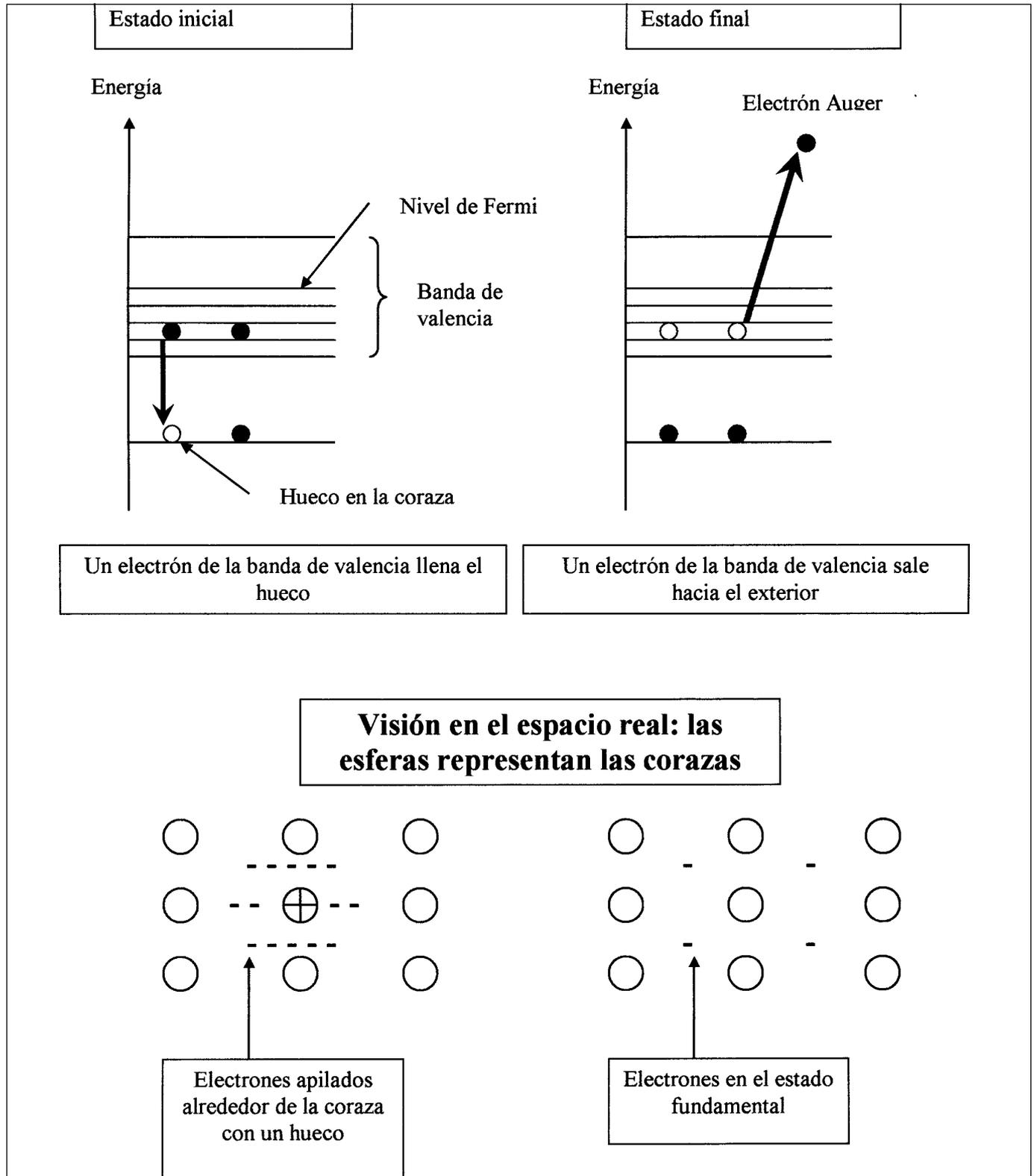


Figura 1. Estados inicial y final del proceso Auger CVV. El estado inicial contiene un hueco en la coraza atómica. El estado final contiene dos huecos en la banda de valencia y un electrón expulsado del sólido.

dades tales como energías de cohesión, los rasgos principales de las bandas de energía, y energías totales de átomos, moléculas y sólidos. Estas razones nos dan confianza en que esta metodología nos dará una descripción bastante razonable de las medidas producidas por la espectroscopia Auger CVV. La figura 2 muestra los resultados de los efectos de una partícula, la línea continua, los cuales presentan una forma similar a los experimentales pero presentan los máximos a energías menores. Esto nos lleva a concluir que el esquema de “una partícula” no describe el espectro Auger CVV. Es conveniente resaltar en este momento que la comparación con los resultados experimentales es válida desde el borde derecho, altas energías, hasta el punto máximo debido a que el espectro experimental burdo es pulido por los experimentalistas substrayendo estructuras que aparecen en la región izquierda debidas a radiación de fondo y a pérdidas de energía del electrón Auger por excitación de plasmones, excitaciones colectivas del gas de electrones.

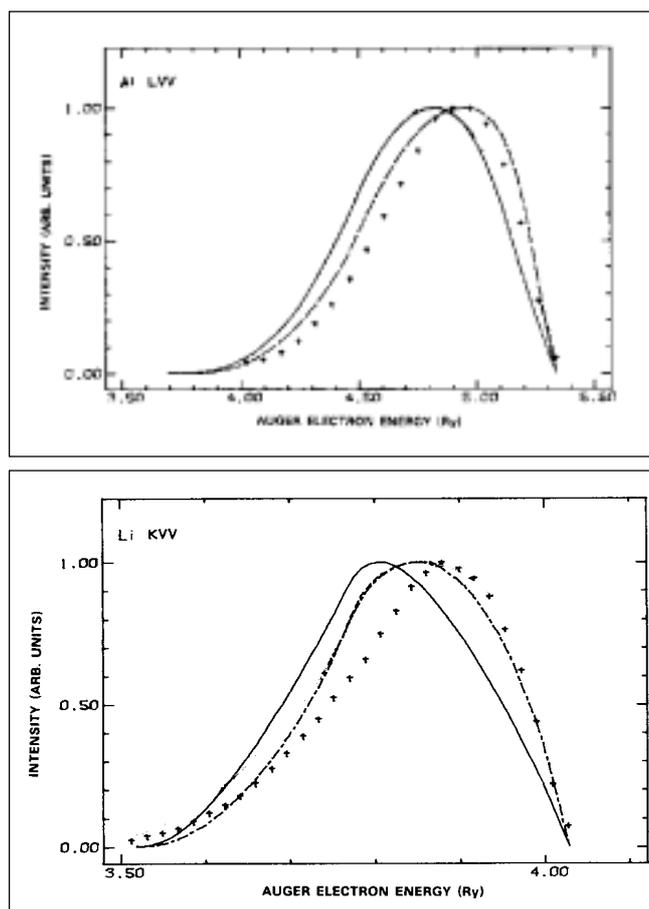


Figura 2. Comparación del espectro Auger experimental (+), para Li y Al, con el espectro simulado incluyendo sólo efectos de un electrón (línea continua), y efectos de muchos cuerpos (línea a trazos).

Para mejorar el acuerdo con los resultados experimentales es necesario incluir efectos de “muchos cuerpos” no considerados en la etapa anterior. Cuando un electrón de conducción llena el hueco presente en la coraza se produce la excitación de varios fenómenos colectivos, o de muchos cuerpos, debido a que cada partícula del sólido está conectada con todas las demás partículas, queremos decir que se producen fonones, plasmones y pares electrón-hueco. Además en su camino hacia fuera del sólido el electrón Auger sufre pérdidas de energía ya que crea plasmones volumétricos y superficiales. Todas estas pérdidas van a afectar el espectro. Los plasmones producen picos a la izquierda del máximo espectral y los fonones afectan el ancho del espectro y debido al procedimiento experimental mencionado arriba no es necesario incluirlos en una simulación ya que el espectro experimental no contiene esta información.

En su desplazamiento hacia el detector el electrón Auger se encuentra con la superficie del sólido la cual en general presenta propiedades muy diferentes del volumen, y en particular la energía de los electrones Auger para metales simples es del orden de 100 eV y por lo tanto el camino libre medio es de unos cuantos ángstrom, en consecuencia los electrones Auger que logran salir al exterior deben provenir de sitios atómicos cercanos a la superficie o de la superficie misma. Recordemos que la superficie está constituida por unos cuantos planos atómicos.

Para tener en cuenta los efectos de pares electrón-hueco se consideró un modelo de fermiones libres, el modelo de Mahan-Nozieres-De Dominicis (Mahan, 1967, Nozières & De Dominicis, 1969). Este modelo describe la dinámica de la transición Auger al pasar del estado inicial, con un hueco en la coraza, al estado final que es el estado fundamental del sólido. Los parámetros del modelo fueron ajustados para que reprodujeran los resultados de una partícula usando la técnica LMTO discutida anteriormente. Fue, por lo tanto, necesario calcular las energías del sólido con la presencia de un hueco en una de las corazas, esta es una simulación compleja ya que el potencial en esa coraza no es igual al potencial en todas las demás y de esta manera se rompe la simetría traslacional lo que impide utilizar el Teorema de Bloch para un cristal. Para simular esta impureza, el hueco en la coraza, se utilizó la técnica de considerar un agregado de átomos del cristal, manteniendo la estructura atómica del mismo, constituyendo una celda unitaria de gran tamaño con una de las corazas conteniendo un hueco. Esta celda unitaria se repite en todas las direcciones restaurando artificialmente la simetría traslacional y de esta manera se puede utilizar de nuevo el método LMTO para hallar los estados

energéticos y las funciones de onda. La celda utilizada contenía 16 átomos y fue el menor tamaño que garantizó una interacción pequeña entre las impurezas de celdas vecinas y el menor tiempo de computación. Los resultados se muestran en la figura 2 solo para Li (línea a trazos), para Al son muy pequeños como se discutirá más adelante, donde son muy importantes mejorando la descripción teórica del espectro y mostrando que los efectos de “un electrón” y colectivos de pares electrón-hueco describen razonablemente la región de altas energías del espectro Auger KVV, para Li el hueco se encuentra en la capa K.

Para tener en cuenta los efectos de la superficie, cambios en la distribución de energías de los electrones de conducción, y del camino libre del electrón Auger se simuló la superficie usando el método de tajadas, este consiste en construir una celda unitaria compuesta por un número adecuado de capas atómicas separadas por regiones vacías; con base en esta celda se restaura la simetría traslacional y se realiza el cálculo de funciones de onda y autovalores utilizando el método LMTO. La inclusión de los efectos de superficie para Al mejoran sustancialmente la comparación con el espectro LVV, con hueco en la capa L, experimental (figura 2 línea a trazos), para Li estos defectos son despreciables.

En conclusión para describir razonablemente el espectro Auger CVV en metales simples, y dependiendo del sistema particular, es necesario incluir efectos dinámicos debidos a la desaparición del hueco en el estado inicial del proceso y/o efectos de superficie debidos a la distorsión de los estados electrónicos como consecuencia del rompimiento de la simetría traslacional. Esta simulación demostró la necesidad de incluir efectos adicionales a los efectos de una partícula para obtener una descripción más adecuada de este tipo de proceso Auger.

Defectos en Silicio

El silicio es el material más importante en la actualidad debido a sus aplicaciones en dispositivos semiconductores los cuales se usan prácticamente en toda nuestra vida cotidiana. También es uno de los materiales más estudiados en todas sus propiedades cuyo conocimiento es necesario para mejorar su desempeño y conseguir aplicaciones más sofisticadas. A pesar de todo esto, el entendimiento de todas las propiedades del Si parece estar cada día más lejano. Por ejemplo la existencia de defectos en el material como vacancias, divacancias, agregados de vacancias, y complejos como vacancia-oxígeno, divacancia-oxígeno, vacancia- (múltiples oxígenos), etc., pueden afectar notablemente las características eléctricas del

material ya que producen estados de impureza en la banda prohibida. El papel que juegan estos defectos en las propiedades del material ha sido muy estudiado pero aún no se entiende plenamente.

El Si es producido por el método de Czochralsky y por la técnica de zonas flotantes. En la primera se obtienen concentraciones de oxígeno del orden de 10^{18} y en el segundo caso la concentración es dos órdenes de magnitud menor. Debido a estas altas concentraciones de oxígeno se forman complejos vacancia-oxígeno los cuales han atraído el interés de la comunidad científica. A temperatura ambiente las vacancias aisladas no son estables y se unen a otras vacancias y al oxígeno para formar, por ejemplo, defectos vacancia-oxígeno (VO), vacancia-dos oxígenos (VO_2), dos vacancias-oxígeno (V_2O), y agregados mayores de defectos. **Trauwaert et al.**, (1995) encontraron evidencia indirecta de la existencia del defecto V_2O y por lo tanto es necesario encontrar resultados más directos para su verificación.

El método más adecuado para simular defectos en materiales, tanto desde el punto de vista teórico como experimental, es la técnica de aniquilación de positrones. Esta técnica consiste en enviar positrones hacia el material los cuales son atrapados fácilmente por estos defectos debido a que allí encuentran la menor repulsión Coulombiana por parte de las corazas iónicas. Los positrones atrapados se aniquilan con los electrones que los rodean con un tiempo de vida que es proporcional a la densidad de carga electrónica, este tiempo de vida es medido experimentalmente y es una huella digital del defecto, desafortunadamente muchos defectos pueden presentar tiempos de vida similares lo que hace difícil su identificación. Sin embargo, la aniquilación de positrones también permite medir la energía llevada por los rayos gama producidos en la aniquilación y esta energía lleva información de la colisión electrón-positrón la cual ocurre entre un positrón sin energía cinética, atrapado en la red y en equilibrio térmico con el sólido, y un electrón que tiene una velocidad debida al estado cuántico de energía en que se encuentra. Esta velocidad produce un “ensanchamiento Doppler” de la energía del rayo gama producto de la desintegración, un aumento de la energía del rayo gama con respecto a una aniquilación en el vacío, y contiene información directa de la distribución de velocidades (o momentos) de los electrones. La medida del ensanchamiento Doppler proveniente de aniquilación con los electrones de la coraza iónica, también conocido como componentes altas del momento, trae información sobre el medio químico del defecto (**Kuriplach et al.**, 1998, y referencias allí citadas), o la distribución atómica

a su alrededor, y esta información adicional permite una mejor caracterización del defecto.

Usando la teoría de funcionales de densidad implementada con métodos autoconsistentes como el LMTO y no autoconsistentes como el método de superposición atómica (ATSUP), es posible calcular los tiempos de vida del positrón y la distribución de componentes altas del momento de los electrones. La diferencia esencial entre estos métodos es en el tamaño de la celda unitaria que se puede utilizar la cual es substancialmente mayor para el caso no autoconsistente. La comparación con los valores experimentales arroja luces sobre la identificación de los defectos. La implementación de estos métodos para este caso debe incluir el hecho de que por definición el positrón tiene sus números cuánticos diferentes a los del electrón, no se aplica el principio de exclusión de Pauli, y por lo tanto estamos ante la descripción de un sistema de dos componentes interactuantes, electrones y positrones.

Para simular estas propiedades de los defectos una parte generalmente considerando defectos ideales (figura 3), que son aquellos obtenidos al retirar uno o varios átomos de un cristal perfecto; así, si retiro un átomo de Si obtengo una vacancia ideal. Los resultados obtenidos de esta manera arrojan tendencias sobre el comportamiento de los defectos, pero en la realidad del laboratorio los defectos nunca son ideales debido a que al retirar un átomo se tiene un desequilibrio de las fuerzas que actúan sobre los átomos vecinos y la fuerza resultante mueve los átomos hasta alcanzar un nuevo equilibrio. En consecuencia los átomos alrededor del defecto ya no se encuentran en las posiciones ordenadas del cristal, se produce un rompimiento de la simetría traslacional, y para simularlo es necesario utilizar el método descrito en la sección anterior. Además, para simular un defecto real debemos conocer las posiciones actuales de los átomos. Esta es una tarea muy difícil y en sí misma requiere una simulación especial. Afortunadamente esta es un área muy activa en la literatura y allí encontramos una simulación de las nuevas posiciones para el defecto V_2O (Ewels *et al.*, 1995).

La Tabla 1 muestra una comparación de cálculos teóricos y medidas experimentales para los defectos divacancia y V_2O , vemos que el tiempo de vida no sería decisivo para identificar el defecto pues los valores se cruzarían con los de la divacancia, nótese la imprecisión en las medidas. Los valores para el cristal perfecto (volumen) se muestran para comparación. La figura 4 muestra los cálculos de la distribución de momentos para las corazas (normalizada con respecto al volumen), comparados

con la divacancia y el volumen, vemos que es posible identificar el defecto pero hasta el momento no se tienen medidas experimentales de buena calidad. Esta simulación está esperando que algún grupo experimental perfeccione las medidas de ensanchamiento Doppler de la radiación gama proveniente de la desintegración del po-

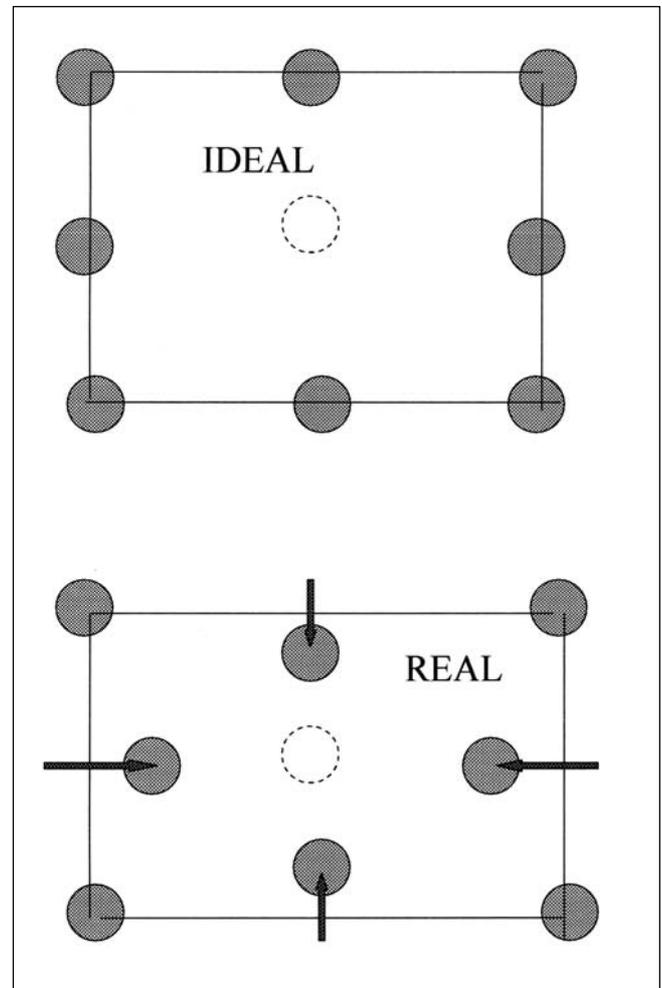


Figura 3. Formación de una vacancia ideal y esquema de las deformaciones que ocurren en una vacancia real.

Tabla 1. Tiempos de vida usando el LMTO y el ATSUP en picosegundos (ps) para V_2O

Defecto	ATSUP (ps)	LMTO (ps)	Experimento (ps)
Volumen	218	220	218
Divacancia ideal	302	299	
Divacancia real	286		295-325
V_2O real	297	286	

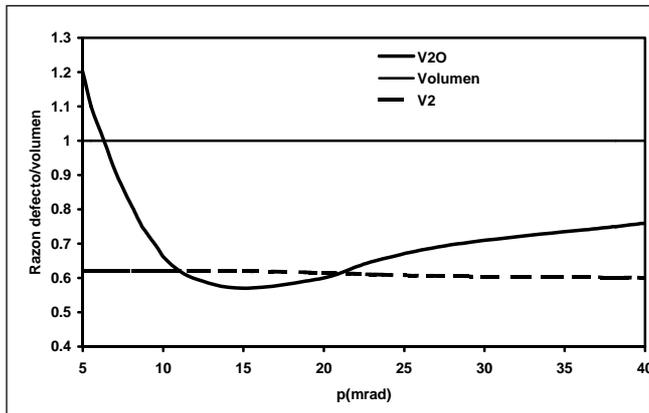


Figura 4. Razón entre la distribución de momentos del defecto y la distribución de momentos en el volumen para una divacancia y el defecto V_2O . La diferencia implica que este último es distinguible en este tipo de experimentos.

sitrón atrapado por el defecto, y también el perfeccionamiento en la obtención de una muestra que contenga un número apreciable de dichos defectos.

Estructuras de baja dimensionalidad

Las técnicas modernas de crecimiento de materiales, tales como crecimiento epitaxial por haces moleculares, deposición de la fase química de vapor de compuestos metal-orgánicos, litografía por haces de electrones, han llevado a la producción de estructuras cristalinas cada vez de menores dimensiones y más perfectas. Sistemas de este tipo basados en semiconductores como GaAs son muy promisorios para desarrollar dispositivos electrónicos más pequeños y eficientes y por ende a multitud de nuevas aplicaciones. La figura 5 muestra esquemáticamente como se construye un pozo cuántico de GaAs-(Ga,Al)As, este consiste de una capa de GaAs del orden de 2-20 nm incrustada entre dos capas de $Ga_{1-x}Al_xAs$, con x del orden de 0.3-0.4, con una forma plana. La región entre los dos materiales, la región de la interfaz, presenta un cambio abrupto en las propiedades electrónicas de ambos materiales y esta característica es la primordial para el comportamiento físico de estas heteroestructuras. Para comparación mencionamos la diferencia con las junturas p-n creadas uniendo el mismo material semiconductor con diferentes impurezas, tipo p con impurezas aceptoras, y tipo n con impurezas donadoras. La juntura p-n es una interfaz entre los dos materiales pero para llegar al equilibrio termodinámico ocurre un flujo de electrones hacia el material tipo p y de huecos hacia el material tipo n. El pozo cuántico ideal involucra dos materiales semiconductores diferentes, los cuales no se han dopado, y no hay transferencia de

cargas al formar la interfaz, esta debe estar libre de impurezas, defectos y deformaciones. La sustitución de Al por Ga produce un material con un ancho de la banda prohibida, región de energías prohibidas para el electrón que separa la banda de valencia y la banda de conducción, mayor que en GaAs (ver la parte inferior de la Figura 5 que muestra el pozo desde el punto de vista de la energía). De esta forma tenemos que la región central tiene estados posibles para el electrón y las regiones vecinas son prohibidas para él, en consecuencia el electrón que puede estar en el pozo se encuentra confinado a una región espacial muy pequeña en la dirección perpendicular a las interfaces, pero es libre en las otras dos direcciones. La diferencia de energías entre estas dos regiones constituye la barrera de potencial que es alrededor de 0.25 eV para GaAs. Este confinamiento produce estados cuantizados que tendrán consecuencias determinantes en las propiedades de los pozos y de donde se derivan las posibles aplicaciones para construir dispositivos electrónicos. Si adicionalmente se confina el sistema en otra dirección,

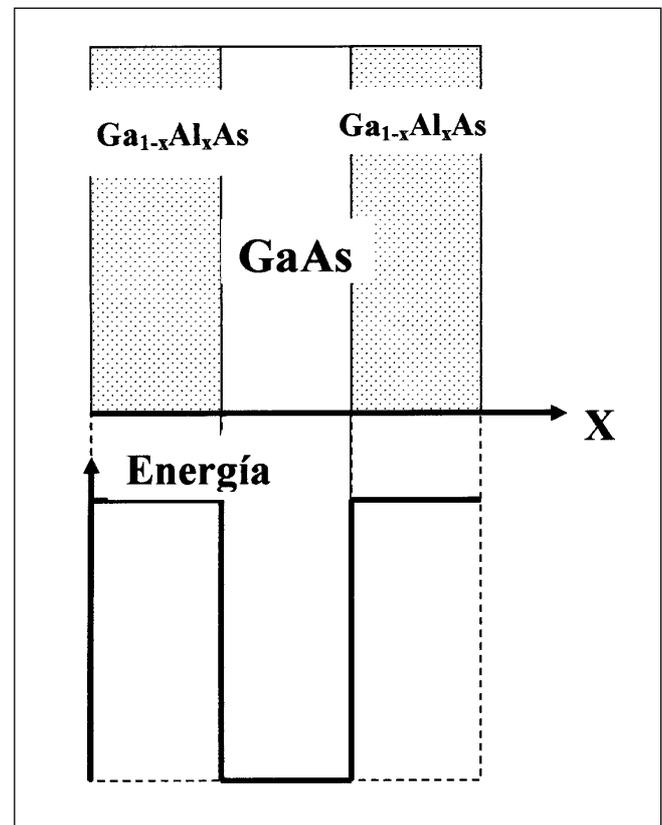


Figura 5. Esquema de cómo se construye un pozo cuántico. La parte inferior muestra el pozo desde el punto de vista de las energías posibles de los electrones.

creciendo otras dos interfaces, se obtiene un hilo cuántico y si se confina en todas las direcciones se obtiene un punto cuántico. Experimentalmente también se producen pozos dobles, múltiples, así como arreglos de puntos e hilos cuánticos.

El pozo cuántico posee propiedades fundamentales, sus estados cuánticos de energía, y otras propiedades derivadas como propiedades ópticas y propiedades del transporte. Cada propiedad que se quiera simular constituye una línea de investigación muy vasta dentro del estado sólido. Debido a la importancia de conocer los estados de impurezas confinadas dentro del pozo, sometidas a diferentes campos externos, nos hemos dedicado a simular tales propiedades. Su importancia se deriva de la necesidad de conocer este comportamiento el cual tiene incidencia en la dinámica de portadores y en los mecanismos de recombinación, en procesos de transporte, y que finalmente llevará a perfeccionar estas heteroestructuras para aplicaciones futuras. Hemos considerado un pozo cuántico, con una impureza donadora, sometido a los efectos simultáneos de una presión hidrostática y un campo eléctrico externos (Morales *et al.*, 2002, y referencias allí citadas).

La modelación de estas propiedades puede ser una tarea titánica si se piensa en métodos de primeros principios, anteriormente mencionados. Sin embargo, existen métodos menos sofisticados, y de avanzada, que producen información muy valiosa como la aproximación de la masa efectiva donde se reemplaza la compleja estructura de bandas del sistema (figura 6), la energía como función del momento cristalino (\mathbf{K}), por una masa efectiva para el electrón, calculada en el mínimo de la banda de conducción. En otras palabras, la interacción del electrón con la red cristalina se incluye redefiniendo su masa.

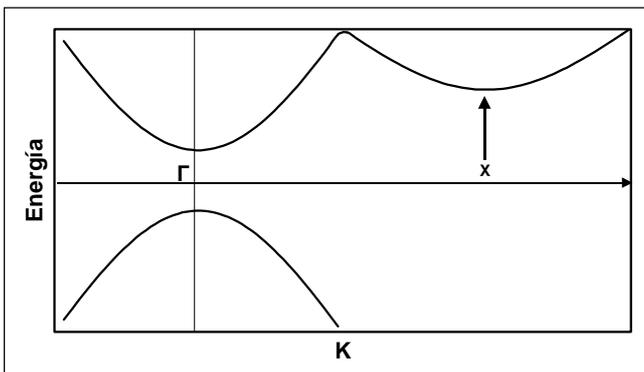


Figura 6. Esquema de las bandas de energía del GaAs material base para la construcción de pozos cuánticos.

El uso de esta metodología ha sido probada por varias décadas y sigue proporcionando información valiosa para estos sistemas. Los efectos de la presión se han tomado de los datos experimentales, citados en la literatura científica, para el cambio de la masa efectiva y la altura de la barrera de potencial en función de la presión. La inclusión del campo eléctrico en el hamiltoniano del sistema no presenta problema ya que se obtiene fácilmente una solución numérica; así mismo el término de la impureza se calcula usando el método variacional de la mecánica cuántica, el cual consiste en construir una función de onda dependiente de parámetros apropiados y minimizar la energía con respecto a estos. Con estos valores para la energía se obtiene la energía de enlace del electrón (figura 7), la cual muestra una variación lineal creciente, para un pozo de 20 nm y un campo eléctrico aplicado de 100 KV/cm, en función de la presión y el campo eléctrico hasta un valor de 13.5 Kbar. En este valor el GaAs pasa de ser un cristal de banda prohibida directa, el mínimo de la banda de conducción y el máximo de la banda de valencia ocurren al valor $\mathbf{K} = 0$, a banda indirecta, donde el mínimo de la banda de conducción ocurre a un valor de $\mathbf{K} \neq 0$. El fenómeno se debe a que al variar la presión el valor mínimo de la energía en la banda de conducción cambia del punto $\mathbf{K} = 0$ (punto Γ) a un valor $\mathbf{K} = \mathbf{K}_x$ (punto X), conocido en la literatura científica como el cruce Γ -X (figura 6). Para presiones mayores la altura de la barrera decrece fuertemente y la energía de enlace decrece. Para comparación y para observar solo el efecto de la presión se muestra el caso sin

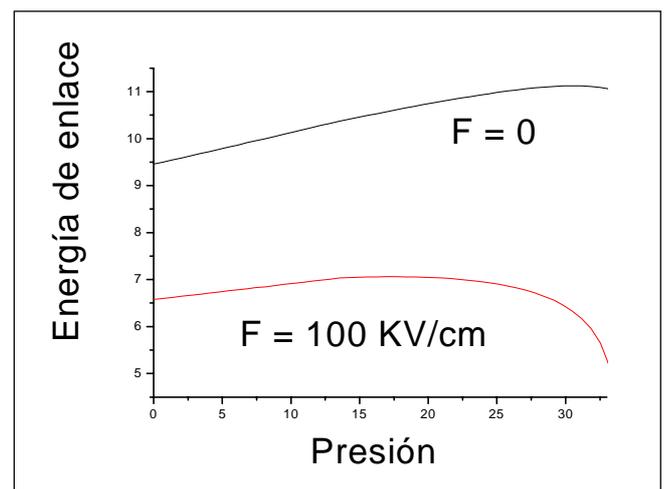


Figura 7. Energía de enlace, para un electrón en un pozo cuántico, en función de la presión. En la figura de arriba el campo eléctrico es cero. La figura de abajo muestra el efecto simultáneo de campo eléctrico y presión sobre el electrón.

campo eléctrico aplicado. Esta información es muy útil para los experimentalistas que pueden tener una visión de los efectos de la presión y el campo eléctrico, externos y/o internos, aplicados sobre las posibles energías del electrón confinado en la estructura.

La corrosión en aceros autoprotectores

Son bien conocidas las propiedades protectoras o inhibidoras de la corrosión de la película de herrumbre que se forma sobre un acero autoprotector, cuando las condiciones atmosféricas y climáticas son poco agresivas. Lo que es poco conocido, a pesar de todas las investigaciones realizadas, son los mecanismos de formación de dicha capa y del papel que juega cada fase, óxido de hierro, en tales propiedades. El entendimiento de los mecanismos de corrosión sería el primer paso para desarrollar procedimientos de protección efectivos que disminuyan los costos debidos al deterioro de los aceros y aumente su funcionalidad en aplicaciones diversas.

Los aceros de baja aleación, o autoprotectores, se caracterizan por contener pequeñas cantidades, del orden de 0.5% at., de cationes Cr^{3+} , Cu^{2+} , y Mn^{2+} , los cuales le imparten sus características de protección especialmente en atmósferas con bajos contenidos de contaminantes, cloruros y sulfatos. La Tabla 2 presenta la composición típica de ellos y para comparación se incluye la composición de un acero de bajo contenido de carbono (A36). La herrumbre formada sobre la superficie del material presenta una estructura de capas (Cook *et al.*, 1999), la principal situada sobre la superficie del acero está compuesta por goethita, la más externa es una capa de lepidocrocita, y entreveradas aparecen pequeñas capas de magnetita y/o maghemita. Del orden de 80% de la herrumbre es goethita. Esta última fase es muy especial por cuanto su tamaño de partícula es muy pequeña, del orden de unos cuantos nanómetros, y se tiene evidencia que contiene cationes de Cr^{3+} reemplazando al Fe; y además, es un óxido que presenta propiedades magnéticas y eléctricas que deben jugar un papel fundamental en su comportamiento. Estas propiedades son las responsables para

la formación de una capa homogénea, impermeable, muy densa, y con buenas propiedades mecánicas que impide la penetración hacia la superficie del acero de la humedad, el oxígeno, los contaminantes y de esta forma impide el proceso electroquímico responsable del deterioro del material.

En razón que la goethita es la fase más importante en la herrumbre del acero autoprotector se ha diseñado un experimento que simule su formación y sus propiedades morfológicas, eléctricas y magnéticas; y de esta manera obtener luces que sirvan de guía en el entendimiento de los posibles mecanismos que controlan el proceso corrosivo (Morales *et al.*, 2003, y referencias allí citadas). La idea es producir goethita a partir de precursores químicos que contengan elementos presentes en la superficie del acero tales como hierro, cromo, cobre, manganeso, carbono, cloruros, sulfatos, agua, y oxígeno. La Tabla 3 muestra las síntesis realizadas conjuntamente con resultados de difracción de rayos X (XRD) y medidas BET de área superficial. Hay dos grupos de reacciones, en el primero se parte del precursor cloruro ferroso para obtener las muestras GC, CrGC y MnGC, estas últimas en presencia de los cationes Cr^{3+} y Mn^{2+} , en el segundo se usa sulfato ferroso para producir GS y CuGS, esta última en presencia de Cu^{2+} . En todos los experimentos se usa el carbonato de sodio para simular la presencia del carbono y se burbujea oxígeno durante la reacción para simular su presencia. XRD muestra goethita pura para las síntesis basadas en cloruro ferroso y una mezcla de goethita y lepidocrocita para las derivadas de sulfato ferroso. Las medidas BET muestran un tamaño de partícula menor para CrGC.

Las muestras obtenidas fueron analizadas mediante la espectroscopia Mössbauer, en el modo de transmisión, usando una fuente de ^{57}Co en matriz de Rh, a temperaturas ambiente (TA) y de nitrógeno líquido (TNL). El análisis del espectro Mössbauer requiere de la confección de un modelo acorde con la información que el mismo muestra, este modelo se aplica a través de un programa computacional, en este caso se usó el DIST3E (Vanden-

Tabla 2. Composición típica de aceros autoprotectores comparados con la de un acero de bajo carbono.

Acero	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu	Al
A588	0.14	0.97	0.012	0.016	0.12	0.31	0.59	0.36	0.037
A588	0.12	1.06	0.006	0.013	0.77	0.01	0.59	0.33	0.038
A588	0.14	1.00	0.009	0.018	0.75	0.31	0.57	0.35	0.052
A588	0.14	0.76	0.018	0.022	0.337	0.03	0.46	0.44	0.007
A36	0.073	0.54	0.009	0.011	0.007	0.022	0.000	<0.001	0.004

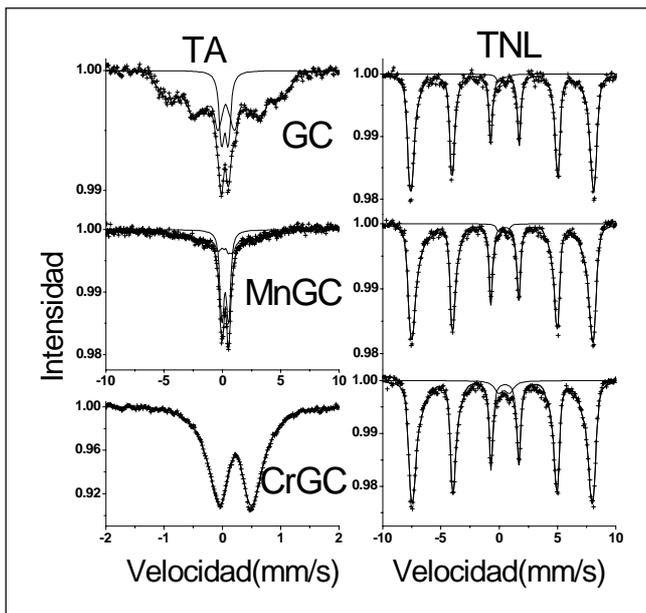


Figura 8. Espectros Mössbauer de la goethita a temperatura ambiente y a temperatura de nitrógeno líquido.

Tabla 3. Síntesis de goethita

Muestra	Reacción química	XRD	BET (m ² /g)
GC	FeCl ₂ ·4H ₂ O + NaHCO ₃	G	99.1 ± 0.4
CrGC	FeCl ₂ ·4H ₂ O + 5%CrCl ₃ + NaHCO ₃	G	
MnGC	FeCl ₂ ·4H ₂ O + 5%MnCl ₂ + NaHCO ₃	G	
GS	FeSO ₄ ·7H ₂ O + NaHCO ₃	G + L	47 ± 1
CuGS	FeSO ₄ ·7H ₂ O + 5%CuSO ₄ + NaHCO ₃	G + L	

berghe *et al.*, 1994). El espectro para analizar es muy complejo como se puede ver en la Figura 8, para los casos GC, MnGC, y CrGC, estos muestran a TA un doblete y un sexteto muy anchos para GC, y se vuelven más anchos siguiendo la secuencia MnGC, CrGC. En este último el sexteto ha desaparecido por completo. La forma del espectro nos dice que la goethita puede tener propiedades morfológicas, eléctricas, y magnéticas, provenientes de una posible combinación de características tales como poseer una distribución extensa de tamaño de partículas, partículas con muchas imperfecciones cristalográficas, sustitución de catión por hierro importante, efectos de relajación debidos a la presencia de partículas menores de 13 nm. Todas estas características, aún por separado, pueden llevar a obtener un espectro de esta forma y no existe una manera de separar estas contribuciones. El es-

pectro a TNL nos muestra un sexteto dominante y un doblete muy pequeño, la forma asimétrica de las líneas nos confirma las características ya mencionadas. Las peculiaridades del espectro nos llevan a usar un análisis basado en distribuciones pero independiente de las propiedades de la muestra. En otras palabras, existe una distribución de los parámetros hiperfinos de la muestra que pueden provenir de distintas fuentes las cuales no podemos determinar separadamente. Este desconocimiento no fue un impedimento ya que el objetivo fundamental de la simulación fue obtener una tendencia en la distribución de tamaño de partículas (tp) basados en los tamaños críticos, que producen una desaparición del sexteto, a TA, 13 nm, y a TNL, 8 nm.

La Tabla 4 muestra los resultados para la distribución de tamaños de partícula en cada sistema comparado con la obtenida para un acero autoprotector (AA) (Cook *et al.*, 1999).

Tabla 4. Distribución de tamaño de partícula para la goethita

	tp < 8nm	8nm < tp < 13 nm	tp > 13 nm	BET (m ² /g)
GS			100	
CuGS		19	81	47
GC	2	16	82	
MnGC	2	47	51	
CrGC	5	95	0	99
AA	10	48	42	
Promedio	2	54	44	

Los resultados de esta simulación nos dan una idea de los procesos que posiblemente suceden sobre la superficie del acero y del papel que cumplen los cationes de Cr³⁺, Cu²⁺, y Mn²⁺ en la formación de una capa protectora, con las propiedades adecuadas antes mencionadas. Vemos que los cationes inducen la formación de partículas nanométricas de goethita lo cual es un paso fundamental para la obtención de dicha película inhibidora de la corrosión. Cr es el catión que induce la formación en mayor porcentaje de partículas nanofásicas, le siguen Mn y Cu en ese orden. Comparando los valores encontrados en el AA con el promedio sobre las goethitas producidas en la presencia de los cationes obtenemos unos números que nos muestran una tendencia bastante razonable que nos lleva a concluir sobre un posible efecto combinado necesario para obtener las excelentes propiedades de los aceros de baja aleación.

Conclusiones

La simulación de propiedades de materiales requiere de varios pasos, no necesariamente sucesivos, necesarios para llegar a un resultado exitoso. El paso más importante es el de tener un conocimiento profundo de la física que rodea la propiedad en cuestión. Es muy importante conocer cómo se mide la cantidad física, cuáles son las limitaciones experimentales en su medida y cuáles son los procedimientos que los experimentalistas usan para presentar sus resultados. El conocimiento de la literatura científica al respecto nos proporciona información valiosa sobre los métodos usados en modelaciones anteriores y los que corrientemente se usan en el presente y cuál es el estado actual en la descripción de la propiedad. También la literatura científica nos brinda datos muy valiosos que nos permiten enriquecer los estudios que realizamos y ahorrarnos pasos intermedios relativamente complejos. Tomar la decisión apropiada sobre el método computacional más ventajoso de acuerdo con los recursos que se tienen o desarrollar los programas computacionales apropiados para el problema que se enfrenta. Realizar pruebas suficientes de los programas computacionales que se van a utilizar.

El caso de simular las propiedades anticorrosivas de aceros autoprotectores es muy compleja ya que aún no es posible plantear el problema desde las bases electroquímicas del mismo y menos a partir de las leyes de la mecánica cuántica y es necesario acudir a simulaciones de tipo experimental que por lo menos arrojen alguna luz sobre los procesos que allí ocurren.

Bibliografía

- Almbladh C.-O. & A.L. Morales** 1989. Theory of Auger core-valence-valence processes in simple metals. I. Total yields and core level lifetime widths. *Phys. Rev B* 39, 3489-3502.
- . 1989. Theory of Auger core-valence-valence processes in simple metals. II. Dynamical and surface effects on Auger line shapes. *Phys. Rev B* 39, 3503-3516.
- Andersen O.K.** 1975. Linear methods in band theory. *Phys. Rev. B* 12, 3060.
- Cook D.C., S.J. Oh, R. Balasubramanian & M. Yamashita.** 1999. *Hyp. Int.* 122, 59-70.
- Ewels C.P., Jones R. & S. Öberg.** 1995. *Mater. Sci. Forum* 196-201, 1297.
- Hohenberg P. & W. Kohn.** 1964. *Phys. Rev. B* 136 B864.
- Kohn W. & L.J. Sham.** 1965. *Phys. Rev. B* 140, A1133.
- Kuriplach J., A.L. Morales, C. Dauwe, D. Segers & M. Šob.** 1998. Vacancies and vacancy-oxygen complexes in silicon: Positron annihilation with core electrons. *Phys. Rev. B* 58, 10475-10483.
- Mahan D.G.** 1967. *Phys. Rev* 163, 612.
- Nozières P. & De Dominicis C.T.** 1969. *Phys. Rev.* 178, 1097.
- Morales A.L., C.A. Barrero, F. Jaramillo, C. Arroyave & J.M. Greneche.** 2003. Properties of goethite grown under the presence of Cr^{3+} , Cu^{2+} , y Mn^{2+} ions. (Aceptado para publicación en *Hyperfine Interactions*).
- Morales A.L., A. Montes, S.Y. López & C.A Duque.** 2002. Simultaneous effects of hydrostatic stress and an electric field on donors in a GaAs-(Ga,Al)As. *J. Phys. Condens. Matter* 14, 987-995.
- Trauwaert M.-A., J. Vanhellefont, H. E. Maes, M.A. Van Babel, G. Langouche & P. Clauws.** 1995. *App. Phys. Lett.* 66, 3056
- Vandenbergh R., E. De Grave & P.M.A. De Bakker.** 1994. *Hyp. Int.* 83, 29.

PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y MAGNÉTICAS DE ACEROS Fe-Mn-Al, “FERMANAL”

por

G. A. Pérez Alcázar*

Resumen

Pérez-Alcázar, G.A.: Propiedades estructurales y magnéticas de aceros Fe-Mn-Al, “Fermanal”. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28**(107): 265-274, 2004. ISSN 0370-3908.

Se hace una revisión de los reportes encontrados en la literatura y de aquellos obtenidos en el Grupo de Metalurgia Física y Teoría de Transiciones de Fase (GMTF) de la Universidad del Valle, relativos a las propiedades mecánicas, estructurales y magnéticas de los aceros Fe-Mn-Al. Se analizan las aplicaciones actuales de este sistema y las perspectivas de su futuro uso.

Palabras clave: Acero “Fermanal”, propiedades magnéticas, corrosión resistencia, magnetismo, Fe-Mn-Al.

Abstract

In the present work we review reports found in the literature and results obtained by the Physic Metallurgy and Phase Transitions Group (GMTF) of the Universidad del Valle related to the mechanical, structural and magnetic properties of the Fe-Mn-Al steels. Actual applications of this system and perspectives for its further use are analyzed.

Key words: Stainless Steels, magnetic properties, corrosion resistance, soft magnetism, Fe-Mn-Al alloys.

1. Introducción

Las aleaciones Fe-Mn-Al han presentado un enorme interés principalmente desde el punto de vista tecnológico, porque presentan grandes similitudes con los aceros inoxidable convencionales, los cuales son producidos con base en la aleación ternaria Fe-Ni-Cr. En estos aceros el Cr

estabiliza la fase BCC o ferrítica y le da el carácter inoxidable al producir una camada superficial muy fina de óxido de Cr que protege el acero de futura oxidación, ya que es una camada pasivante. Este mismo papel lo desempeña el Al en las diferentes aleaciones. El Ni estabiliza la fase FCC o austenítica, la cual tiene las mejores propiedades mecánicas. La misma función la cumple el Mn en diferen-

* Departamento de Física, Universidad del Valle, A. A. 25360, Cali, Colombia.

tes aleaciones. Una ventaja de los aceros con base en Fe-Mn-Al, llamados aceros Ferromanal, con relación a los aceros convencionales es que tienen menor costo y peso. Presentan además excelentes propiedades mecánicas y buena resistencia a la oxidación (Charles & Berghean, 1981; Tomaszewics & Wallwork, 1984) y a la corrosión (Agudelo, Marco, Gracia, Gancedo & Pérez Alcázar, 1998; & Rodríguez, Bohórquez, Pérez Alcázar, Gracia, Marco & Gancedo, 2002).

Varios diagramas de fase estructural del sistema Fe-Mn-Al han sido reportados por diferentes investigadores y están resumidos en un artículo de revisión de Rivlin en 1983. El primer diagrama lo reportaron Koster & Tonn en 1933, el cual fue corroborado posteriormente por otros autores. El diagrama más importante fue obtenido por Chakrabarti en 1976 utilizando difracción de rayos X en aleaciones, que después de ser fundidas en horno a arco, se trataron térmicamente a 1000°C durante una semana y luego templadas en agua helada con el objetivo de mantener la estructura de 1000 °C. En este diagrama, la fase FCC presenta la región de composición más amplia, superior a la reportada en los diagramas de 750 y 1050 °C. Se han encontrado fases tales como α -Fe (BCC), γ -Fe (FCC), b-Mn, FeAl_3 , MnAl_6 y del tipo CsCl (BCC). La gran mayoría de los trabajos encontrados en la literatura antes de 1983 relacionados con este sistema, fueron resumidos por Rivlin (1983). Una revisión más completa y actualizada fue hecha por Bilmes, González, Llorente, Cuyás & Solari (1994).

Recientes estudios teóricos publicados por Rosales Rivera, Pérez Alcázar & Plascak (1992) y por Zamora, Pérez Alcázar, Bohórquez, Rosales Rivera & Plascak (1995) y experimentales publicados por Kobeissi (1991), Zamora, Pérez Alcázar, Bohórquez, Marco & González (1997) y González, Pérez Alcázar, Zamora, Tabares & Greneche (2002), relacionados con las propiedades magnéticas de los aceros Fe-Mn-Al, reportan que en la estructura BCC, dependiendo de la temperatura y la composición de la aleación, aparece una gran variedad de fases magnéticas. Se reportan fases tales como paramagnética (P), ferromagnética (F), antiferromagnética (AF), superparamagnética (SP), vidrio de espín (VE) y vidrio de espín reentrante (VER) en las fases F y AF. Recientemente Restrepo, Pérez Alcázar & González (2000), reportaron que algunas de las aleaciones en la fase F presentan un carácter semi-blando, carácter que las torna como un potencial material para ser usado como núcleo de transformadores. En la estructura FCC, los estudios experimentales de Pérez Alcázar, Galvão da Silva & Paduani (1991) y teóricos de Osorio, Zamora & Pérez

Alcázar (1996), reportan que solamente las fases AF y P existen.

En este trabajo se hace una revisión de las propiedades mecánicas, estructurales de resistencia a la corrosión y magnéticas obtenidas de los estudios experimentales y teóricos en estos aceros. Se hace un análisis de las perspectivas de uso de ellos en los diferentes campos tecnológicos.

2. Diagrama de fases principal

La figura 1 muestra el diagrama de fase ternario isotérmico a 1000°C reportado por Chakrabarti (1997). Este diagrama fue propuesto de acuerdo a los resultados obtenidos por difracción de rayos X y exámenes metalográficos en aleaciones fundidas, tratadas térmicamente durante 7 días a 1000°C y posteriormente templadas en agua helada. Las tres fases estructurales principales que se pueden observar en este diagrama son la FCC o austenita, CsCl (BCC) o ferrita y la b-Mn. Otras isoterms han sido recopiladas por Rivlin (1983), pero la más utilizada es la de Chakrabarti ya que presenta el mayor campo de composición de la fase FCC, fase que usualmente presenta las mejores propiedades mecánicas.

3. Propiedades mecánicas

Banerji (1978), reporta un trabajo muy completo de las principales propiedades mecánicas de los aceros Fe-Mn-Al a temperatura ambiente y a 650°C. Estas propiedades

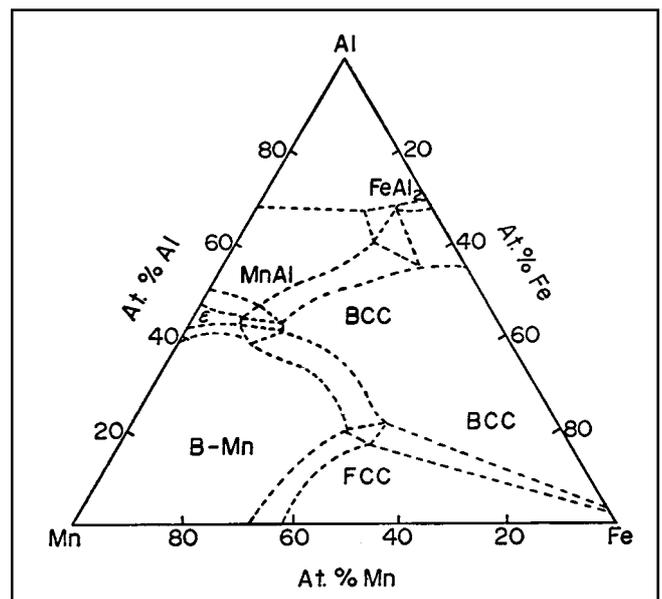


Figura 1. Diagrama de fases estructural de 1000°C del sistema ternario Fe-Mn-Al.

las compara con las obtenidas, en las mismas condiciones, para un acero al carbono y dos aceros inoxidable tipo 304 y 347. En la figura 2 se muestra dicha comparación. Se puede notar que a temperatura ambiente, la resistencia a la fluencia y a la tracción de los aceros Fe-Mn-Al son mayores que las de los aceros tipo 304 y 347 y muy superiores a las del acero al carbono. Es posible notar que aún a 650°C estas propiedades en los aceros al carbono y los inoxidables, son inferiores a las del acero Fe-Mn-Al. **Kayak** (1969), reporta también algunas propiedades mecánicas de este sistema y muestra que a diferentes temperaturas, estas dependen principalmente de la concentración de Al y muy poco de la concentración de Mn.

Resultados más recientes obtenidos por **Mina, Prieto, Aguilar, Rodríguez, Morales & Pérez Alcázar** (1995) y **Rodríguez, Bohórquez, Pérez Alcázar, Mina, Aguilar y Morales** (1996), reportan el efecto del carbono y el Al en la microdureza y microestructura de este acero. Comparando los resultados de agregar 0.5 y 1% at. C (0.2-0.26 % en masa) y entre 5 y 7.5% at. Al (2.5-3.2% en masa), consiguen mostrar que las mayores durezas se obtienen para 1 % at. C y que la fase FCC queda mejor consolidada y libre de poros para 7.5% at. Al. Finalmente, **Rodríguez, Jiménez, Adeva, Bohórquez, Pérez Alcázar, Fernández & Chao** (1998), reportaron un estudio de las propiedades mecánicas y estructurales a 77 y 290 K de aleaciones con 1% at. C y 7.5% at. Al, variando el contenido de Mn. Mostraron que para contenidos de Mn > 15%, las aleaciones son austeníticas y que para Mn < 15% ellas presentan la estructura bifásica austenita + martensita. El comportamiento por ellos obtenido para el límite elástico y la resistencia máxima a la tracción, así como del alargamiento a carga máxima en función del contenido en peso de Mn, se ilustran en las figuras 3a y 3b, respectivamente. Estos

resultados muestran que las aleaciones con contenidos de Mn entre 15 y 35% Mn, presentan las mejores propiedades mecánicas y que estas son mejores a 77 K que a 290 K o temperatura ambiente. Según los autores, estos resultados son una consecuencia de la formación de una mayor cantidad de maclas a bajas temperaturas.

4. Resistencia a la corrosión-oxidación

El comportamiento ante la oxidación de estas aleaciones ha sido ampliamente investigado. **Tomaszewicz & Wallwork** (1984), publicaron la primera revisión al respecto y en uno de los trabajos que citan se realiza un investigación sistemática de la oxidación de aleaciones Fe-Mn-Al en la fase FCC con y sin carbono, y encuentran que solamente las aleaciones con Al entre 8 y 12% at. y Mn entre 2.5 y 10% at. presentan una camada pasivante de Al_2O_3 que las hace resistentes a la oxidación, inclusive a 982°C. **Tjong** (1990), analiza la composición y microestructura de la camada de óxido formada en estos aceros en atmósferas de SO_2/O_2 a 900°C. Encuentra una camada externa de $(FeMn)_2O_3$ y otra de Al_2O_3 entre esta y el sustrato. Posteriormente **Tjong & Swart** (1991), demuestran que se forman diferentes tipos de capas superficiales dependiendo de la dosis de oxígeno y de la temperatura. **Liu & Chang** (1997), proponen un modelo de los pasos de oxidación y carburización de aceros Fe-Mn-Al en el rango entre 900 y 1070°C. En general, los estudios de oxidación de estos aceros han demostrado que su desempeño es pobre comparado con los aceros inoxidables.

Son muchos los estudios de oxidación reportados en estas aleaciones y muy pocos aquellos que tienen que ver con la corrosión. Todos corresponden a la corrosión mari-

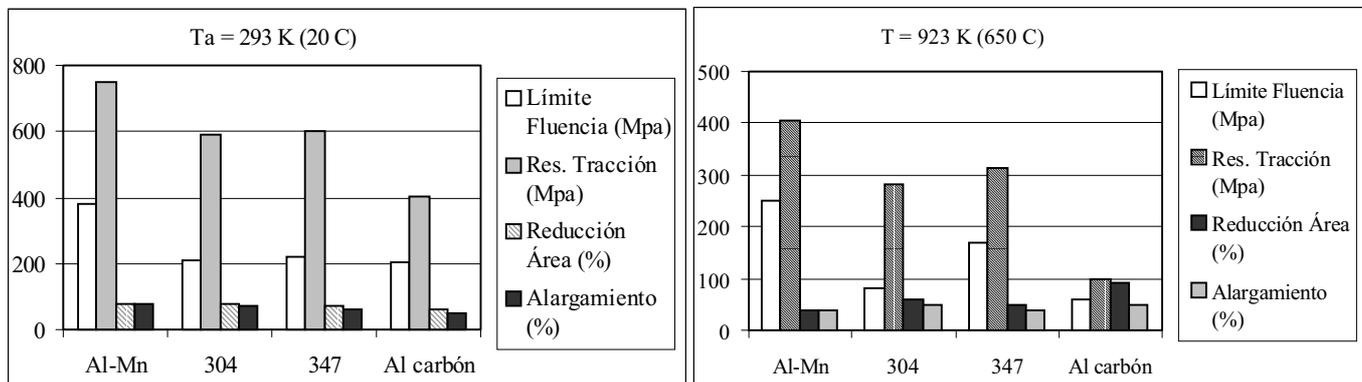


Figura 2. Propiedades mecánicas de un acero Al-Mn (10.2, 34.4, 0.76 % at. Al, Mn, C respectivamente), comparadas con dos aceros al Cr-Ni y un acero al carbono

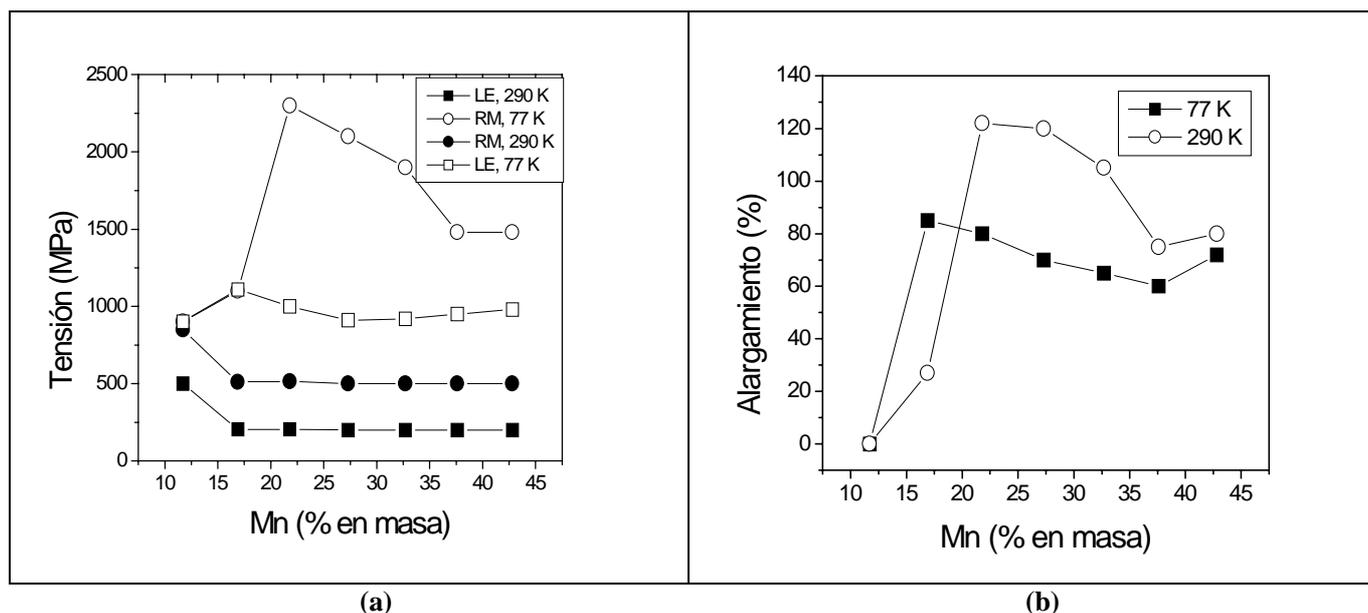


Figura 3a. Límite elástico (LE) y resistencia máxima (RM) a 77 y 290 K, y b) Alargamiento a 77 y 290 K, para diferentes contenidos de Mn

na en atmósferas simuladas y se reportan resultados contradictorios. Solamente dos trabajos han sido reportados sobre la corrosión de estos aceros en atmósferas de SO_2 . El primero de ellos publicado por **Agudelo, Marco, Gracia, Gancedo & Pérez Alcázar** (1998). En este trabajo se reportan los resultados de someter aleaciones Fe-Mn-Al austeníticas, con 5% at. Al y 0.5 % at. C y 4 concentraciones diferentes de Mn, a ciclos húmedo-seco (98 y 15% de humedad durante 6 y 18 horas, respectivamente). De acuerdo con la ganancia de peso de estas aleaciones, se concluye que su velocidad de corrosión es entre 2 y 5.5 veces menor que la del Fe y de los aceros autopasivables o Corten. Entre las aleaciones Fe-Mn-Al la de mejor comportamiento es aquella con 19.5% Mn. Los productos principales de corrosión encontrados fueron $\text{FeSO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, oxihidróxidos de Fe, sulfato de Mn y alúmina (Al_2O_3).

El segundo trabajo fue reportado por **Rodríguez, Bohórquez, Pérez Alcázar, Gracia, Marco & Gancedo** (2002). Teniendo en cuenta que las mejores propiedades mecánicas se obtienen cuando el acero contiene 7.5% at. Al y 1% at. C y que además los aceros Corten contienen 0.3% at. Cu, se prepararon dos de estas aleaciones sin Cu y con 55 y 80 % Fe (aleaciones A_2 y A_7) y dos con 0.3% at. Cu y 55 y 80% at. Fe (aleaciones B_2 y B_7). Se sometieron a ciclos de corrosión húmedo-seco en atmósfera de SO_2 . Los productos de corrosión obtenidos

son similares a los reportados en el trabajo anterior, corroborando que el Mn emigra a la superficie para formar sulfatos y sulfitos que la protegen de una posterior corrosión. La figura 4a ilustra cómo las muestras ganan peso en función del número de ciclos. Se nota que para 8 ciclos la velocidad de corrosión es básicamente la misma para las cuatro aleaciones. A partir de este punto, las aleaciones A_7 y B_7 , aquellas con mayor contenido de Fe, presentan una mayor rapidez de corrosión, mientras que las muestras con mayor contenido de Mn, A_2 y B_2 , presentan la menor velocidad de corrosión. Entre estas dos últimas aleaciones, aquella que contiene Cu se corroe menos, probando el efecto benéfico de este elemento. A manera de comparación, se incluyen en la figura 4b los gráficos del aumento de peso de una muestra de Fe puro y otra de un acero autopasivable o Corten, sometidas al mismo proceso de corrosión. Se puede notar que los aceros al Mn se corroen con una velocidad mucho menor. Particularmente, la aleación B_2 gana un peso del orden de 20 veces menor que el acero Corten y 35 veces menor que el Fe puro.

Resumiendo los anteriores resultados, podemos concluir que los aceros al Mn presentan mejores resistencias a la corrosión que el Fe y los aceros Corten, y que dependiendo del contenido de Al y de Mn, la velocidad de la corrosión puede ser entre 2 y 35 veces menor.

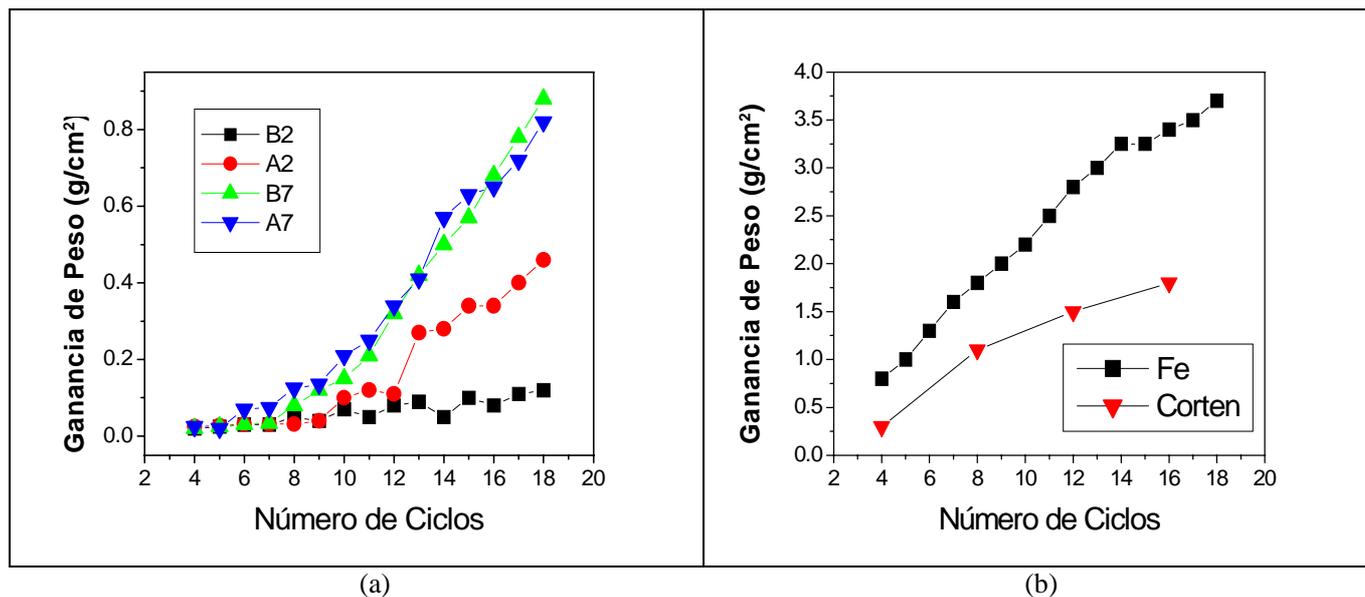


Figura 4. Ganancia de peso vs. Número de ciclos, a) para aceros al Mn y, b) para Fe puro y el acero Corten.

5. Propiedades magnéticas

Las contribuciones más importantes y numerosas encontradas en la literatura respecto al sistema Fe-Mn-Al son en el campo de los estudios experimentales de sus propiedades magnéticas. Estos estudios se reportan en aleaciones preparadas de acuerdo al método de **Chakravarti** (1977) y en muestras con estructuras BCC y FCC. Los estudios estructurales se llevaron a cabo mediante la difracción de rayos X y los magnéticos con el uso de la espectroscopia Mössbauer, susceptibilidad magnética, magnetización y calorimetría.

5.1 Aleaciones con estructura BCC

La mayoría de los trabajos previos reportados en este sistema con estructura BCC se refieren a aleaciones binarias Fe-Al. Los estudios magnéticos de **Arrot & Sato** (1959), **Vincze** (1971), **Shiga & Nakamura** (1976), y otros, comprobaron que estas aleaciones son **F** desordenadas entre 0 y 18% at. Al independiente del tipo de tratamiento térmico utilizado en su preparación; **F** con orden tipo Fe_3Al entre 18 y 33 % at. Al y **P** con orden tipo FeAl, si son enfriadas lentamente desde 700°C; **F** tipo FeAl entre 18 y 33% at. Al y **P** tipo FeAl entre 33 y 50% at. Al si ellas son templadas desde 700 °C. Entre 28 y 33 % at. Al un comportamiento anómalo se reportó en la curva de magnetización, el cual fue explicado por **Shiga & Nakamura** con la presencia de una fase **VE**. **Pérez Alcázar & Galvão da Silva** (1987) prueban que siguiendo el

método de preparación de **Chakravarti** (1977), es posible extender la fase **F** desordenada hasta 47.5% at. Al.

El primer reporte teórico-experimental utilizando la espectroscopia Mössbauer y el método de la desigualdad de Bogoliubov, propuesto por **Ferreira, Salinas & Oliveira** (1997) sobre las propiedades magnéticas de aleaciones Fe-Mn-Al en la fase BCC a temperatura ambiente (T_a), fue realizado por **Pérez Alcázar, Plascak & Galvão da Silva** (1988). Se reporta un diagrama de fase a T_a con una fase **F** para contenidos altos de Fe y una fase **P** para bajos contenidos de Fe. El Al y el Mn fueron considerados como diluidores magnéticos. Un trabajo teórico posterior realizado por **Rosales Rivera, Pérez Alcázar & Plascak** (1990), donde se utiliza el método de los Grupos de Renormalización Campo Medio (**GRCM**) aplicado a un modelo de Ising diluido y con enlaces aleatorios, propone diferentes diagramas de fase teóricos en función de la composición de Fe para diferentes contenidos de Al. En este trabajo el Mn actúa como **AF**, el Fe como **F** y el Al como diluidor magnético. Se postula por primera vez en la literatura y desde el punto de vista teórico las fases **VE** y **VER**, y se interpretan mejor los resultados experimentales reportados previamente. La primera evidencia experimental de la existencia de la fase **VE** en este sistema, fue reportada por **Kobeissi** (1991) y de la fase **VER** por **Pérez Alcázar, Tabares, Bohórquez & Gancedo** y **Zamora, Pérez Alcázar, Bohórquez & Tabares** (1994).

El primer diagrama de fase magnético obtenido experimentalmente por espectroscopia Mössbauer, fue reportado por **Zamora, Pérez Alcázar, Bohórquez & Tabares** (1997), trabajando en aleaciones con 30% at. Al y ricas en Fe. Se reportan las fases **P**, **F** y **VER**. Este diagrama se completó posteriormente utilizando espectroscopia Mössbauer y susceptibilidad magnética, el cual se muestra en la figura 5 por círculos y triángulos, respectivamente. También se ilustra el diagrama de fase teórico (líneas) obtenido mediante el uso del método de los **GRCM** aplicado a un modelo de Ising diluido y con enlaces aleatorios, el cual concuerda muy bien con el obtenido experimentalmente.

Las figuras 6a y 6b ilustran la manera como se puede determinar por espectroscopia Mössbauer y susceptibilidad magnética la presencia de la fase **VE**, respectivamente. En la figura 6a se puede notar que la curva de campo hiperfino medio vs. temperatura, muestra un cambio de

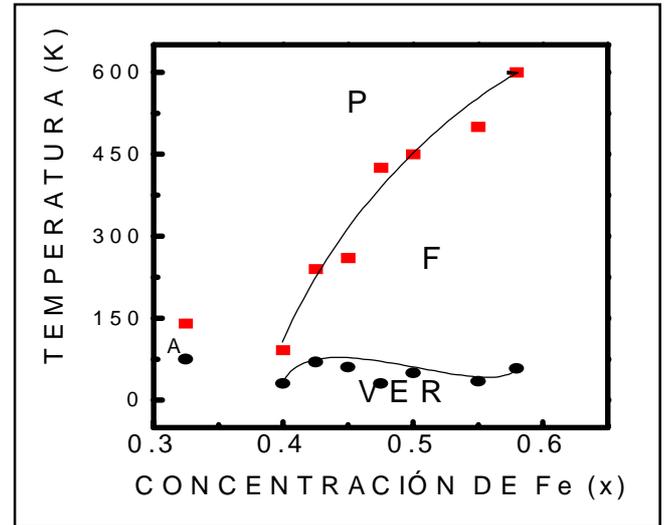


Figura 5. Diagrama de fase magnético para aleaciones Fe-Mn-Al con 30 % at. Al.

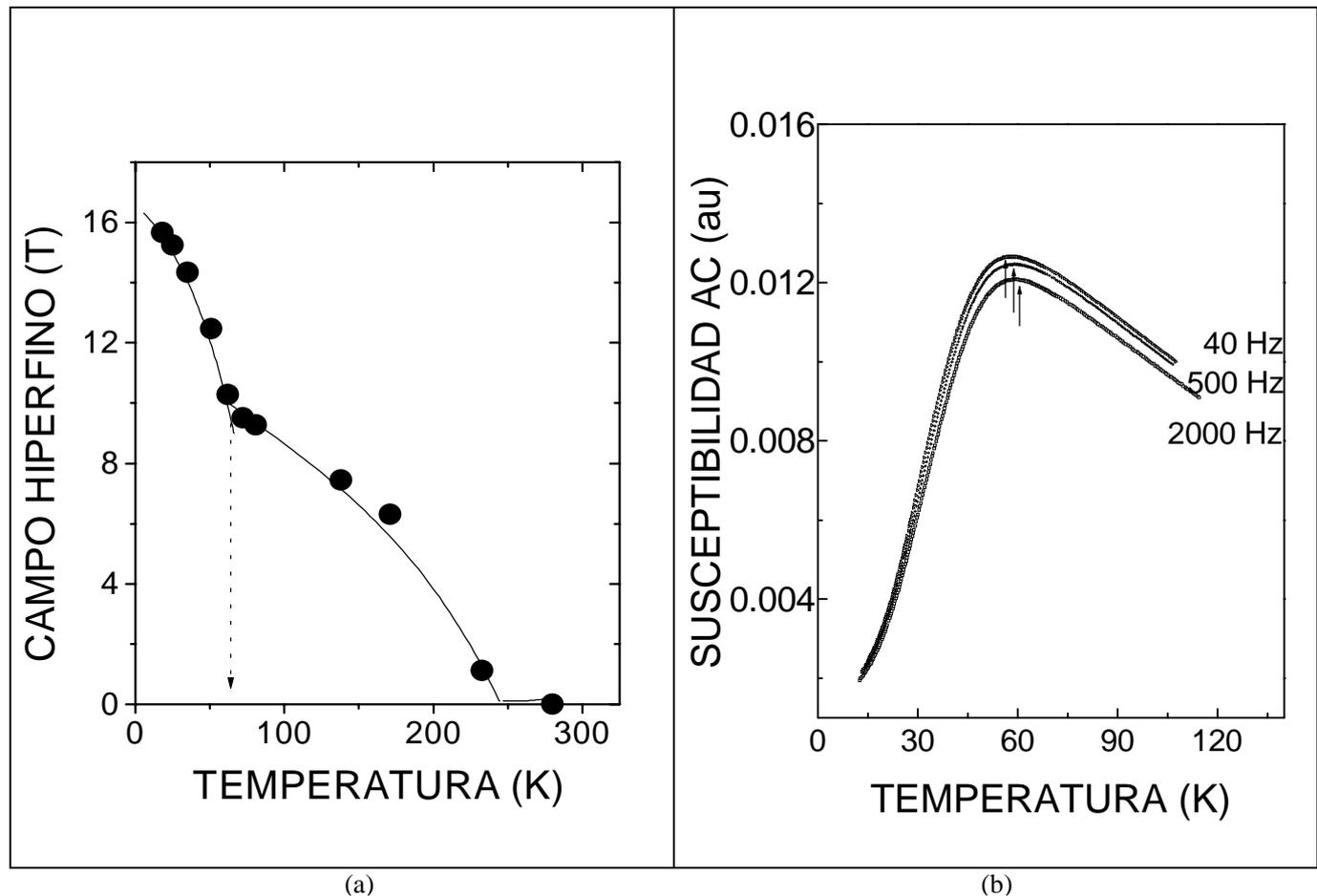


Figura 6 a) Campo hiperfino medio vs. temperatura y b) susceptibilidad vs. temperatura para la muestra con 30% at. Al y 42.5% at. Fe.

curvatura a la temperatura de "congelamiento" que es la de transición **F** a **VE**. En la figura 6b se ilustra cómo el pico de la transición **F** a **VE** se corre hacia mayores temperaturas cuando la frecuencia del campo alterno aplicado aumenta.

El diagrama de fase magnético para las aleaciones con 30 % at. Mn, obtenido por espectroscopia Mössbauer y susceptibilidad magnética, fue reportado por **Zamora, Pérez Alcázar, Tabares, Bohórquez, Marco & González** (2000). Este diagrama, no mostrado aquí, presenta las siguientes fases: **F** para altos contenidos de Fe, **AF** para bajos contenidos de Fe (altos de Mn), **VER** para bajas temperaturas y todas las concentraciones, **P** para todas las concentraciones y altas temperaturas y una nueva fase no reportada hasta ese momento que es la **SP**, la cual está por encima de la **AF**.

El diagrama de fase magnético para estas aleaciones con 40% at. Al, obtenido por espectroscopia Mössbauer a diferentes temperaturas, susceptibilidad magnética y calorimetría ac, fue reportado por **González, Pérez Alcázar, Zamora, Tabares & Greneche** (2002). Este diagrama es ilustrado en la figura 7 y en él aparecen todas las fases anteriormente reportadas, pero adicionalmente se reporta una nueva, no reportada en la literatura anteriormente, que se denominó súper paramagnética reentrante **SPR**.

La figura 8 ilustra cómo la espectroscopia Mössbauer permitió detectar en la muestra con 50 % at. Fe la presencia de diferentes fases. Se nota que el campo hiperfino medio es nulo arriba de ~ 340 K donde el sistema es **P**,

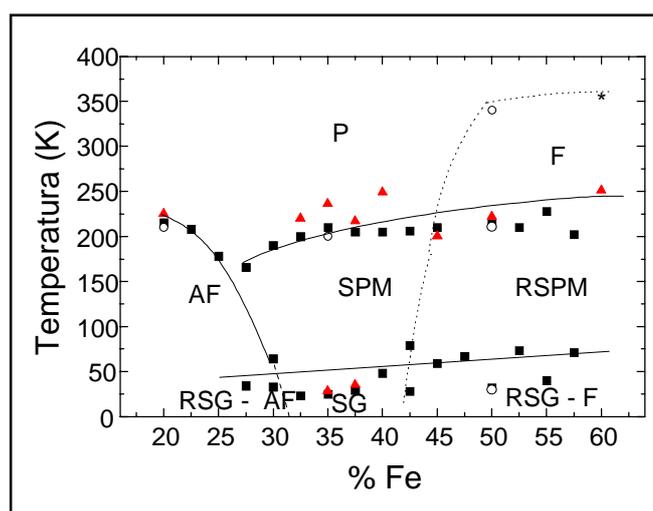


Figura 7. Diagrama de fase magnético para aleaciones con 40% at. Al. Susceptibilidad ac = cuadrados, calorimetría = triángulos y Mössbauer = círculos.

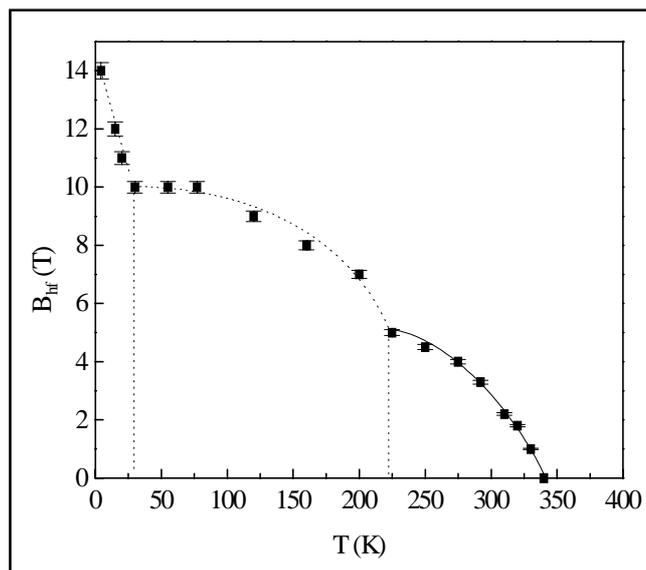


Figura 8. Campo hiperfino medio en función de la temperatura para la muestra con 50 % at. Fe y 40 % at. Al.

comienza a hacerse diferente de cero a una temperatura cerca de 340 K donde la transición **P-F** se presenta, luego crece y cerca de 220 K presenta un cambio de curvatura donde se da la transición **F-SPR** y finalmente cerca de 30 K un nuevo cambio de curvatura se presenta, correspondiendo a la transición **SPR-VER**. Para explicar la gran variedad de comportamientos magnéticos observados en este sistema, hay que recordar que todos los reportes de la literatura han determinado que el Fe se comporta como **F**, el Mn como **AF** y el Al como diamagnético. Para el caso de los aceros Fe-Mn-Al del presente estudio, ellos se prepararon siguiendo el método de **Chakravarti**, método que garantiza que las muestras sean desordenadas. De acuerdo con lo anterior, se puede explicar el comportamiento mostrado en la figura 8 para el campo hiperfino medio, de la siguiente manera: para altas temperaturas la muestra es paramagnética con espines orientados al azar, pero debido al desorden, algunos sitios de Fe son muy ricos en Fe formando aglomerados, por lo tanto, estos aglomerados se rodearán de átomos de Mn y Al, otros sitios de Fe son ricos en primeros vecinos Fe, otros sitios tendrán un número equivalente de Fe y Mn como primeros vecinos presentando competición entre enlaces **F** y **AF**, y finalmente existe la probabilidad de encontrar otros sitios de Fe muy pobres en Fe y ricos en Al. Por lo tanto, al bajar la temperatura y llegar a ~ 340 K, los sitios de Fe ricos en Fe se alinearán entre sí dando lugar a una matriz **F** y los sitios muy ricos en Fe que forman aglomerados también se alinearán pero no interactúan con otros aglomerados. Aquellos sitios de Fe con

similar número de vecinos Fe y Mn continuarán como paramagnéticos. Al continuar disminuyendo la temperatura, el alineamiento **F** se hace más intenso aumentando el campo medio pero aún los aglomerados no se interconectan entre sí. Al llegar a la temperatura de 220 K los aglomerados se bloquean entre si dando lugar a **SP** y si disminuimos más la temperatura estos comienzan a contribuir al aumento del campo hiperfino medio adicional al alineamiento **F** de la matriz. Al continuar la disminución de la temperatura se llega a 30 K, donde aquellos sitios de Fe que presentan competición de interacciones se congelarán para dar lugar a la fase **VE** y ellos comenzarán a aportar al campo medio. Un raciocinio similar se puede postular para explicar los otros comportamientos en otras regiones de los diagramas de fase magnéticos donde las otras fases están presentes.

Un estudio muy interesante, no sólo desde el punto de vista físico como desde aquel de las posibles aplicaciones tecnológicas de este sistema, fue el reportado por **Restrepo, Pérez Alcázar & González** (2000), sobre las propiedades magnéticas y estructurales de aleaciones Fe-Mn-Al con 10 % at. Mn. Este estudio se realizó con el uso de la espectroscopia Mössbauer, susceptibilidad magnética y magnetometría. Se reportó además del diagrama de fase magnético, una curva de la forma como varía el campo coercitivo en función del contenido de Al, tal como se muestra en la figura 9. En ella podemos notar que el campo coercitivo presenta valores máximos del orden de 20 Oe y decrece progresivamente con el aumento del contenido de Al. Estos valores están dentro del rango de materiales mag-

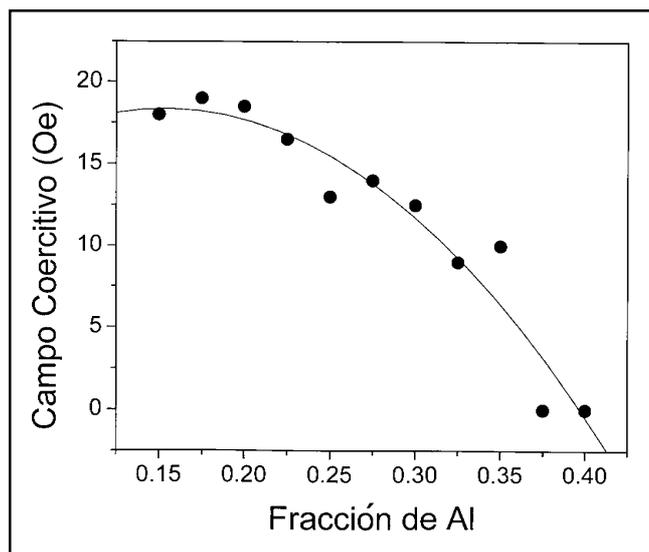


Figura 9. Campo coercitivo en función del contenido de Al para aleaciones fundidas con 10 at. % Mn.

néticamente blandos, que los hace factibles de utilizar como materiales de núcleos de transformadores.

5.2 Aleaciones con estructura FCC

La mayoría de los trabajos previos reportados en este sistema con estructura FCC se refieren a aleaciones binarias Fe-Mn. Los principales trabajos sobre las propiedades magnéticas de estas aleaciones binarias son los reportados por **Umebayashi & Ishikawa** (1996), **Ishikawa & Endoh** (1967) y **Endoh & Ishikawa** (1971). Las propiedades estructurales las recopiló **Hansen & Ardenko** (1995). Los estudios han mostrado que entre 40 y 80% at. Fe la aleación es **AF** con un campo hiperfino cercano a 40 kOe y un momento magnético que aumenta con el contenido de Fe. Para bajos contenidos de Mn la aleación es **P** y es el Mn el que le da el carácter AF. Los estudios teóricos a bajas temperaturas, reportan que el antiferromagnetismo puede ser de tres tipos: para muy bajas temperaturas los espines se alinean antiparalelamente a lo largo de las aristas de la red FCC, al aumentar la temperatura el alineamiento pasa a ser a lo largo de las diagonales de las caras y al seguir aumentando la temperatura, el alineamiento antiparalelo es a lo largo de las diagonales de los cubos. Este último tipo de AF es el que se observa a Ta. El primer reporte sobre propiedades magnéticas de aleaciones Fe-Mn-Al en la fase FCC, fue hecho por **Pérez Alcázar, Galvão da Silva & Paduani** (1991). Se estudiaron aleaciones con 5 y 10 % at. Al y diferentes contenidos de Fe y Mn. Aquí se reporta que el campo hiperfino medio a Ta decrece cuando se aumenta el contenido de Fe o de Al, mostrando que el **AF** es diluido por la presencia del Fe o del Al. Esto se explica como debido al carácter paramagnético del Fe en la fase FCC y al carácter diamagnético del Al.

Recientemente **Medina, Pérez Alcázar, Tabares & García** (1999), reportaron un estudio por espectroscopia Mössbauer, susceptibilidad magnética y calorimetría ac y de barrido en aleaciones Fe-Mn-Al de esta fase y con 5 % at. Al. Ellos experimentalmente demuestran la existencia en estas aleaciones de dos anomalías de baja temperatura, detectadas aproximadamente entre 35 y 60 K la primera y entre 180 y 220 K la segunda, y otra de alta temperatura que varía 500 y 435 K. Estos resultados parecen comprobar los tres tipos de ordenamiento AF postulados teóricamente en la década del 70.

6. Conclusiones y perspectivas

Todos los resultados experimentales resumidos y mostrados en este trabajo, indican que las aleaciones del sistema Fe-Mn-Al de la fase FCC presentan mejores propiedades mecánicas a Ta y similares a altas temperatu-

ras, comparadas con sus análogas en los aceros inoxidable (aceros tipo 304 y 347) y los aceros al carbono. En cuanto a la resistencia a la corrosión y oxidación, estos aceros son inferiores a los aceros inoxidables pero muy superiores al Fe puro y a los aceros autopasivables o Corten. Estas propiedades nos permiten decir que los aceros Fe-Mn-Al son excelentes candidatos a reemplazar los aceros Corten en usos industriales y de construcción de puentes y a los aceros al carbono en construcción.

Análogamente, de acuerdo con los estudios de sus propiedades magnéticas de estas aleaciones, ellas pueden constituirse, desde el punto de vista académico, en un excelente ejemplo didáctico para ilustrar los más diversos comportamientos magnéticos y, desde el punto de vista científico, en un reto para conseguir interpretar los diferentes fenómenos detectados. Magnéticamente, también presentan un gran interés ya que el carácter blando puede ser mejorado (disminuir el campo coercitivo) y una mejora en esta propiedad hará de este sistema un excelente candidato como material de núcleos de transformadores.

Actualmente, se vienen realizando en el grupo trabajos experimentales utilizando nuevas técnicas de preparación de muestras, tales como aleamiento mecánico y sinterización, y se están adicionando elementos tales como el B y el Nb los cuales, según la literatura, contribuyen a formar aleaciones magnéticamente blandas, que hoy en día se utilizan en diferentes aplicaciones.

Agradecimientos

Gran parte de los trabajos reportados en esta recopilación y realizados en el GMTF, han sido posibles gracias al soporte financiero de la Universidad del Valle, Colciencias y la Comunidad Económica Europea, a quienes agradezco.

Bibliografía

- Agudelo, A. C., Marco, J. F., Gancedo, J. R., Gracia, M. & Pérez Alcázar, G. A. 1998. "Mössbauer and XPS studies of the corrosion products of Fe-Mn-Al-C FCC alloys", *Hyp. Int. (C)*, **3**: 69-72.
- Arrot, A. & Sato, H. 1959. "Transition from Ferromagnetism to Antiferromagnetism in Iron-Aluminum Alloys: Experimental Results", *Phys. Rev.* **114**: 1420-1426.
- Banerji, S. K., 1978. "An austenitic stainless steel without nickel and chromium". *Metal Prog.*, april, 59-62.
- Bilmes, P. D., González, A. C., Llorente, C. L., Cuyás & Solari M. 1994. "Aceros de bajo costo del tipo Fe-Mn-Al-C y Fe-Mn-Al-C-Si resistentes a la corrosión". *Rev. Metal. Madrid*, **30**: 298-309.
- Charles, J. & Berghean A. 1981. "New Cryogenic Materials: Fe-Mn-Al Alloys". *Metal Prog.*, May, 751-754.
- Chakravarti, D. J. 1977. "Phase stability in ternary systems of transition elements with aluminum", *Met. Trans.*, **8B**: 121-123.
- Endoh, Y. & Hishikawa, Y. 1971. "Antiferromagnetism of \bar{a} -FeMn alloys". *J. Phys. Soc. Japan*, **30**: 1614-1627.
- Ferreira, L. G., Salinas S. R. & Oliveira M. J. 1997. "Variational method based on the Bogoliubov's inequality for the magnetic properties of disordered systems". *Phys. Status Solidi B*, **83**: 229-234.
- González, Claudia, Pérez Alcázar, Germán A., Zamora, Ligia E., Tabares, Jesús A. & Greneche, Jean Marc 2002. "Magnetic properties of the $\text{Fe}_x\text{Mn}_{0.60-x}\text{Al}_{0.40}$, $0.20 \leq x \leq 0.60$, disordered alloys series". *J. Phys.: Condens Matter*, **14**: 6531-6542.
- Hansen, M. & Ardenko, K. 1958. "Constitution of binary alloys". First Edition. McGraw-Hill. New York.
- Ishikawa Y. & Endoh, Y. 1967. "Antiferromagnetism of \bar{a} -FeMn alloys II Neutron diffraction and Mössbauer effect studies". *J. Phys. Soc. Japan*, **23**: 205-213.
- Kayak, G. L. 1969. "Fe-Mn-Al precipitation-hardening austenitic alloys". *Metal Science and Heat Treatment*, **2**: 95-97.
- Kobeissi, M. A. 1991. "Mössbauer and ac-susceptibility investigations of the alloy series $\text{FeAl}_{1-x}\text{Mn}_x$ ", *J. Phys. Condens. Matter*, **3**: 4983-4997.
- Köster, R. & Tonn, W. 1933. "The iron corner of the Iron-Manganese-Aluminium System". *Archiv für Eishenhüttenwesen*, **7**: 365-368.
- Liu, J. Y. & Chang, S. C. 1997. "The oxidation and carburization of Fe-Mn-Al alloys in a carbon-containing atmosphere". *Corr. Sci.* **39**: 1021-1035.
- Medina, G., Pérez Alcázar, G. A., Tabares J. & García A. 1999. "Antiferromagnetic properties of $\text{Fe}_x\text{Mn}_{0.95-x}\text{Al}_{0.05}$ alloys, in the FCC disordered phase". *Hyp. Int. (C)*, **4**: 95-100.
- Mina, E., Prieto, H., Aguilar, Y., Rodríguez, V. F., Morales, G. & Pérez Alcázar, G. A. 1995. "Análisis estructural de los aceros austeníticos Fe-Mn-Al-C". *Informetal*, **45**: 2-5.
- Osorio, A., Zamora, Ligia E., & Pérez Alcázar, G. A. 1996. "Theoretical study of Fe-Mn-Al alloys in the FCC disordered phase". *Phys. Rev. B*, **53**: 1-4.
- Pérez Alcázar, G. A. & Galvão da Silva. 1987. "Mössbauer effect study of magnetic properties of $\text{Fe}_{1-q}\text{Al}_q$, $0 \leq q \leq 0.5$, alloys in the disordered phase". *J. Phys. F: Met. Phys.*, **17**: 2323-2335.
- , Plascak, J. A. & Galvão da Silva E. 1988. "Magnetic properties of Fe-Mn-Al Alloys in the disordered-phase". *Phys. Rev. B*, **38**: 2816-2819.
- , Galvão da Silva E. & Paduani, C. 1991. "Magnetic properties of Fe-Mn-Al alloy system in the FCC disordered phase". *Hyp. Int.*, **66**: 221-230.
- , Tabares, J. A., Bohórquez A. & Gancedo, J. R. 1994. "Mössbauer evidence of reentrant spin-glass phase in the $\text{Fe}_{45}\text{Al}_{30}\text{Mn}_{25}$ disordered alloy". *Hyp. Int.* **83**: 203-206.

- Restrepo, J., Pérez Alcázar, G. A. & González, J. M.** 2000. "Magnetic properties of disordered $\text{Fe}_{0.9-x}\text{Mn}_{0.1}\text{Al}_x$ alloys". *J. Appl. Phys.* **87**: 7425-7429.
- Rivlin, V. G.** 1983. "Critical review of constitution of aluminium-iron-manganese and iron-manganese silicom systems". *International Metals Reviews*, **28**: 309-337.
- Rodríguez, V., Bohórquez, A., Pérez Alcázar, G. A., Mina, E., Aguilar Y. & Morales, G.** 1996. "Análisis de microestructura óptica, microdureza y de difracción de rayos-x de aceros del tipo Fe-Mn-Al-C". *Informetal*, **46**: 23-26.
- _____, _____, **Pérez Alcázar, G. A., Gracia, M., Marco, J. F. & Gancedo, J. R.** "Surface spectroscopic study of the corrosion of "fermanal" alloys in humid SO_2 environments". Ponencia oral LACAME 2002, Panamá, septiembre de 2002.
- _____, **Jiménez, J. A., Adeva, P., Bohórquez, A., Pérez, G. A., Fernández, B. J. & Chao, J.** 1998, "Propiedades mecánicas y mecanismos de deformación en aleaciones del sistema Fe - xMn - 3.2Al - 0.2C (12 = x = 43)", *Rev. Met. Madrid*, **32**: 362-366.
- Rosales Rivera, A., Pérez Alcázar, G. A. & Plascak J. A.** 1990. "Diluted and random-bond Ising model: Application to the Fe-Mn-Al alloys", *Phys. Rev. B*, **41**: 4774-4777.
- Schmatz D. J.**, 1960, "Structure and properties of austenitic alloys contained aluminum and silicon", *Trans. ASM*, **52**, 898-913.
- Shiga, M. & Nakamura, Y.** 1976. "Spin-glass behavior in the Fe-Al alloys". *J. Phys. Soc. Japan*, **40**: 1295-1298.
- Tjong, S. C.** 1990. "Microstructural aspects of the scale formed on FeMnAl and FeMnAlCr alloys in SO_2/O_2 atmospheres at elevated temperature". *Mat. Charact.*, **24**: 3-26.
- _____ & **Swart, H. C.** 1991. "Auger characterization of the surface oxidation of austenitic Fe-26Mn-7Al-0.9C alloy". *App. Surf. Sci.* **47**: 311-321.
- Tomaszewicz, P. & Wallwork, G. R.** 1984. "The oxidation of Fe-Al alloys containing chromium, nickel or manganese". *Corrosion*, **40**: 152-157.
- Umabayashi, A. and Ishikawa, Y.** 1966, "Three types of antiferromagnetism in γ -FeMn alloys". *J. Phys. Soc. Japan*, **21**: 1281-1287.
- Vincze, I.** 1971. "Dependence of the magnetic moment on the number of Al nearest neighbors in Fe-Al alloys". *Phys. Status Solidi (a)*, **7**: K43.
- Zamora, L. E., Pérez Alcazar, G. A., Bohórquez A. & Tabares, J. A.** 1994. "Mössbauer and magnetization evidence of spin-glass phase in the $\text{Fe}_{0.45}\text{Mn}_{0.25}\text{Al}_{0.30}$ disordered alloy". *J. Mag. Mag. Mater.*, **137**: 339-342.
- _____, _____, _____, **Rosales Rivera, A., & Plascak, J. A.** 1995. "Phase diagram of the diluted and random-bond Ising model". *Phys. Rev. B*, **51**: 9329-9332.
- _____, _____, _____, **Marco, J. F., & González, J. M.** 1997. "Spin glass behavior in some Fe-Mn-Al disordered alloys". *J. Appl. Phys.*, **82**: 6165-6169.
- _____, _____, _____, **Bohórquez, A., Marco, J. F. & González, J. M.** 2000. "Magnetic properties of $\text{Fe}_x\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.7-x}$ (0.275 = x = 0.525) disordered alloys". *J. Phys.: Condens. Matter*, **12**: 611-621.

***CONSPICUUM THATCHERI* N. SP. (TREMATODA: DICROCOELIIDAE) DE *ORYSOMYS CALIGINOSUS* (RODENTIA, MAMMALIA) DEL DEPARTAMENTO DE VALLE, COLOMBIA**

por

Rivillas, C.¹, F. Caro², H. Carvajal³ & I. Vélez⁴

Resumen

Rivillas, C., F. Caro, H. Carvajal & I. Vélez: *Conspicuum thatcheri* n. sp. (Trematoda: Dicrocoeliidae) de *Oryzomys caliginosus* (Rodentia, Mammalia) del departamento de Valle, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (107): 275-279, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se describe una especie nueva de Dicrocoeliidae (Trematoda: Digenea), en mamíferos del Pacífico colombiano. *Conspicuum thatcheri* n. sp., se encontró en el hígado de *Oryzomys caliginosus* (Rodentia), capturado en la vereda Llano Bajo, Municipio de Buenaventura Valle del Cauca, Colombia. Se diferencia de *Conspicuum pulchrum* (única especie del género reportada para mamíferos), por medir cerca de la mitad del largo del cuerpo; tener el esófago mas largo; testículos ovalados y no redondos, a nivel del acetábulo y no posterior a éste. Los vitelarios externos a los ciegos intestinales, y no sobre ellos, empiezan en la parte anterior del acetábulo y no a nivel de los testículos. Menor número de folículos y huevos más pequeños.

Palabras clave: *Conspicuum thatcheri* n. sp., Trematoda (Dicrocoeliidae), parásito de roedores, Valle del Cauca, Colombia

Abstract

A new species of Dicrocoeliidae (Trematoda: Digenea) found in Mammals in the colombian pacific coast is described. *Conspicuum thatcheri* n. sp., was found in the liver of *Oryzomys caliginosus* (Rodentia), captured in the Vereda Llano Bajo, Municipality of Buenaventura, Cauca Valley, Colombia. This species differs from *Conspicuum pulchrum* (only species of the genus reported for mammals), in that body size is half that of *C. pulchrum*; the esophagus is longer; the testicles are ovoid and not round located at the acetabular level and not posterior to it. The vitellin glands are outside of the ceca and not over them, they begin on the anterior part of the acetabulum and not at the testicle level. Besides, *C. thatcheri* has less number of follicles and smaller eggs.

Key words: *Conspicuum thatcheri* n. sp., Trematoda (Dicrocoeliidae), parasites of Rodentia, Cauca Valley, Colombia.

1, 2, 3 umcarva@telesat.com.co, AA 26360, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.

4 ivelez@matematicas.udea.edu.co, PECET, AA. 1226, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Introducción

Según Yamaguti (1971), los miembros de la familia Dicrocoeliidae se caracterizan por ser endoparásitos, con: cuerpo oval, elíptico o lanceado, sin espinas. Ventosa oral subterminal. Faringe. Esófago corto. Ciegos intestinales con largo variable. Acetábulo en la parte anterior. Testículos simétricos en la parte posterior del cuerpo. Saco del cirro bien desarrollado, preacetabular. Poro genital mediano, situado entre las dos ventosas. Ovario mediano o submediano, postesticular. Receptáculo seminal y canal de Laurer presente. Vitelarios en folículos, usualmente extracecales y limitados en extensión. Útero que ocupa la mayoría de la parte posterior del cuerpo y puede estar extendido a la parte anterior. Huevos numerosos. Vesícula excretora simple, con canales colectores en el extremo anterior en forma de Y. Parásitos como adultos en los conductos biliares, vesícula biliar, intestino o conductos pancreáticos, etc. de vertebrados.

Para Yamaguti (1971) la familia Dicrocoeliidae presenta tres subfamilias que parasitan aves y tres subfamilias parásitas de mamíferos. Sin embargo la subfamilia Dicrocoeliinae tiene géneros que parasitan ambos grupos de vertebrados. Está conformada por ocho tribus, dentro de las cuales se encuentra la tribu Eurytrematini con ocho géneros. Odening (1964) asigna cuatro de estos: *Conspicuum*, *Canaania*, *Lubens* y *Zonorchis* a la nueva tribu Conspicuini y la adiciona a la subfamilia Leipertrematinae.

De acuerdo con Yamaguti (1971), el género *Conspicuum* es más frecuente en aves que en mamíferos y sólo aparece *C. pulchrum* (Travassos, 1919), en la vesícula biliar de *Oxymycterus quaestor* del Brasil. El género *Conspicuum* se caracteriza entre otras cosas, por poseer en la cutícula papilas cónicas con distribución irregular.

Materiales y métodos

Entre 1989 y 1990 se realizaron ocho muestreos en la costa pacífica colombiana, en Llano Bajo, con coordenadas 3° 42' N y 76° 50' W con una altitud de 50 msnm y Bajo Calima, con coordenadas 3° 57' N y 75° 59' W, Municipio de Buenaventura, Departamento del Valle del Cauca (fig. 1). Ambos sitios están localizados en la vertiente occidental de la Cordillera Occidental, con una T° superior a 24°C y una pluviosidad mayor a 3.000 mm, en una zona de vida que según Holdridge (1947) corresponde a bosque pluvial tropical.

Para la captura de los hospedadores se utilizaron trampas tipo National (60 unidades) y tipo Sherman (60 unidades) y para su ubicación se tuvo en cuenta el tipo de

vegetación dominante y su espesura, la cercanía a fuentes de agua y la actividad animal. Como cebo se utilizaron atún, sardinas, fruta, cereales (maíz y harina de trigo) y carne. Las trampas se dejaron en el campo durante toda la noche. Los animales capturados se llevaron al laboratorio.

Los animales se sacrificaron y se les extrajo la masa visceral; cada órgano se separó y se puso en solución salina (0.85%) para ser examinado al estereomicroscopio; los tremátodos encontrados se colocaron entre dos portaobjetos, se sacrificaron con temperatura a 50°C y luego se fijaron en AFA (alcohol etílico, formalina, ácido acético glacial y agua destilada). Se colorearon en Carmín de Meyer y se montaron en placas permanentes con Permunt. Para la descripción los parásitos se midieron (en µm) y se dibujaron bajo cámara lúcida.

Descripción

Familia DICROCOELIIDAE Odhner, 1910, Subfamilia Dicrocoeliinae, *Conspicuum* Bhalerao, 1936

Conspicuum thatcheri n. sp. (fig. 2).

Hospedador definitivo: *Oryzomys caliginosus* (Rodentia: Mammalia) Lugar de infección: Hígado

Procedencia: Llano Bajo, Municipio de Buenaventura, Departamento del Valle del Cauca, Colombia, (fig. 1).

Prevalencia: 1/6

Etimología: el nombre se le dedica al profesor y parasitólogo Vernon Thatcher Ph. D. quién colaboró con sus enseñanzas y consejos a dos de los autores de ésta publicación.

Se capturaron 17 roedores que pertenecen a las especies, *Proechimys semispinosus*, *Rattus rattus* y *Oryzomys caliginosus* (tabla 1), un individuo de este último (5.9%) resultó parasitado por el tremátodo del género *Conspicuum*, del cual se obtuvieron 33 adultos.

Conspicuum thatcheri n. sp se describe con base en más de 10 individuos medidos. Presenta cuerpo elipsoidal, con el primer tercio más delgado y redondeado. Mide 1.588 (1.120-2.660) de largo, por 897 (490-1.130) de ancho a la altura del acetábulo. Tegumento sin espinas y con pequeñas papilas irregulares. Ventosa oral subterminal, mide 240 (134-369) de largo por 254 (84-361) de ancho. Faringe, muy muscular, la parte anterior se encuentra debajo de la ventosa oral, mide 132 (92-372) de largo por 137 (76-387) de ancho. Esófago mediano (121) y en circunvoluciones. Ciegos intestinales anchos, algo torcidos a nivel de la parte posterior de los testículos; ter-

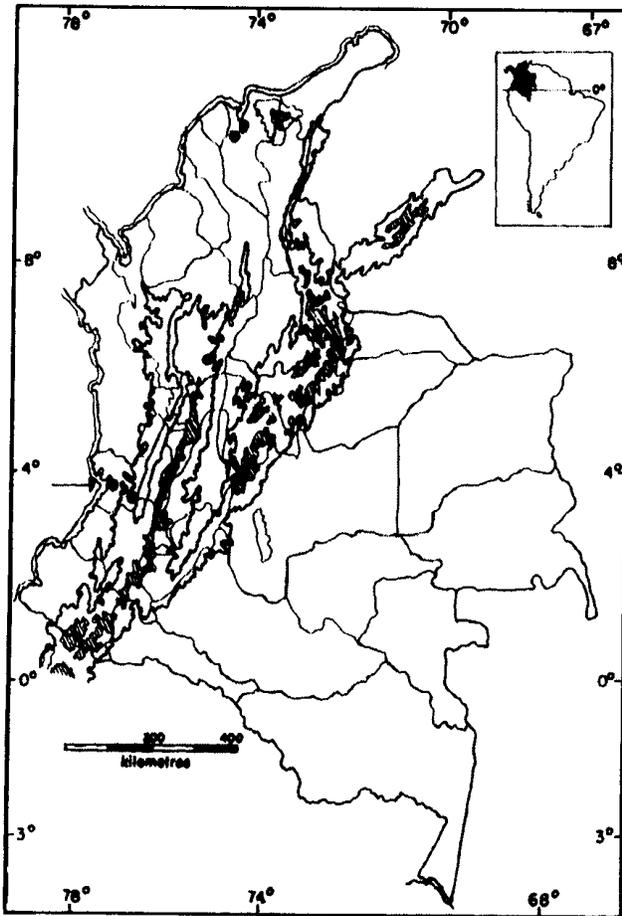


Figura 1. Mapa de Colombia con el Departamento del Valle con el área de muestreo señalada.

Tabla 1. Especies de mamíferos examinados y porcentaje de infestación para *Conspicuum thatcheri* n. sp.

Especies de roedores	Número de capturados	% de infestados
<i>Oryzomys caliginosus</i>	6	16,6 %
<i>Proechimys semispinosus</i>	8	0
<i>Rattus rattus</i>	3	0
Totales	17	5,9 %

minan en la parte posterior del animal. Ciegos intestinales anchos, algo tortuosos a nivel de la parte posterior de los testículos; terminan en la parte posterior del animal. Acetábulo prominente, redondeado, preecutorial, mide 537 (278-697) de largo por 576 (155-635) de ancho. Ocupa aproximadamente el 25% del largo total del animal. La distancia entre las ventosas es de 422 (300-520); la relación entre ambas ventosas es de 1:2,2. Testículos ovalados, simétricos, posteriores y laterales al acetábulo, con el útero en medio de ellos. El testículo izquierdo mide

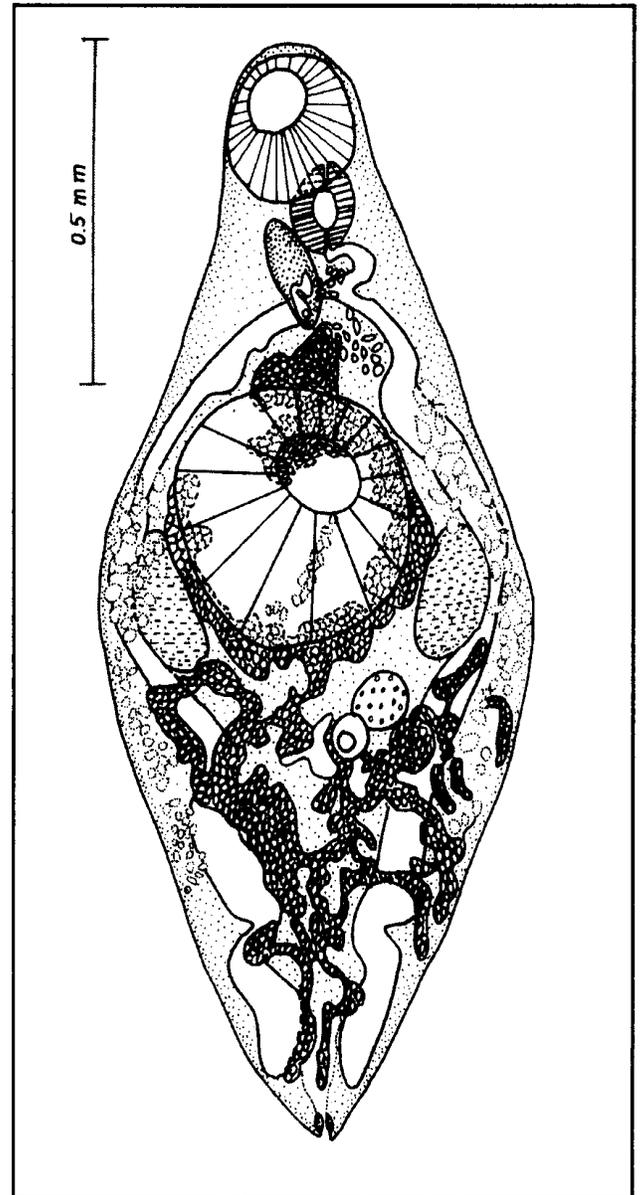


Figura 2. Holotipo de *Conspicuum thatcheri* n. sp.

261 (73-353) de largo por 164 (57-219) de ancho; el testículo derecho mide 262 (53-387) de largo por 164 (53-238) de ancho. La metraterma está ubicada entre la faringe y la bifurcación de los ciegos intestinales. El saco del cirro es lanceolado, grande, en la parte distal contiene el cirro delgado y sinuoso, mide 255 (170-300) de largo por 100 de ancho (figs. 3 y 4). Poro genital en la parte media, anterior a la bifurcación de los ciegos intestinales, a nivel de la faringe. Ovario posacetabular y posterolateral al testículo izquierdo; subsférico, entre los ciegos intestinales, mide 120-170 de largo por 120-170 de ancho, en algunos individuos es más ancho que largo.

Vitelarios en forma de folículos en la región ecuatorial, laterales, extracecales en su mayor parte, sobre y fue-

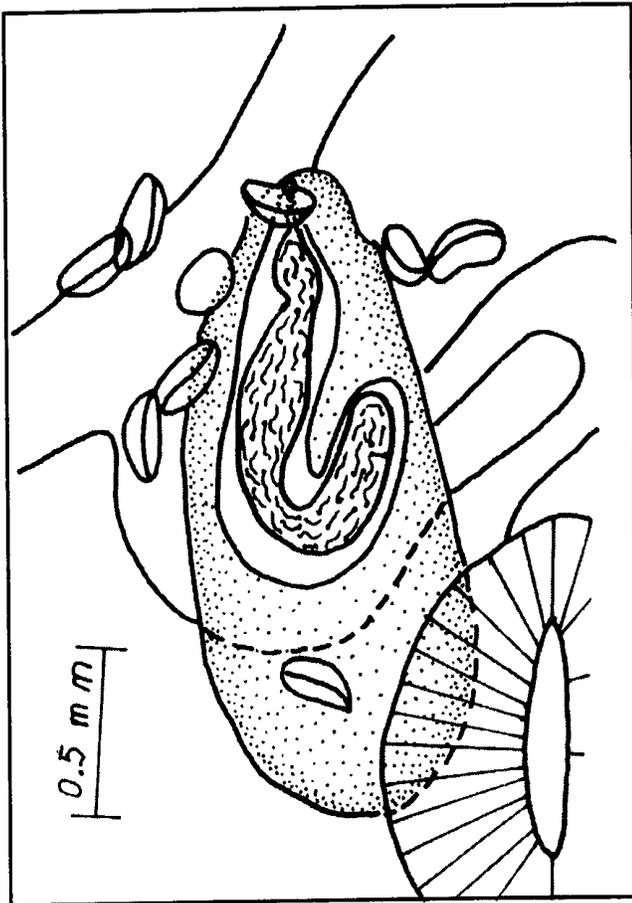


Figura 3. Detalle del saco del cirro con este retraído en un Paratipo de *Conspicuum thatcheri* n. sp.

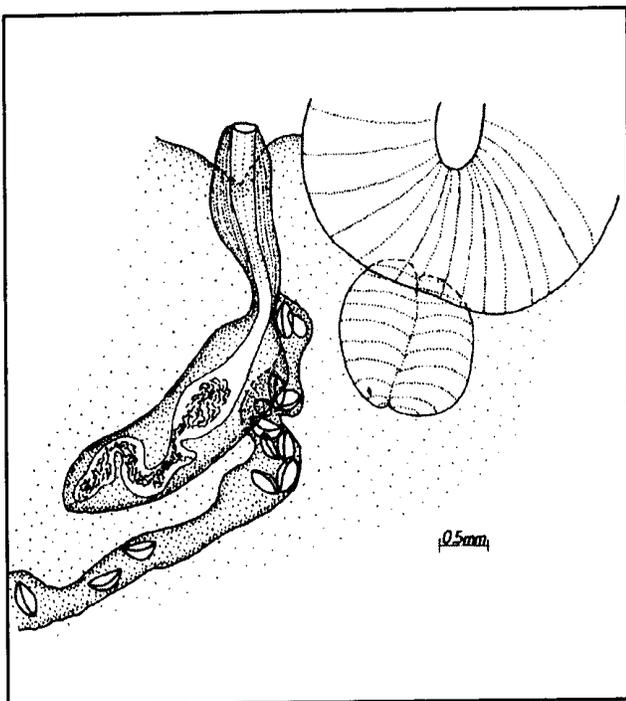


Figura 4. Detalle del cirro extendido hacia afuera en *Conspicuum thatcheri* n. sp.

ra de los ciegos intestinales; empiezan en el nivel anterior del acetábulo hasta la parte posterior del ovario, pero anterior a la terminación de los ciegos intestinales. Útero grande, ocupa la mayoría de la mitad posterior del cuerpo; ventral al lado derecho del acetábulo y termina en la metraterma en la parte posterior de la faringe. Huevos pequeños y abundantes, miden 31 (30-38) de largo por 14 (13-19) de ancho. Vesícula excretora en forma de Y, cuyos canales se observan en la parte anterior del animal, laterales a la faringe y el saco del cirro.

Discusión

Según las características de los géneros *Canaania* y *Conspicuum* descritas por **Travassos et al.** (1969), **Yamaguti** (1971) y **Thatcher** (1993), éstos dos géneros tiene algunas similitudes que dificultan su diferenciación a nivel de donde empiezan los vitelarios y la mayor parte del área ocupada por el útero.

Canaania se caracteriza, según la clave para los géneros de Eurytrematini (**Yamaguti**, 1971), por tener los vitelarios extendidos a lo largo de gran parte de los ciegos intestinales y el útero fuertemente enrollado en la parte anterior del cuerpo. Con lo anterior, el autor no especifica exactamente, que área de los ciegos intestinales está acompañada por los vitelarios y si estos van sobre los ciegos o externos a ellos, pero sí es muy claro en la zona que ocupa el útero respecto al acetábulo. **Travassos et al.** (1969) describe los vitelarios de *Canaania* como extracecales, que se extienden desde la zona posfaríngea hasta la parte extrema de los ciegos intestinales y el útero, ocupando la parte central del cuerpo entre los testículos y las áreas acetabular y preacetabular, posteriormente pasando la zona ovárica y luego la zona acetabular con muchas asas. Este autor no especifica, si el útero se encuentra en su mayor parte en la zona anterior o posterior al acetábulo, pero en la ilustración de la única especie descrita por él, *Canaania obesa*, se observa claramente que la mayor parte del útero esta en la zona preacetabular. Por su parte **Thatcher** (1993) diferencia al género *Canaania* por tener los vitelarios desde la parte anterior del acetábulo y no hace ninguna referencia a la posición de la mayoría del útero, pero en su ilustración de *Canaania obesa* claramente se observa éste en su mayoría ocupando la parte posterior al acetábulo.

Conspicuum se diferencia del género *Canaania* según **Travassos et al.** (1969) por tener los vitelarios extracecales y laterales, invadiendo parcialmente el área de los ciegos intestinales, con numerosos folículos pequeños que se

disponen en un área alargada. El útero de *Conspicuum* según éste mismo autor, está desarrollado en la porción mediana formando asas pre-testiculares o pre-acetabulares, debajo del ovario y ocupa toda el área del cuerpo central a los vitelarios. El útero de *Conspicuum thatcheri* n. sp. se asemeja totalmente a ésta descripción del útero, por lo tanto, llegamos a la conclusión de que se trata de éste género, pues el concepto de donde empiezan los vitelarios con exactitud, no está definido claramente. Además *Conspicuum thatcheri* n. sp. tiene los vitelarios extendidos (Travassos *et al.*, 1969) desde la zona posfaríngea a nivel de la parte anterior del acetábulo y no tan cerca de la faringe como en *Canaania obesa*, ilustrada por Travassos (1969). Pero realmente la diferencia que viene a marcarse definitivamente entre ambos géneros, es la cutícula con papilas cónicas (Yamaguti, 1971) que presenta *Conspicuum* y que no se encuentra ni en *Canaania* ni en ninguno de los otros géneros de la tribu y la cual no es mencionada por ninguno de los otros autores.

Yamaguti (1958) menciona, que el género *Conspicuum* parasita varios géneros de aves y uno en mamíferos. Este autor en 1971, cita para el trópico a *C. morenoi* en el ave *Mimocichla rubipes* de Cuba y al roedor microtino *Oxymycterus questor* como único mamífero hospedador de *C. pulchrum*, (Travassos, 1920) en Brasil. Thatcher (1993) reporta para Brasil las dos especies de éste género, *C. pulchrum* y *C. conspicuum* para el Neotrópico Por lo tanto solamente estas tres especies son conocidas para Sudamérica.

Conspicuum thatcheri n. sp. a diferencia de *C. pulchrum* en tener aproximadamente la mitad del largo total del cuerpo, un esófago mas largo y testículos ovalados. En *Conspicuum thatcheri* n. sp. los vitelarios son externos a los ciegos intestinales, empiezan a nivel de la parte anterior del acetábulo y terminan poco después del ovario, en *C. pulchrum* los vitelarios empiezan a nivel de

los testículos y terminan casi en la parte posterior del cuerpo, poco antes de la terminación de los ciegos intestinales. El acetábulo es precuatorial en *C. thatcheri* n. sp. y el de *C. conspicuum* se encuentra en el tercio anterior del cuerpo; *C. thatcheri* n. sp. muestra testículos ovalados y regulares y los testículos de *C. conspicuum*, son lobulados e irregulares, además el ovario es más ovalado.

La especie descrita por Thatcher (1993) como *Canaania obesa* coincide en todas sus características, medidas e ilustración con la especie aquí descrita, pero en ella no se tuvieron en cuenta algunas de las características anteriormente mencionadas y en especial las papilas cónicas de la cutícula (Travassos, 1969, Yamaguti, 1971). Por lo tanto dedicamos esta especie, como se dijo en el principio, al profesor Thatcher Ph. D., por haber sido también él quién primero la encontrara y reportara para Colombia.

Bibliografía

- Holdridge, L. R. 1947. Determination of world plant formation from simple climate data. *Science* **105** (2727): 367-368.
- Odening, K. 1964. Trematoden aus *Psophia viridis* Spix. *Zool. Garden (NF)*, **29** (2): 67-75, 4 figs.
- Thatcher, V. 1993. Trematódeos Neotropicais. Presidencia da República, Ministerio de Ciencia e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia; Manaus, Amazonas. Editora Calderaro, 553 p.
- Travassos, L., J. F. Teixeira de Freitas & A. Kohn 1969. Trematódeos do Brasil. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz*, **67**: 1-886.
- Yamaguti, S. 1958. *Systema Helminthum The Digenetic Trematodes of Vertebrates*. Interscience. New York. Vol. 1 1575 p.
- . 1971. *Synopsis of the digenetic trematodes of Vertebrates*. Keigaku Co. Tokyo. I & II. 1074 p.

UNA ESPECIE NUEVA DE *ANADIA* (REPTILIA: SAURIA: GYMNOPHTHALMIDAE) PARA EL NOROCCIDENTE DE LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA

por

José Vicente Rueda-Almonacid* & José Rances Caicedo**

Resumen

Rueda-Almonacid, J.V. & J. Rances Caicedo: Una especie nueva de *Anadia* (Reptilia: Sauria: Gymnophthalmidae) para el noroccidente de la cordillera Oriental de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (107): 281-284, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se describe y nombra una nueva especie de microteído del género *Anadia* procedente de la zona cafetera del departamento de Santander, en la ladera oeste de la cordillera Oriental de Colombia. El nuevo taxón (*Anadia bumanguesa*) es referible al grupo *bitaeniata* y se puede reconocer fácilmente por la gran cantidad de hileras de escamas dorsales transversales y su distintivo patrón de coloración.

Palabras clave: Microteído, *Anadia*, especie nueva grupo *bitaeniata*, Sauria, Santander, Colombia.

Abstract

We present and name a new (Microteidae) species of the genus *Anadia* coming from the coffee zone in Santander department, on the western slope of the oriental mountain range of Colombia. The new taxon (*Anadia bumanguesa*) can be referable to the *bitaeniata* group and can be easily recognized because of the great amount of transversal dorsal scales and its distinctive color pattern.

Key words: Microteidae, *Anadia*, can be referable to the *bitaeniata*, Sauria, Santander, Colombia.

* Biólogo - Programa especies Amenazadas - Conservación Internacional - Colombia, jvrueda@yahoo.com

** Grupo de Fauna Silvestre - Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, ranchoc@hotmail.com

Introducción

En el transcurso de sus estudios profesionales el autor junior (JRC) atrapó, en los predios de la Universidad Santo Tomás, sede Bucaramanga, un hermoso ejemplar de microtétido, que al ser cotejado con el material de referencia depositado en los museos de historia natural de La Salle, Inderena, ICN e UIS, no pudo ser referido a ninguna de las 6 especies de *Anadia* conocidas para Colombia. Las características morfológicas excepcionales de este espécimen y su excelente estado de preservación, ameritan su descripción como una especie nueva para la ciencia, la cual proponemos a continuación.

Materiales y Métodos

La terminología morfológica y la toma de las dimensiones corporales siguen las pautas dadas por **Oftedal** (1974) y **Kizirian** (1996). Las dimensiones fueron tomadas con un calibrador Mitutoyo con una precisión de 0.1 mm. El ejemplar tipo fue depositado en las colecciones del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (ICN).

Anadia bumanguesa sp. nov.

Figs. 1-2

Holotipo: Hembra adulta con el número de campo RC-290, obtenida por José Rances Caicedo el 18 de junio de 2001 y depositada en las colecciones de reptiles del Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional de Colombia, bajo el número ICN 10.106.

Localidad Típica: Colombia, **Santander:** municipio de Bucaramanga, predios de la Universidad Santo Tomás, (carrera 18 entre calles 9 y 10), Barrio La Universidad, 7° 13' 9" de latitud norte y 73° 13' 2" de longitud oeste, 1000 msnm.

Diagnosis: 1) 58 hileras de escamas dorsales transversas entre el oído y la base de la cola; 2) 41 hileras de escamas a través del medio cuerpo; 3) escamas dorsales de apariencia cuadrangular, aun cuando levemente más largas que anchas; 4) escamas ventrales apenas un poco más grandes que las dorsales, homogéneas, lisas y yuxtapuestas; 5) 3 supraoculares y una presupraocular; 6) membrana palpebral traslúcida, 5 palpebrales; 7) 1 hilera de suboculares normales, muy similares en tamaño y forma; 8) dorso pardo grisáceo con dos filas de pequeñas manchitas cuadradas de color negro dispuestas a lo largo del tronco; 9) vientre de color crema inmaculado; 10) 10 poros femorales ubicados a todo lo largo del borde sagital del muslo, poros preanales ausentes.

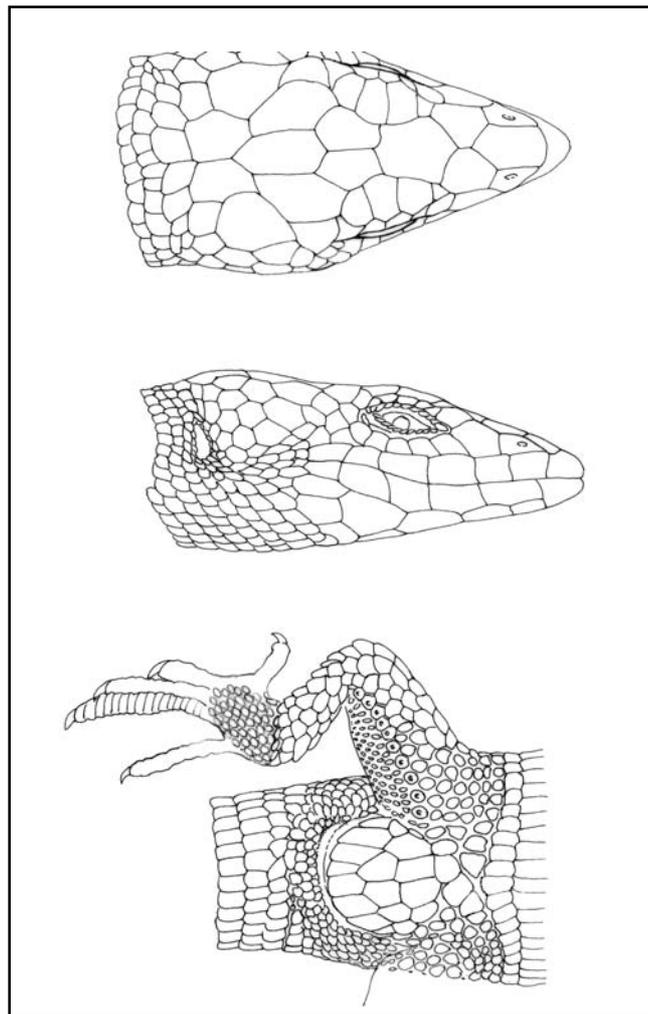


Figura 1. a) Vista dorsal, b) lateral de la cabeza y c) detalle de la región anal del holotipo de *Anadia bumanguesa*.



Figura 2. Vista dorsal del holotipo de *Anadia bumanguesa*.

Etimología: El epíteto específico, alude al gentilicio femenino utilizado para designar a las personas nativas de la ciudad de Bucaramanga, capital del departamento de Santander.

Descripción: *Anadia bumanguesa* es una especie de gran tamaño corporal, con el iris amarillo, los miembros relativamente cortos y una coloración llamativa pardocanelada sobre el dorso. La cabeza larga (17.7 mm) equivale al 19.3% de la longitud corporal, la lepidosis cefálica normal: la rostral grande y ampliamente visible desde arriba, la frontonasal de forma pentagonal con su base suturada a la rostral y de un tamaño y forma muy similar a la frontal, las prefrontales pareadas, bien desarrolladas y de forma triangular con los vértices levemente en contacto en la línea media; escama interparietal más larga que las parietales y más alargada que la frontal, aun cuando más estrecha que esta; la abertura ótica visible externamente, pequeña y oblonga (cerca de dos veces más alta que ancha), bordeada por escamas pequeñas, redondeadas, planas y lisas. Una diminuta presupraocular triangular seguida por tres supraoculares grandes (casi dos veces más anchas que largas), las cuales se atenúan en tamaño en sentido antero-posterior. 6 superciliares, la primera es la más grande del conjunto y se sutura dorsolateralmente con la prefrontal y presupraocular, las demás alargadas y de un tamaño muy similar, una frenocular anterior a la hilera de suboculares, casi tan grande como la presupraocular y levemente en contacto entre sí en la esquina inferior. Espacio interocular apenas un poco más amplio que el ancho máximo de la segunda escama supraocular. 2 hileras de postparietales, la primera con las escamas ligeramente más reducidas que las parietales. Orificio nasal externo redondo, localizado en el centro de la escama y mucho más cerca del hocico que del borde anterior del ojo, escama nasal entera sin un surco vertical debajo del orificio nasal, en contacto anteriormente con la rostral. Loreal más grande que la nasal y unida, en la mayor parte de su base, con la 2ª supralabial y escasamente con la 3ª. Membrana palpebral traslúcida, 5 escamas palpebrales; Supralabiales 7, infralabiales 6, alargadas y bastante similares entre sí.

Mental única, no indentada, grande, con el margen posterior recto, seguida de una postmental de un tamaño similar y 4 pares de escudos mentonianos, los dos primeros en contacto en la línea media y los dos últimos suturados con las infralabiales posteriores. Gulares esencialmente homogéneas, redondeadas, planas y lisas, ligeramente imbricadas, dispuestas en 18 hileras transversales; collar muy poco diferenciado, aun cuando con las escamas cuadrangulares apenas un poco más grandes que las gulares.

Escamas dorsales lisas dispuestas en 58 hileras de escamas dorsales transversas entre la segunda hilera de postparietales y la base de la cola. Extremidades muy cortas, cuando los miembros son adosados a los lados del cuerpo y dirigidos uno hacia el otro, los dedos no alcanzan a traslaparse entre sí. 10 poros femorales ubicados a todo lo largo del borde sagital del muslo, poros preanales ausentes. 41 hileras de escamas a través del medio cuerpo, 43 hileras transversales de escamas desde el collar hasta las anales (excluyéndolas); 8 pre-anales lisas y muy alargadas, bordean el margen anterior de la cloaca. Escamas del dorso ligeramente más pequeñas que las del vientre y un poco distintas: de apariencia cuadrangular aun cuando levemente más largas que anchas, yuxtapuestas, las de los flancos similares en tamaño pero netamente redondeadas algo alongadas, las ventrales rectangulares claramente más largas que anchas y con el margen posterior tenuemente redondeado. 10-12 hileras de ventrales (arregladas en hileras longitudinales y transversales), muy difíciles de diferenciar netamente de las de los lados del cuerpo por su tamaño y forma semejante, las escamas laterales no forman una banda distintiva entre la axila e ingle de escamas pequeñas o granulares. Escamas del dorso de los miembros lisas, manos y patas pentadáctilos, uñas cortas. Longitud relativa de los dedos manuales en orden decreciente: III>IV>II>V>I. Longitud relativa de los dedos del pie en orden decreciente: IV>III>V>II>I; 15 lamelas subdigitales bajo el IV dedo del pie. Cola cilíndrica, escamas caudales dispuestas en anillos transversos, rectangulares y casi dos veces más largas que anchas.

Coloración en vivo: Dorso de color terracota con grandes manchas de color naranja muy poco definidas hacia los flancos. Distribuidas de manera regular y a todo lo largo de la región paravertebral y el dorso de la cola se aprecian una serie de manchitas de color marrón, cada una de las cuales cubre una escama de superficie. Color de la cabeza y extremidades verde oliva claro. Vientre crema immaculado. Palmas y plantas amarillo pálido, en tanto que los dedos son de color marrón.

Coloración en etanol 70%: Iris amarillo, escamas ciliares de color crema o blanco con los bordes negros. Cabeza gris-oliva, dorso gris con tinte naranja o ferrugíneo y una serie de cuadrillos de color negro (cada manchita cubre sólo una escama en el cuerpo y dos en la cola) dispuestas a todo lo largo de la región paravertebral, a intervalos regulares una de la otra, pero no enfrentadas entre sí. Flancos abdominales gris más claro. Superficies ventrales de color crema immaculadas. Dorso de los miembros gris-oliva.

Dimensiones lineales (en mm): Longitud hocico-ano = 91,6 mm; cola regenerada y con una longitud de 53 mm., longitud axila-ingle = 53,7 mm., anchura cefálica = 10,35 mm., longitud cefálica = 17,7 mm.

Historia Natural: El único ejemplar conocido fue atrapado en la tarde (15:10), cuando se desplazaba por la orilla de un pasillo, en cercanías de un jardín de la ciudad universitaria. Este lagarto fue mantenido en cautiverio durante un período de cinco meses y fue alimentado con grillos, arañas y homópteros principalmente; aun cuando en una oportunidad se comió una rana del género *Eleutherodactylus* que estaba dentro del terrario. El individuo fue sacrificado el 24 de noviembre de 2001.

El animal prefería salir a buscar el alimento en las horas de la tarde, cuando la intensidad solar era más baja (aproximadamente las 2:30- 3:00 p.m.), con su lengua husmeaba por todos los rincones del terrario para encontrar a sus presas e incluso trepaba con facilidad y cierta frecuencia a las pequeñas plantas. Aproximadamente a las 4:30-5:00 p.m. se escondía debajo de un tronco seco.

La formación vegetal característica de la localidad típica es el bosque húmedo subtropical (bh-ST), en donde se presenta una precipitación promedio anual de 1.235 mm y una temperatura media de unos 24° C.

Distribución: Especie conocida hasta el momento solo en la localidad típica, sobre la ladera occidental de la cordillera Oriental en el departamento de Santander a unos 1000 metros de altitud.

Comentarios: Previamente Ayala (1986) y Ayala & Castro (SF) habían reseñado dos especies de microteídos del género *Anadia* para los departamentos de Santander: *A. bogotensis* y *A. pamplonensis* habitantes de climas fríos, páramos subpáramos. *Anadia bumanguesa* se puede diferenciar de la primera por su distintivo patrón de coloración, por la forma de las escamas ventrales (levemente rectangulares y con el margen posterior de la escama recto) y por el mayor número (58) de hileras de escamas dorsales transversas entre la nuca y la base de la cola. De *A. pamplonensis* difiere por la ausencia de poros preanales y porque los poros femorales se extienden

de manera continua a todo lo largo del muslo, desde la región proximal hasta la rodilla, además *A. bumanguesa* posee un par de escudos prefrontales bien desarrolladas y las escamas del dorso tienden a ser cuadrangulares en lugar de rectangulares.

El elevado número (58) de hileras de escamas dorsales transversales separan *Anadia bumanguesa* de todas las especies congénéricas excepto *A. vittata*, de la cual se reconoce por su escama nasal entera, por la ausencia de ocelos y por el diferente patrón de coloración.

Anadia bumanguesa puede ser referida al grupo *bitaeniata* de Oftedal (1974) conjuntamente con *A. pulchella*, *A. bitaeniata* y *A. brevifrontalis* y las cuales se caracterizan por sus escamas dorsales cuadrangulares y ligeramente redondeadas en su margen posterior, por la presencia de una hilera de suboculares plenamente diferenciadas, con las prefrontales en contacto o separadas y porque las hembras poseen tantos poros femorales como los machos (hasta 11). Sin embargo, *A. bumanguesa* posee un gran número de hileras de dorsales transversas (58 en lugar de 32-50).

Agradecimientos

Queremos reconocer la amabilidad del señor Fabio Quevedo, auxiliar del Instituto de Investigación Alexander von Humboldt e igualmente del señor Jairo Sánchez del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia por permitirnos cotejar algunos de los ejemplares científicos coleccionados por ellos.

Bibliografía

- Ayala, S. 1986. Saurios de Colombia: Lista actualizada. *Caldasia* 15 (71-75): 555-576.
- & F. Castro. (SF). Lagartos de Colombia. Mecanografiado.
- Kizirian, D. 1996. A review of Ecuadorian *Proctoporus* (Squamata: Gymnophthalmidae) with descriptions of nine new species. *Herpetological Monographs* 10: 85-155.
- Oftedal, O. T. 1974. A revision of the genus *Anadia* (Sauria, Teiidae). *Arquivos de Zoologia*. S. Paulo 25(4): 203-265.

A NEW *ELEUTHERODACTYLUS* (ANURA, LEPTODACTYLIDAE) FROM MARAHUAKA TEPUI, AMAZONAS, VENEZUELA

por

Oswaldo Fuentes* & César L. Barrio-Amorós**

Resumen

Fuentes, O & C.L. Barrio-Amorós: A new *Eleutherodactylus* (Anura, leptodactylidae) from Marahuaka Tepui, Amazonas, Venezuela. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (107): 285-290, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se describe una nueva especie de *Eleutherodactylus* del grupo *unistrigatus* de la cima del Cerro Marahuaka en Amazonas, Venezuela. La nueva especie se distingue fácilmente entre las otras especies de *Eleutherodactylus* del sur de Venezuela por su tímpano indistinto, ausencia de calcares, tubérculos metatarsales indistintos, piel dorsal lisa, dedos libres, con rebordes cutáneos presentes pero poco destacados, coloración del iris y general del cuerpo. Se provee un resumen histórico de los *Eleutherodactylus* del sur de Venezuela.

Palabras clave: Amphibia, anura, leptodactylidae, *Eleutherodactylus*, grupo *unistrigatus*, Marahuaka; estado Amazonas; Escudo guayanés; Venezuela.

Abstract

A new species of *Eleutherodactylus* of the *unistrigatus* species group is described from the summit of Cerro Marahuaka, Estado Amazonas, Venezuela. The new species is easily distinguished from other southern Venezuelan *Eleutherodactylus* by its indistinct tympanum, absence of calcares, indistinct metatarsal tubercles, smooth dorsal skin, weak fringes on fingers and toes, lack of basal webbing, iris colour pattern and overall body coloration. A historical resumé of southern Venezuelan *Eleutherodactylus* is provided.

Key words Amphibia, anura; leptodactylidae, *Eleutherodactylus*, *unistrigatus* group, Marahuaka, Amazonas state, Guianan shield, Venezuela.

* 6465 142 Ave. North. CC 202 Clearwater, 33760, Florida, USA; E-mail: osfuentes2@hotmail.com

** Fundación AndígenA. Apartado Postal 210, 5101-A Mérida, Venezuela; E-mail: cesarlba@yahoo.com

Introduction and historical resumé of the Southern Venezuelan *Eleutherodactylus*

To date 39 species of frogs of the genus *Eleutherodactylus* are known from Venezuela (**Barrio-Amorós**, 1998). Most of these occur in montane habitats outside of the Guianan Shield (Andes = 18 species, Venezuelan Coastal range = 11 especies). The Venezuelan Guianan Shield contains 10 known species of *Eleutherodactylus*, most of them recently described. **Boulenger** (1900) described *E. marmoratus* from the foothills of Roraima, which is also known from the foothills of Marahuaka and Cerro Duida (**Rivero**, 1961; **Barrio-Amorós**, 1998). **Melin** (1941) named *E. vilarsi* from Amazonian Brazil, which also inhabits lowland rainforests in Amazonian Venezuela. **Rivero** (1968) recognised a third species from Sierra de Lema, *E. pulvinatus*. **Gorzula & Cerda** (1979) reported *E. zeuctotylus*, from the Southern extreme of Estado Amazonas. In all, the Guiana Shield seems to have relatively low diversity of this genus, the most speciose among vertebrates. However, recent expeditions made by private Venezuelan Foundations (FUDECI and TERRAMAR) in collaboration with the American Museum of Natural History of New York to several tepuis in the estado Amazonas found the genus on some tepui summits. Six species have been described to date, three of which (*E. cantitans*, *E. pruvinatus*, *E. yaviensis*) are sympatric at Cerro Yaví summit (**Myers & Donnelly**, 1996); and three more (*E. avius*, *E. cavernibardus* and *E. memorans*) sympatric at Serranía de Tapirapécó slopes (**Myers & Donnelly**, 1997). At Yutajé summit inhabits *Eleutherodactylus cantitans* and *E. yaviensis* (**Myers & Donnelly**, 2001). Despite the relatively intensive exploration of some tepuis (mainly during 1980s and 1990s), which has resulted in the discovery and description of several new species of Centrolenidae (**Ayarzagüena**, 1992), *Hyla* (**Ayarzagüena & Señaris**, 1993), *Stefania* (**Duellman & Hoogmoed**, 1984; **Señaris et al.**, 1996, **Myers & Donnelly**, 1997; **Barrio-Amorós & Fuentes**, 2003), *Oreophrynella* (**Señaris et al.**, 1994), plus description of two new genera, *Metaphryniscus* (**Señaris et al.**, 1994) and *Tepuihyla* (**Ayarzagüena et al.**, 1992a, 1992b), only very recently have *Eleutherodactylus* been reported. We do not doubt that several other summits and slopes of tepuis will yield surprises. For example, in the Serranía de la Neblina the preliminary account reported seven undescribed species (**McDiarmid & Paolillo**, 1988), and **Gorzula & Señaris** (1998) mentioned *Eleutherodactylinae* series A from Cerro Guanay (estado Bolívar), and *Eleutherodactylinae* series B, from several tepui summits in Estado Bolívar.

The aim of this study is to describe a new tepui *Eleutherodactylus*, collected in 1982 during the first bo-

tanical exploration of Cerro Marahuaka, lead by Charles Brewer-Carías. Marahuaka is a mountain massif in the center of the Venezuelan state of Amazonas, between N 03° 40', W 65° 40' and N 03° 55', W 65° 27', covering an area of approx. of 237 km², with a maximum altitude of about 2800 m. There is conformed by four principal masses of sandstone over older granitic rock of the Roraima formation. Most of the drainage flows southward to the Cunucunuma and Padamo rivers, and finally to the upper Orinoco.

Materials and Methods

All measurements were taken with calipers to the nearest 0.1 mm. Morphological terms follow **Lynch & Duellman** (1997) and **Myers & Donnelly** (1996, 1997), modified to include **Myers & Donnelly** (2001) new character called "axillary tubercle". Abbreviations for measurements are: SVL: snout-vent length; TL: tibia length; FeL: femur length; FL: foot length; HeL: head length; HW: head width; Ind: internarial distance; UEW: upper eyelid width; IOD: inter orbital distance; EN: anterior edge of eye to nostril; ED: horizontal eye diameter; TD: horizontal tympanum diameter; FD: disc width of finger III; 4TD: disc width of toe IV; ETS: distance between the anterior edge of the eye to the tip of snout; 1FiL: length of finger I; 2FiL: length of finger II. Acronyms used are: EBRG (Museo de la Estación Biológica de Rancho Grande, Maracay, Venezuela); MBUCV (Museo de Biología de la Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. Comparative data of other species were taken from **Duellman** (1997); **Lescure** (1981), **Lynch** (1975), **Lynch & Hoogmoed** (1977), **Myers & Donnelly** (1996, 1997, 2001).

Eleutherodactylus marahuaka sp. nov. (Fig. 1)

Holotype. MBUCV 6637, an adult male obtained by Charles Brewer-Carías between 31 January and 4 February, 1982.

Type locality. VENEZUELA, Estado Amazonas, summit of Cerro Marahuaka (N 03° 55' -W 65° 27'), aprox. 2450 m.

Paratypes. MBUCV 6682-83; EBRG 3919-20, all with same data as the holotype.

Referred material. EBRG 3921, with same data as the rest of animals.

Etymology. The species name is a reference to the inhabited "tepuí" or "Cerro" in Amazonas state, Marahuaka. It is a noun in nominative singular, in apposition to the generic name.



Figure 1. *Eleutherodactylus marahuaka* sp. nov. at Marahuaka summit. Photo by Charles Brewer-Carías.

Diagnosis. *Eleutherodactylus marahuaka* is a small sized member of the *unistrigatus* species group sensu Lynch (1976, 1994). (1) Dorsal skin smooth, ventral skin smooth to finely granular; (2) tympanum concealed, indistinct (invisible without microscope); (3) snout rounded in dorsal view, truncate in profile; canthus rostralis concave, edge rounded; (4) upper eyelid weakly tuberculate; (5) choanae very small, dentigerous processes of the vomers very small, oblique, with three or four odontophores each; tongue rounded to slightly cordiform; (6) males without vocal slits and no visible nuptial pads; (7) finger I shorter than II; (8) fingers with weak lateral keels; (9) axillary tubercle absent; (10) ulnar tubercles absent; (11) calcars absent; (12) two metatarsal tubercles, inner oval, three times size of round outer; (13) toes with weak lateral keels; no basal webbing; toes IV and V with relatively broad discs, smaller than those on fingers II, III and IV; (14) in preservative, dorsal colour pattern mainly pale brown to yellowish, immaculate or with very small silvery marks; ventral coloration pale white; limb bands and lip bars absent; iris grey with fine black reticulations; (15) two males 22.5 and 22.9 mm SVL, three females 25, 25.8 and 27 mm SVL.

Eleutherodactylus marahuaka is easily distinguished from other Guiana Shield species by the following characters (*Eleutherodactylus marahuaka* in parentheses). In *E. pruinatus* and *E. cavernibardus* when toes III and V are appressed against toe IV, disks reach just above of the penultimate subarticular tubercle (disk of toe III reaches penultimate subarticular tubercle, disk of toe V reaches

last subarticular tubercle). In *E. cantitans*, *E. avius* and *E. memorans* the tympanum is distinct (indistinct). From *E. cantitans* and *E. yaviensis* because they present basal webbing on toes (absent). All six other species possess weak calcars (no calcars) (Myers & Donnelly, 1996, 1997). *Eleutherodactylus marmoratus* has a tubercular dorsum (smooth), visible tympanum (indistinct), bifid palmar tubercle (indistinct) and basal toe webbing (no webbing) (Rivero, 1961, Lescure, 1981, Lescure & Marty, 2000). *Eleutherodactylus pulvinatus* has smooth dorsum with scattered small tubercles (smooth without tubercles), tympanum evident (indistinct), males with vocal slits (without), fingers and toes lacking lateral fringes (present), ulnar tubercles present (absent) (Duellman, 1997). *Eleutherodactylus vilarsi* shows finger I longer than II (shorter), shagreened-skin on dorsum with scattered enlarged warts (smooth without warts), gray to brown venter (pale white), short limbs (relatively long) (Lynch, 1975). *Eleutherodactylus zeuctotylus* has finger I longer than II (shorter), a rounded palmar tubercle (indistinct) and large tympanum (indistinct) (Lynch & Hoogmoed, 1977). These two last species belong to the *conspicillatus* species group.

Eleutherodactylus marahuaka is unique among other tepui *Eleutherodactylus* in the following combination of characters: indistinct tympanum, absence of calcars, indistinct metatarsal tubercles, smooth dorsal skin, weak fringes in fingers and toes; no basal webbing; iris colour pattern and overall body coloration.

Description. Females larger than males. Two males 22.5-22.9 mm SVL (mean= 22.7), three females 25-25.8-27 mm SVL (mean= 25.9). Head wider than body, wider than long, head width 41-43% of SVL in males, 38-42 % in females. Snout rounded in dorsal view, truncate in profile; eye-nostril distance almost equal to length of eye in both sexes; nostrils slightly protuberant, directed dorsolaterally; canthus rostralis concave, rounded but distinct, loreal region concave. Upper eyelid with small warts in holotype, and in paratypes EBRG 3920-21, absent in the others; upper eyelid width less than interorbital distance. Tympanum indistinct or concealed. Supratympanic fold weakly developed. Choanae small, round, not concealed by palatal shelf of maxillary arch; vomerine dentigerous processes small, bearing 3-4 teeth, oblique, posterior and medial to choanae. Tongue round to slightly cordiform, posterior two-thirds free. Vocal slits absent.

Dorsal skin smooth in preserved animals, probably granular in life (Fig. 1); middorsal raphe absent; dorsolateral folds absent; throat smooth, venter smooth to finely granular, areolate on ventral parts of thighs; ulnar tubercles and calcars absent.

Relative length of appressed fingers III>IV>II>I; first finger reaching proximal edge of disc on finger II; no nuptial pads observed. Finger discs broader than long, disc on thumb distinctly expanded but smaller than those on the other fingers. Fingers with weak lateral fringes. Axillary tubercles, as named for *E. cantitans* (Myers & Donnelly, 2001) are absent. Palmar and thenar tubercles indistinct. Subarticular tubercles round, single. Supernumerary tubercles absent.

Hind limbs relatively long, heels reaching the nostril when held parallel to the sagittal plane; tibia 52-53% of SVL in males, 52-56% of SVL in females. Relative lengths of appressed toes IV>V>III>II>I. IV toe disc equal to III finger disc. Toes with or without weak lateral fringes; toes without webbing. Disks wider than long, wider than phalanges. Inner and outer metatarsal tubercles indistinct; subarticular tubercles round, single; supernumerary tubercles absent.

Colour in life (based in a colour slide by C. Brewer-Carías; Fig 1). *E. marahuaka* is garnet brown dorsally, with irregular but abundant minuscule white spots, especially on flanks, forearms and thighs. Ventral parts, flanks, arms, hands and feet are pale yellow. Iris dull brown.

Colour in preservative. In preservative the dorsal colour pattern is mainly pale brown to yellowish, immaculate or with very small silvery marks; ventral coloration dirty white; iris gray with fine black reticulations.

Measurements of holotype (in mm): SVL: 22.5; TL: 12; FeL: 11.2; FL: 10; HeL: 9.6; HW: 9.7; Ind: 2.1; UEW: 2.9; IOD: 3; EN: 3.2; ED: 3.1; TD: 0.9; FD: 1.1; 4TD: 1.1; ETS: 3.9; 1FiL: 3; 2FiL: 3.1.

Remarks: The holotype MBUCV 6637 is a slightly dehydrated, thus is possible to distinguish some features that are less visible in the other animals, such as some of the tubercles on the hands and feet.

Variation: The type series of *Eleutherodactylus marahuaka* shows little differentiation. EBRG 3921 is not considered to be a paratype due to its very different pattern, consisting of two narrow dark brown dorsolateral stripes, and more distinctive metacarpal tubercles.

Habitat. Animals were obtained in the mossy base of *Heliophora* sarraceniaceae plants.

Discussion. Our knowledge of the tepui herpetofauna is rapidly increasing with proper explorations of remote regions in the Guianan Shield, such as the northern tepuis (Myers & Donnelly, 1996, 2001), southern tepuis (Myers & Donnelly, 1997) and Chimantá (Gorzula, 1992;

Williams *et al.*, 1996), etc. The final results from the Neblina expedition (Brewer-Carías, 1988), where at least 80% of the material remains unstudied, are not yet known. Only Donnelly *et al.*, (1992), Myers *et al.*, (1993), Roze (1987) and Zweifel (1986) provided results and described new taxa: respectively *Arthrosaura synaptolepis*, *Phenacosaurus neblininus*, *Micrurus (psyches) remotus* and *Adelastes hylonomos*.

As noted, only a few tepuis are known to be inhabited by *Eleutherodactylus*: Yavi (Myers & Donnelly, 1996), Tamacuari (Myers & Donnelly, 1997), Yutajé (Myers & Donnelly, 2001), Guanay, Corocoro, Aprada-tepui, Auyán-tepui, Terekyurén (Murisipán)-tepui, Yuruaní-tepui (Gorzula & Señaris, 1998), Neblina (McDiarmid & Paolillo, 1988) and Ayanganna (Guyana) (R. MacCulloch, pers. comm). Taking into account that there are more than 100 tepuis in Venezuela, we are sure that the number of *Eleutherodactylus* found to be inhabiting these areas will increase with the study of specimens in Museum collections and more expeditions.

Species of the *unistrigatus* group other than *Eleutherodactylus marahuaka* in the Venezuelan Guayana are *Eleutherodactylus avius*, *E. cantitans*, *E. marmoratus*, *E. memorans* and *E. yaviensis*. All inhabit slopes and summits of tepuis between 1160 and 2150 m, with the exception of *E. marmoratus*, which is known from the base of Roraima at 1100 m and from the slopes of Marahuaka at 1300 m. We do not consider *E. marmoratus* to be a close relative of *E. marahuaka*, because the differences pointed out in the diagnosis are enough to separate them, and because while *E. marahuaka* is a summit tepui inhabitant, *E. marmoratus* seems to be widely distributed in both lowlands and uplands in the Guiana Shield from Venezuela to French Guiana (Lescure & Marty, 2000).

Marahuaka is a tepui situated in the Central part of Estado Amazonas, adjacent to Cerros Duida and Huachamakari. It is the most diverse tepui in terms of described amphibians, with nine species known to date from summit and slopes (with asterisks indicating those believed to be endemic): *Colostethus shrevei*, *Metaphryniscus sosae* (*), *Stefania marahuaguensis*, *Hyla benitezi*, *H. inparquesi* (*), *Tepuihyla luteolabris* (*), *Dischidodactylus colonnelloi* (*), *Eleutherodactylus marmoratus* (Barrio-Amorós, 1998) and *Eleutherodactylus marahuaka* (*) described herein. Its biogeographic relationships with other tepuis are not clear yet. The closest tepui is Cerro Duida, (1250 km²; 2400 m, 20 km distant to Marahuaka, separated by deep river valleys), in which the known amphibian fauna is similar, with eight species (with asterisk those species believed to be endemic): *Cochra-*

nella duidaeana (*), *Colostethus brunneus*, *Stefania goini*, *S. marahuaguensis*, *Hyla benitezi*, *Tepuihyla aecii* (*), *Dischidodactylus duidensis* (*), *Eleutherodactylus marmoratus* (Barrio-Amorós, 1998). Huachamakari is a smaller tepui (nine km² of summit area, 1900 m, 17 km distant from Marahuaka), with only two known frog species: *Stefania goini* and *Hyla aromatica* (*). *Eleutherodactylus* have not been reported from either Duida or Huachamakari, although we expect their occurrence at least on Cerro Duida.

Acknowledgements

Charles Brewer-Carias led us with his experience in the Guianan Shield. He also provided the type material to describe this species and we deeply appreciate this. We thank Maureen Donnelly, Hinrich Kaiser, Eric Smith and Ross MacCulloch, who commented on preliminary versions of this work.

Bibliography

- Ayarzagüena, J. 1992. Los controlénidos de la Guayana Venezolana. Publ. Asoc. Amigos Doñana 1: 1-48.
- Ayarzagüena, J. & J. C. Señaris. 1993. Dos nuevas especies de *Hyla* (Anura, Hylidae) para las cumbres tepuianas del Estado Amazonas, Venezuela. Mem. Soc. Cien. Nat. La Salle 53 (139): 127-146.
- Ayarzagüena, J., Señaris, J. & Gorzula, S., 1992a.- El grupo *Osteocephalus rodriguezi* de las tierras altas de la Guayana venezolana: Descripción de cinco nuevas especies. Mem. Soc. Cien. Nat. La Salle 52 (137): 113-142.
- Ayarzagüena, J., Señaris, J. & Gorzula, S., 1992b.- Un nuevo género para las especies del "Grupo *Osteocephalus rodriguezi*" (Anura: Hylidae). Mem. Soc. Cien. Nat. La Salle 52 (138): 213-221.
- Barrio-Amorós, C. L. 1998. Sistemática y Biogeografía de los anfibios (Amphibia) de Venezuela. Acta Biol. Venez. 18 (2): 1-93.
- Barrio-Amorós, C.L., & O. Fuentes. 2003. A new species of the genus *Stefania* (Anura: Hylidae: Hemiphractinae) from the summit of the cerro Autana, Estado Amazonas, Venezuela. Herpetologica. 59 (4): 506-514.
- Brewer-Carías, Ch. 1988. *Cerro de la Neblina. Resultados de la expedición 1983-1987*. FUDECI. Caracas: 922 pp.
- Donnelly, M. A., R. W. McDiarmid & C. W. Myers. 1992. A new lizard of the genus *Arthrosaura* (Teiidae) from southern Venezuela. Proc. Biol. Soc. Washington 105 (4): 821-833.
- Duellman, W. E.. 1997. Amphibians of La Escalera Region, Southeastern Venezuela: Taxonomy, Ecology and Biogeography. Scient. Pap. Nat. Hist. Mus. Univ. Kansas 2: 1-52.
- Gorzula, S. 1992. La herpetofauna del macizo del Chimantá: 267-280. In: *El Macizo del Chimantá, Escudo de Guayana. Venezuela. Un ensayo ecológico tepuiano*. Hubber (scientific editor). Todtmann, O. Edit. Caracas: 343 pp.
- Gorzula, S. J., & J. Cerda. 1979. La herpetofauna del Territorio Federal Amazonas: Pp. 1-20 In: Distribución preliminar de la fauna silvestre del Territorio Federal Amazonas. MARNR Ser. Inf. Cient. CODESUR-División de Fauna. DGIIA/IC/03/79.
- Gorzula, S. & J. C. Señaris. 1998. Contribution to the herpetofauna of the Venezuelan Guayana. I. A data base. Scientia Guaianae 8: 267 pp.
- Lescure, J. 1981. Contribution a l'étude des Amphibiens de Guyana Française. VII. Les *Eleutherodactylus* (Anura, Leptodactylidae). Rev. fr. Aquariol., 8 (1): 25-32.
- Lescure, J. & Marty, C. 2000. Atlas des Amphibiens de Guyane. Muséum National d'Histoire Naturelle. Patrimoines Naturels 45: 388 p. Paris.
- Lynch, J. D. 1975. The identity of the frog *Eleutherodactylus conspicillatus* (Günther) with description of two related species from Northwestern South America (Amphibia, Leptodactylidae). Contrib. Science 272: 1-19.
- Lynch, J. D. 1976. The species groups of the South American frogs of the genus *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae). Occ. Papers Mus. Nat. Hist. Univ. Kansas, (61): 1-24.
- Lynch, J. D. 1994. Two new species of the *Eleutherodactylus conspicillatus* group (Amphibia: Leptodactylidae) from the Cordillera Oriental of Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 19 (72): 187-193.
- Lynch, J. D. & Duellman, W. E. 1997. Frogs of the genus *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) in Western Ecuador: Systematics, Ecology and Biogeography. The University of Kansas Natural History Museum. Special Publ. 23: 236 p.
- Lynch, J. D. & Hoogmoed, M. S. 1977. Two new species of *Eleutherodactylus* (Amphibia, Leptodactylidae) from northeastern South America. Proc. Biol. Soc. Washington, 90 (2): 424-439.
- McDiarmid, R. W. & Paolillo, A. 1988. Herpetological collections: Cerro de la Neblina. En: Brewer-Carias (ed.) *Cerro de la Neblina. Resultados de la expedición 1983-1987*. FUDECI. Caracas: 922 pp.
- Myers, C. W., E. E. Williams, & R. W. McDiarmid. 1993. A new anoline lizard from the highland of Cerro de la Neblina, southern Venezuela. Am. Mus. Novitates 3070: 15 pp.
- Myers, Ch. W & M. A. Donnelly. 1996. A new Herpetofauna from Cerro Yaví, Venezuela: First Results of the Robert G. Goelet American Museum-TERRAMAR Expedition to the Northwestern tepuis. Am. Mus. Novitates 3172: 1-56.
- Myers, Ch. W & M. A. Donnelly. 1997. A tepui Herpetofauna on a Granitic Mountain (Tamacuari) in the borderland between Venezuela and Brazil. Report of the Phipps-Tapirapecó Expedition. Am. Mus. Novitates 3213: 1-71.
- Myers, Ch. W & Donnelly, M.A. 2001. Herpetofauna of the Yutajé-Corocoro Massif, Venezuela: Second report from the Robert G. Goelet American Museum-TERRAMAR Expedition to the Northwestern tepuis. Bull. Am. Mus. Nat. Hist. 261: 1-85.

- Rivero, J. A.** 1961. Salientia of Venezuela. Bull. Mus. Comp. Zool., Harvard 126 (1): 1-267.
- Roze, J. A.** 1987. Summary of Coral snakes (Elapidae) from Cerro de la Neblina, Venezuela, with description of a new subspecies. Rev. Fr. Aquariol. 14: 109-112.
- Señaris, J. C., J. Ayarzagüena, & S. Gorzula.** 1994. Los sapos de la familia Bufonidae (Amphibia: Anura) de las tierras altas de la Guayana venezolana: Descripción de un nuevo género y tres especies. Publ. Asoc. Amigos Doñana, 3: 1-37.
- Señaris, J. C., J. Ayarzagüena, & S. Gorzula.** 1996. Revisión taxonómica del género *Stefania* (Anura; Hylidae) en Venezuela, con la descripción de cinco nuevas especies. Publ. Asoc. Amigos Doñana 7: 1-55.
- Williams, E. E., M. J. Praderío & S. Gorzula.** 1996. A phenacosaur from Chimantá tepui, Venezuela. Breviora 506: 1-15.
- Zweifel, R. G.** 1986. A new genus and species of microhylid frog from the Cerro de la Neblina region of Venezuela and a discussion of relationships among New World microhylid genera. Amer. Mus. Novitates 2847: 1-24.

PRIMER REGISTRO DE UNA SERPIENTE DEL GÉNERO *AMASTRIDIDIUM* COPE, (SERPENTES: COLUBRIDAE), PARA SUDAMÉRICA

por

José Vicente Rueda-Almonacid* & José Nicolás Rueda-Martínez**

Resumen

Rueda-Almonacid, J. V. & J. N. Rueda-Martínez: Primer registro de una serpiente del género *Amastridium* Cope, (Serpentes: Colubridae), para Sudamérica. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **28** (107): 291-293, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se documenta el hallazgo de *Amastridium veliferum* (Ophidia: Colubridae), en la región noroccidental de Sudamérica, con base en un ejemplar macho adulto procedente de la vertiente oeste de la cordillera Occidental de Colombia. Este individuo posee las características fenotípicas propias de las poblaciones del sur de Centroamérica (Costa Rica y Panamá), aún cuando es de un color más claro (achocolatado) y tiene escasamente definido el patrón de manchas oscuras sobre el dorso de la cabeza.

Palabras clave: Herpethología, serpientes, colubridae, *Amastridium*, Colombia.

Abstract

We document the finding of *Amastridium veliferum* (Ophidia: Colubridae), in northwestern region of South America. This specimen has the phenotypical characteristics found in population of southern Central America (Costa Rica and Panama), even though it has a brighter color and the dark spots over the top of head are barely seen.

Key words: Herpethology, serpents, colubridae, *Amastridium*, Colombia.

Introducción

El género *Amastridium* Cope, “1860”-1861, constituye un típico elemento de la ofidiofauna mesoamericana,

el cual fue incluido dentro de la subfamilia Dipsadinae por **Zaher** (1999). Estas raras serpientes, conocidas apenas por unos pocos ejemplares, poseen una distribución muy amplia en las vertientes Pacífica y Atlántica de Cen-

* Biólogo - Programa especies Amenazadas - Conservación Internacional – Colombia, jvrueda@yahoo.com

** Corporación Colombia En Hechos, nicolás@colombiaenhechos.org

tro América y habitan desde el Estado de Nuevo León, México hasta la zona del Canal de Panamá, entre 0-1520 msnm. (Wilson & Robinson, 1971; Wilson & Meyer, 1969). Son serpientes diurnas, ovíparas, propias de ambientes selváticos, de hábitos semifosoriales que viven dentro del colchón de hojarasca, en donde se alimentan de ranas (*Eleutherodactylus*). *Amastridium* muestra rasgos morfológicos excepcionalmente variables dentro de los colúbridos, dado que el número de escamas del vientre, las subcaudales, la condición de la loreal y la coloración varían ostensiblemente entre una población y otra y aun dentro de individuos de una misma población, a tal punto que los 4 primeros ejemplares coleccionados fueron clasificados en 4 géneros diferentes (Wilson & Meyer, 1969). Como ya se mencionó la taxonomía del género ha sido algo confusa, debido a la extraordinaria variabilidad de los caracteres de la lepidosis; por lo cual Smith (1971) y Savage (2002) reconocen dos especies válidas dentro del género: *Amastridium veliferum* y *A. sapperi*; en tanto que Wilson (1988) solo considera como válida a *A. veliferum*.

Wilson & Robinson (1971), informaron de un ejemplar procedente de la vertiente del Pacífico de Costa Rica pseudohermafrodita: con ovarios funcionales y hemipenes defectuosos y recomendaron realizar el examen directo de las gónadas para verificar el sexo de los individuos obtenidos al sur de su distribución geográfica para evaluar la proporción de sexos y comprobar si el sesgo hacia los machos en esta región se debe a este fenómeno.

En 1987 los profesores del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia Pedro Ruiz (q.e.p.d) y María Cristina Ardila, atraparon un macho adulto de esta especie en inmediaciones del municipio de Carmen del Atrato en el departamento del Chocó, sobre la ladera del Pacífico de la cordillera Occidental de Colombia, a una altura de 1690 msnm, el cual amplía considerablemente la distribución hacia el sur de esta especie y la incorpora a la herpetofauna sudamericana.

Amastridium veliferum Cope (1861)

Localidad

Colombia, departamento del Chocó, municipio del Carmen de Atrato, Km. 21-22, carretera Carmen de Atrato al corregimiento de Guaduas, 1610-1690 m.s.n.m. Agosto 29 de 1987. Colectores: Pedro M. Ruiz-C., María Cristina Ardila-R., R. Sánchez & G. Susatama.

Características morfológicas

El material examinado se encuentra depositado en el Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional de Colombia, bajo el número de colección ICN 10. 105 (número de campo MC1680) y presenta características en común en el escamado con los reportes dados en la revisión del género por Wilson & Meyer (1969): Cabeza alargada aun cuando claramente diferenciable del cuerpo, pupila redondeada; dorso cefálico con el complemento de escudos característico de la familia: una rostral, dos internasales, un par de prefrontales, una frontal, dos supraoculares y dos parietales. Borde cantal muy pronunciado, supralabiales 7-7, la 3 y 4 conforman la parte inferior de la órbita; nasal dividida y con el *nostril* ubicado hacia la región anterior de la escama; escudo loreal ausente, preoculares 1-1, (con un canto muy pronunciado) en contacto con la supraorbital y la prefrontal; 2-2 postoculares, la inferior de menor tamaño y la superior en contacto con la parietal y supraocular; temporales anteriores 1-1 (1 minúscula pre-temporal del lado izquierdo), temporales posteriores 2-2; infralabiales 8-8, 4 infralabiales anteriores en contacto con el primer par de geneiales y dos con el segundo par; 2º par de mentonianos mucho más largos que el primero, 4ª y 5ª infralabiales agrandadas siendo la 5ª la mayor. Escamas de la cerviz con dos fosetas apicales un tanto asimétricas, las demás dorsales lisas y sin reducción, dispuestas en 17 hileras transversales; ventrales 125, placa anal dividida; subcaudales divididas y en número de 68. Todas las supracloacales quilladas o tuberculadas, incluidas las vertebrales, aún cuando las quillas se van atenuando de abajo hacia arriba. 12+2 dientes maxilares los cuales van incrementando gradualmente su tamaño en sentido antero-posterior, los dos últimos mucho más grandes, sin acanaladuras y separados de los anteriores por una diastema.

Macho con los hemipenes revertidos: hemipene simple, claviforme no capitado, con tres grandes espinas en la base, levemente bifurcado en el ápice, tercio distal calculado y dos tercios basales espinosos, área por debajo de la triada de espinas grandes (pedicelo), lisa y desnuda. Surco espermático bífido en su extremo apical, en el punto de unión de la región calculada y espinosa, cada brazo se extiende muy poco dentro de los cálices. Espinas de la superficie surcada algo más pequeñas que las del lado asurcado. Cálices del lado surcado grandes y papilados los otros pequeños y espinulados.

Coloración en etanol 70%

Iris café oscuro, dorso uniformemente achocolatado excepto por unos minúsculos puntos claros ubicados ha-

cia el centro de las escamas y dispuestos a todo lo largo de la 5 hilera de escamas dorsales, e ínter espaciados por 2-3 hileras transversales de escamas. Parietales y temporales un poco más claras. Cabeza muy poco manchada y con diseño muy leve dispuesto como una serie de estrías oscurecidas sobre las prefrontales-frontal y supraoculares. Una tenue lista postocular oscura ocupa la mitad del ancho de las supralabiales y temporales y se desvanece a la altura del rictus mandibular donde se entremezcla con el color más oscuro del cuello. Supralabiales café oscuro en la mayor parte de su base y con una manchita central más clara bordeada arriba y debajo de café oscuro en cada una de las supralabiales posteriores. Infralabiales y escamas del mentón, garganta y primeras gastrales café con diminutas manchitas claras, las de las infralabiales simulan minúsculos ocelos, en tanto que las de las primeras escamas del vientre se disponen a manera de estrías. Superficies abdominales y cola un poco más claras que el dorso.

Dimensiones

Longitud total 449 mm., longitud cuerpo 320 mm., longitud cola 129 mm., anchura cefálica 8.4 mm., longitud cefálica 11.5 mm., distancia narina-ojo 2.35 mm., diámetro del ojo 3.0 mm. Relación longitud caudal / longitud total 0.287.

Hábitat y notas ecológicas

Las notas de campo de los colectores indican que esta serpiente fue capturada "En piso de pequeño cascajo cerca a matorral al borde de la carretera". La región donde se encontró el ejemplar hace parte de la formación vegetal Bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) la cual recibe en promedio de 2486 mm., de precipitación al año. La mayor parte del territorio está cubierto por selvas primarias, bosques entresacados y rastrojos altos.

Comentarios

El ejemplar ICN exhibe los recuentos de escamas dentro del límite inferior de la variabilidad señalada para la especie; así por ejemplo posee 125 gastrales de las 119-170 reseñadas para el género por **Wilson & Meyer** (1969);

tiene 68 subcaudales que coincide con el número más bajo de la variabilidad de la especie (68-86), posee una espina adicional en la base de los hemipenes y tiene una coloración dorsal mucho más clara incluido lo difumado del patrón de manchas negras sobre el dorso de la cabeza.

El hallazgo de *Amastridium* en la vertiente del Pacífico de Colombia amplía hacia el sur la distribución del género en más de 500 Km., e incrementa un poco más los límites de su distribución vertical (hasta 1690 msnm).

Agradecimientos

Deseamos consignar nuestro aprecio y reconocer la amabilidad de la profesora María Cristina Ardila del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, por habernos permitido estudiar el material de reptiles acopiado en desarrollo de sus estudios sobre la fauna anfibia del país. El profesor Pedro M. Ruiz estimuló, en todo momento, nuestro interés por el estudio de la herpetofauna colombiana y a él quisieramos rendirle un sentido tributo de agradecimiento póstumo.

Bibliografía

- Savage, J. M.** 2002. The amphibians and reptiles of Costa Rica. A herpetofauna between two continents, between two seas. The University of Chicago Press. Chicago and London. 934 pp.
- Smith, H. M.** 1971. The snake genus *Amastridium* in Oaxaca, Mexico. *Great Basin Natur* 31: 254-255.
- Wilson, L. D.** 1988. *Amastridium*, *A. veliferum*. Catalogue of American Amphibians and Reptiles. 449. 1-449. 3
- Wilson, L. D. , & D. C. Robinson.** 1971. Additional specimens of the colubrid snake *Amastridium veliferum* Cope from Costa Rica, with comments on a pseudohermaphrodite. *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences* 70 (1): 53-54.
- Wilson, L. D. , & J. R. Meyer.** 1969. A review of the colubrid snake genus *Amastridium*. *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences* 68 (3): 145-160.
- Zaher, H.** 1999. Hemipenial morphology of the South American xenodontine snakes, with a proposal for a monophyletic Xenodontinae and a reappraisal of colubrid hemipenes. *Bulletin of the American Museum Natural History* 240: 1-168.

RECONOCIMIENTO DE NEMATODOS FITOPATÓGENOS EN PLÁTANOS DOMINICO HARTÓN (*MUSA* AAB SIMMONDS), ÁFRICA, FHIA-20 Y FHIA-21 EN LA GRANJA MONTELINDO, MUNICIPIO DE PALESTINA (CALDAS), COLOMBIA

por

Óscar Adrián Guzmán-Piedrahita¹ & Jairo Castaño-Zapata, Ph.D.²

Resumen

Guzmán-Piedrahita, O & J. Castaño-Zapata: Reconocimiento de nematodos fitopatógenos en plátanos dominico hartón (*Musa* AAB Simmonds), África, FHIA-20 y FHIA-21 en la granja Montelindo, municipio de Palestina (Caldas), Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (107): 295-301, 2004. ISSN: 0370-3908.

Los fitonematodos más devastadores de las musáceas son los endoparásitos migratorios *Radopholus similis* y *Pratylenchus coffeae* y el semiendoparásito *Helicotylenchus multicinctus*. Esta investigación tuvo como objetivo reconocer las especies y poblaciones de fitonematodos afectando las cultivariedades de plátano “Dominico hartón” y “África” e híbridos “FHIA-20” y “FHIA-21”. El estudio se efectuó en la granja Montelindo de la Universidad de Caldas, localizada a 1010 msnm. Cada muestra se conformó de 200 g de suelo y raíces del hijo de sucesión con menos de 2 m de altura, en plantas recién florecidas. La extracción de nematodos se hizo por el método de licuado, centrifugación y flotación en azúcar. Se identificaron los nematodos fitoparásitos *Radopholus similis*, *Helicotylenchus multicinctus*, *Pratylenchus* spp. y *Meloidogyne* spp. Las poblaciones más altas se registraron en raíces de “D. hartón” y “FHIA-21”.

Palabras clave: Plátano, *Radopholus similis*, *Helicotylenchus multicinctus*, *Pratylenchus* spp., *Meloidogyne* spp.

¹ I.A. Programa de Agronomía, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas.

² Profesor Titular. Departamento de Fitotecnia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas A.A. 275, Manizales Caldas. Colombia. Correo electrónico: fitotec.ucaldas.edu.co

Summary

The most devastating nematodes to *Musa spp.* are the endoparasites *Radopholus similis* and *Pratylenchus coffeae* and the semiendoparasite *Helicotylenchus multicinctus*. This research had as objective to identify the nematodes and their populations affecting the cultivar varieties of plantain "Dominico hartón" and "Africa" and the hybrids "FHIA 20" and "FHIA 21". The study was carried out at the experimental station of Montelindo of the Universidad de Caldas, located at 1010 mosl. Each sample consisted of 200 g of soil and roots. The extraction of nematodes was conducted following the centrifugal flotation method. The nematodes identified were: *R. similis*, *H. multicinctus*, *Pratylenchus spp.* and *Meloidogyne spp.* The highest populations of nematodes were obtained from roots of "D. hartón" and the hybrid "FHIA 21".

Key words: Plantain, *Radopholus similis*, *Helicotylenchus multicinctus*, *Pratylenchus spp.*, *Meloidogyne spp.*

Introducción

En Colombia, hay alrededor de 400.000 Ha sembradas en plátano con una producción de aproximadamente 2'970.000 ton, de las cuales el país consume el 96% y exporta el resto (Merchan, 1996; Arcila & Torres, 1998). El plátano, es un alimento básico en el país y su consumo ocupa el tercer lugar después de la papa y la leche (Grisales & Lescot, 1999); convirtiéndose en un producto indispensable de la canasta familiar debido a su calidad alimenticia, además, su cultivo genera fuentes de trabajo e importantes recursos económicos (Cruz *et al.*, 1990).

Los problemas fitosanitarios más importantes en el cultivo del plátano son las Sigatokas (*Mycosphaerella spp.*) que afectan el follaje, el Picudo negro (*Cosmopolites sordidus*) que afecta el cormo y los nematodos fitoparásitos que afectan las raíces y el cormo. Estos últimos han obligado al desarrollo de estrategias de manejo genético, químico, biológico y cultural, que permitan la disminución de los daños ocasionados por ellos (Montiel *et al.*, 1997).

Los fitonematodos que afectan el plátano causan daño directo a las raíces y el cormo, producen un crecimiento deficiente de las plantas, hojas más pequeñas y en menor número, frutos de un peso reducido e inducen al volcamiento de las plantas y pudrición del sistema radical (Montiel *et al.*, 1997). Las pérdidas en la producción se estiman en un 20% (Saser & Freckman, 1987, citados por Marín, 1997). Sin embargo, pérdidas de hasta 80% han sido determinadas en otros estudios (Sarah, 1989, citado por Marín, 1997).

En Musáceas, se reportan 146 especies de nematodos parásitos o asociados al género *Musa*, distribuidas en 43 géneros. Los fitonematodos más devastadores y amplia-

mente distribuidos son los endoparásitos migratorios *Radopholus similis* y *Pratylenchus coffeae* y el semiendoparásito *Helicotylenchus multicinctus* (Araya, 1995). De menor importancia se reportan las especies del nematodo endoparásito sedentario *Meloidogyne* y el semiendoparásito sedentario *Rotylenchus reniformis* (Gowen & Queneherve 1990; Araya 1995).

R. similis (nematodo barrenador) es el de mayor importancia económica en la mayoría de regiones donde se cultivan banano y plátano. Los síntomas en las raíces, son lesiones de aproximadamente 10 cm de longitud, rojizas al principio y luego negras; después que el tamaño de la lesión aumenta y se forman cavidades en la corteza, el tejido vascular queda expuesto a la invasión de microorganismos secundarios que ocasionan la muerte de la raíz en la parte posterior de la lesión. Infecciones severas tornan el rizoma necrótico, lo que indujo a Ashby (1915) citado por Roman (1978) a llamar a la enfermedad "cabeza negra". Como consecuencia, se produce alargamiento del ciclo vegetativo, disminución en el tamaño, número de hojas y desarrollo de las plantas, lo que a su vez ocasiona reducción en el peso del racimo, y en la vida productiva de la plantación y mayor volcamiento de las plantas (Gowen & Queneherve, 1990).

Han sido reportadas ocho especies del género *Pratylenchus* que atacan Musáceas en el mundo, aunque solamente dos están ampliamente distribuidas y reconocidas como dañinas; éstas son: *Pratylenchus coffeae* y *P. goodeyi* (Thorne, 1961; Gowen & Queneherve, 1990). *P. coffeae* (nematodo lesionador) fue reportado en raíces de plátano en Granada y descrito como *Tylenchus musicola* por Cobb en 1919. Este nematodo, a diferencia de *P. goodeyi*, parece estar ampliamente distribuido a través del mundo (Gowen & Queneherve, 1990). El síntoma en raíces es una necrosis extensiva de color negro o púrpura en los

tejidos epidermal y cortical, con frecuencia acompañada por una pudrición secundaria y ruptura de la raíz (**Gowen & Queneherve**, 1990).

H. multicinctus (nematodo espiral) es probablemente, después de *R. similis*, el nematodo más numeroso y ampliamente diseminado en las plantaciones de banano y plátano del mundo. Los síntomas causados en las raíces, son lesiones superficiales rojas en la epidermis y en la corteza (**Roman**, 1978; **Gowen & Queneherve**, 1990).

Meloidogyne spp. (nematodos noduladores de las raíces) se encuentran en las raíces de bananos y plátanos en todos los lugares donde crecen estos cultivos (**De Waele & Davide**, 1998; **Figuroa**, 1990). Los síntomas primarios son hinchamientos y agallas en las raíces primarias y menor cantidad de raíces secundarias y terciarias, produciendo síntomas secundarios como amarillamiento en las partes aéreas de la planta, hojas más angostas, detención del crecimiento de la planta y menor producción, con pérdidas hasta del 57 %. Estos nematodos tienen un amplio rango de hospedantes, especialmente plantas dicotiledóneas, que a menudo se encuentran en las áreas donde se cultivan Musáceas (**De Waele & Davide**, 1998).

El plátano “Dominico hartón”, pertenece al grupo *Musa* (AAB), subgrupo plátano, tipo “Horn”. En otros países de América Latina se conoce como “Macho x Hembra”, “Maricongo” o “Bastard”. Es un material bastante inestable, que de acuerdo con la altitud de siembra muestra el efecto de la interacción genotipo-ambiente sobre la fisiología de la planta y su racimo. Es susceptible a *R. similis* y se considera un material intermedio entre el Dominico y el Hartón (**Belalcázar**, 1991).

El cultivar “África”, es una selección del clon africano “Mbouroukou”, tipo “Hartón”, que se adapta muy bien desde el nivel del mar hasta los 1.700 m de altitud, cuyo racimo puede alcanzar hasta 26 kg de peso y la calidad de los frutos es similar a la del “Dominico hartón”; el ciclo es de aproximadamente 10 meses, dependiendo de la fertilización aplicada, lo que le permite mantener una o dos hojas funcionales hasta el momento de la cosecha (www.corpoica.org.co 2000).

El híbrido “FHIA-20” (AAAB) es resistente al Mal de Panamá, a las Sigatokas negra y amarilla, y es altamente susceptible a *R. similis*; y constituye una alternativa para substituir al plátano “Cuerno”. Su alto rendimiento (20-30 kg sin raquis) y excelente calidad, lo sitúan en un lugar preferencial para consumo fresco, cocido verde o maduro. Su producción puede ser dos a tres veces mayor que el plátano “Cuerno” (WWW.FHIA.HN/Banano.HTM 1998).

El híbrido “FHIA-21” (AAAB) es resistente al Mal de Panamá y a las Sigatokas negra y amarilla, de alto rendimiento (22 –27 kg sin raquis) y su excelente calidad lo sitúa también en un lugar preferencial para consumo fresco, cocido verde o maduro. Este material es susceptible a *R. similis* y está siendo cultivado por pequeños agricultores y cooperativas en Honduras, Nicaragua y Ecuador, con excelentes resultados. Su producción, bajo condiciones similares, puede ser dos a tres veces mayor que el plátano “Cuerno” (WWW.FHIA.HN/Banano.HTM 1998).

Debido al daño que los nematodos causan en las raíces y el cormo, y a la escasa información existente sobre su incidencia en el municipio de Palestina (Caldas, Colombia) se llevó a cabo el presente estudio con el fin de realizar el reconocimiento de los géneros y poblaciones de fitonematodos que causan interferencia en el desarrollo y funcionamiento del sistema radical de los materiales de plátano “Dominico hartón”, “África”, “FHIA-20” y “FHIA-21” en la granja Montelindo.

Materiales y métodos

La granja Montelindo de la Universidad de Caldas, está ubicada en la vereda Santaguada, municipio de Palestina, departamento de Caldas, a una altitud de 1010 msnm, con temperatura media anual de 22.8°C y precipitación anual de 2200 mm. Los suelos son originados a partir de cenizas volcánicas andesíticas de grano fino, clasificados como Typic dystrandept con buena fertilidad natural y textura franco arenosa (**Salazar & Duque**, 1994).

Las plantas de plátano “África”, “FHIA-20” y “FHIA-21” fueron micropropagadas en el laboratorio de cultivo de tejidos del Departamento de Fitotecnia, el “Dominico hartón” fue obtenido en forma de colino, de aproximadamente 1 kg de peso, proveniente de la hacienda Chagualito del municipio de Chinchiná, Caldas. Al momento del muestreo, las plantas tenían 12 meses de edad y estaban sembradas en parcelas de 25 plantas (5 X 5) a una distancia 3 X 2 m, y con bordes de plátano “Dominico hartón” a igual distancia. La distribución de las parcelas se realizó al azar. Antes de la siembra se incorporó, por sitio, 1 Kg de cenichaza, 13 g de furadan 3 GR, 10 g de MgO y 15 g de bórax. Se hicieron tres fertilizaciones cada 4 meses (200 g por planta), la primera, con NH₄ NO₃ + KCl (relación 1:1); la segunda, con cumba (15-4-23-4) y la tercera, con NH₄SO₄ + KCl (relación 1:1). No se aplicaron fungicidas ni insecticidas. Se realizó deshoje dejando dos hijos de sucesión, deshoje (eliminando las hojas dobladas y secas cortando de abajo hacia arriba en la base de las mismas) y desyerbas (cada 4 meses con guadaña en las calles y manualmente en el plato de las plantas).

Se tomaron muestras de 200 g de suelo y raíces del hijo de sucesión con menos de 2 m de altura, procedente de plantas recién florecidas (no más de 8 días) (Araya *et al.*, 1995; Araya & Chaves, 1997). Las muestras se extrajeron con un palín de hoja rectangular (13 x 50 cm de ancho y largo, respectivamente) a una distancia de 25 cm de la base de las plantas de un hoyo de 13 cm de largo y ancho y 30 cm de profundidad, orientado al frente del hijo de sucesión (Araya *et al.*, 1995; Cebrales, 1995). Tanto el suelo como las raíces se colocaron en bolsas plásticas debidamente identificadas (rotuladas) y se trasladaron para su análisis al laboratorio de Fitopatología del departamento de Fitotecnia de la Universidad de Caldas.

Las raíces se lavaron con agua potable por 3 min, se permitió el escurrimiento superficial, y se separaron en funcionales (vivas) y no funcionales (necrosadas y muertas); luego, se pesaron 25 g de raíces funcionales en una balanza Analytical Plus (Ohaus, modelo AP210S), se cortaron con tijeras transversalmente en trozos de 1 cm, y se homogenizaron (Araya *et al.*, 1995). La extracción se hizo por el método de licuado, centrifugación y flotación en azúcar (Castaño-Zapata *et al.*, 1997; Araya *et al.*, 1995) de la siguiente manera: las raíces se colocaron en un *beaker* y se aforó hasta 1000 mL con agua potable, luego fueron licuadas en una licuadora Osterizer (modelo 565-15), pasando de baja a alta velocidad, ambas por 30 seg. El licuado se tamizó en tres tamices sobrepuestos No. 35, 100 y 400 (0.5, 0.150, 0.038 mm, respectivamente). Los tamices No. 35 y 100 se lavaron por 2 min. y el contenido de este se vertió en un *beaker* de 200 mL y se aforó con agua potable hasta 100 mL. Luego, se homogenizó la mezcla agua-raíz con una varilla de vidrio por 30 seg. y se vertió en los tubos de la centrifuga balanceados separadamente (3800 rpm durante 5 min). El sobrenadante se desechó y se volvieron a llenar los tubos con solución azucarada (500 g de azúcar disueltos en 1 L de agua) y se colocaron en la centrifuga a 3800 rpm durante 5 min.; el sobrenadante se depositó en el tamiz No. 400 y se lavó con un frasco lavador, que contenía agua destilada, para eliminar la solución azucarada, luego

se vertió en un *beaker* de 100 mL y se aforó con agua potable hasta 20 mL. La suspensión se homogenizó con una varilla de vidrio por 10 seg. y luego se tomó una alícuota de 5 mL que se transfirió a una cámara de lectura (caja de Petri dividida en 8 cuadrados). Una vez hecho el conteo con la ayuda de un estereoscopio (marca Nikon), los 5 mL se reintegraron al *beaker*, se agitó nuevamente y se repitió el conteo tres veces. Se obtuvo el promedio de nematodos mL⁻¹ y se calculó la población total de nematodos por muestra analizada.

La identificación se realizó tomando 20 nematodos de la cámara de lectura con una aguja de disección, los cuales se colocaron en un porta-objetos con una gota de agua que se cubrió con un cubre-objetos y se observaron en un microscopio compuesto (marca Nikon) a través del objetivo 40 X, haciendo la identificación con la ayuda de las claves taxonómicas de Luc *et al.*, (1990), Thorne (1961), Taylor (1968), Roman (1978) y Castaño-Zapata & Salazar (1998).

Se hizo análisis de varianza para los promedios de las poblaciones obtenidas con el fin de determinar si había diferencias entre los materiales. Los análisis se hicieron utilizando el programa estadístico MSTAT – C de la Universidad de Michigan (Bricker, 1991).

Resultados y discusión

Se identificaron dos géneros y dos especies de nematodos fitoparásitos: *Pratylenchus* spp., y *Meloidogyne* spp., *Helicotylenchus multicinctus* y *Radopholus similis* (Figuras 1 y 2). Con la excepción de *R. similis* para los plátanos “África” y “FHIA-20”, los restantes nematodos se encontraron afectando los materiales de plátano estudiados. Las poblaciones fueron en su orden: *Meloidogyne* spp., *R. similis*, *H. multicinctus* y *Pratylenchus* spp. (Tabla 1), corroborándose el hábitat de éstas especies y sus condiciones de parásitos obligados (Thorne, 1968; Roman, 1978).

Tabla 1. Cuantificación de los fitonemátodos identificados en las cuatro cultivariedades de plátano estudiadas.

Variedad	<i>R. similis</i>		<i>Pratylenchus</i> spp.		<i>H. multicinctus</i>		<i>Meloidogyne</i> spp.	
	Suelo	Raíces	Suelo	Raíces	Suelo	Raíces	Suelo	Raíces
Dominico hartón	412 a)	2605	412	650	204	1166	412	710
África	0	0	285	797	3136	1940	3704	3220
FHIA-20	0	0	860	675	312	2032	2580	3819
FHIA-21	1168	3135	1752	1486	584	3096	2336	4040

a) Promedio de tres repeticiones y 100 g de muestra.

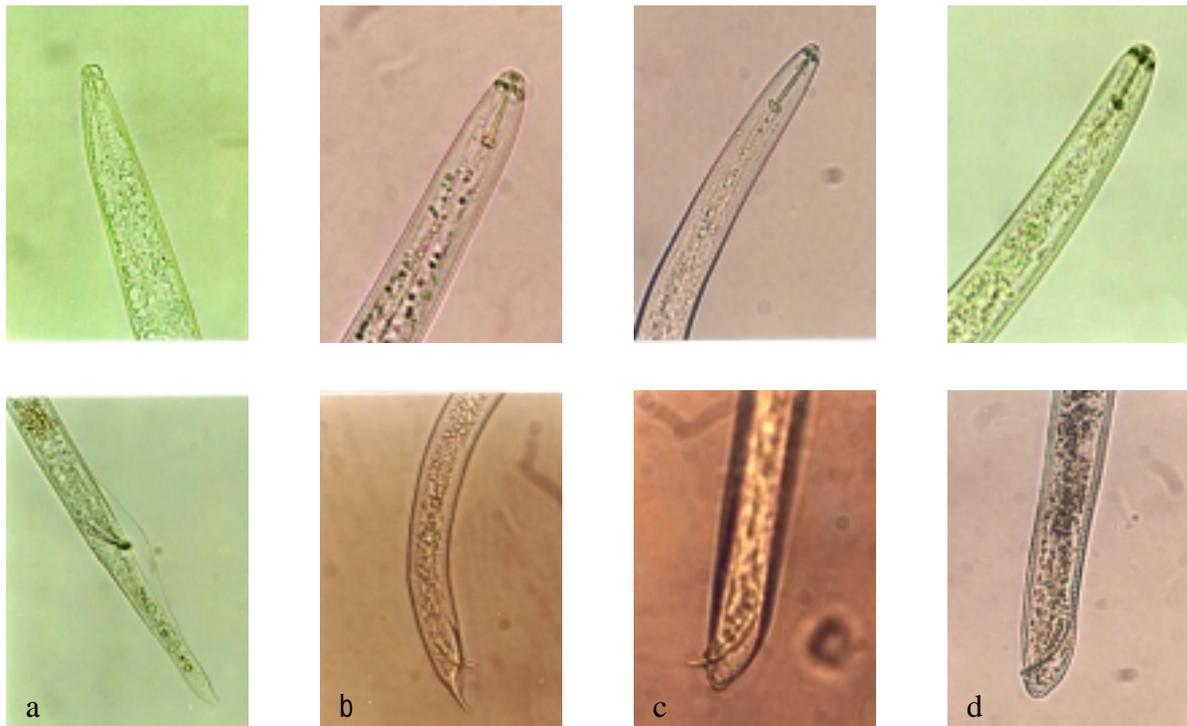


Figura 1. Región de la cabeza y cola de machos de las especies identificadas: **a.** *Radopholus similis*, **b.** *Pratylenchus* spp. **c.** *Helicotylenchus multicinctus*, **d.** *Meloidogyne* spp.

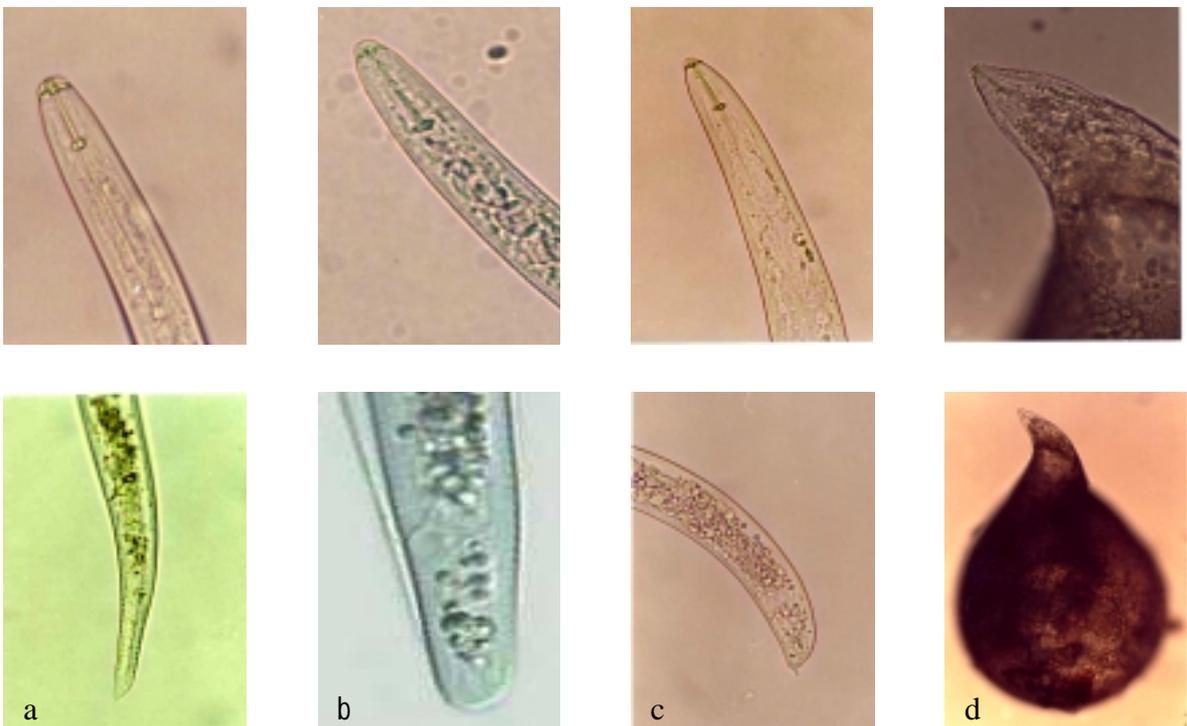


Figura 2. Región de la cabeza y cola de hembras de las especies identificadas: **a.** *Radopholus similis*, **b.** *Pratylenchus* spp. **c.** *Helicotylenchus multicinctus*, **d.** Cabeza y hembra completa de *Meloidogyne* spp.

Las poblaciones más altas de *R. similis* se registraron en raíces de “FHIA-21” y “Dominico hartón” (Tabla 1), lo cual explica el alto porcentaje de volcamiento de éstos genotipos bajo las condiciones del sitio experimental, disminuyendo significativamente sus potenciales de producción.

Las poblaciones bajas de *Pratylenchus* spp. en la región de Santágueda corroboran las observaciones de **Araya et al.** (1993), en el sentido de que éste nematodo es más frecuente en climas fríos.

Aunque en “África” y “FHIA-20” no se registró *R. similis*, si se observaron poblaciones relativamente altas de *Meloidogyne* spp. (Tabla 1). La ausencia de *R. similis* en estos dos genotipos, la especie más limitante de la producción de banano y plátano en el mundo, es un factor que coadyuva al alto rendimiento de estos dos materiales bajo las condiciones de la granja Montelindo. Es de anotar que “FHIA-20” es susceptible a éste nematodo. El hecho de no encontrarlo en muestras de suelo y raíces, se puede atribuir a la ausencia de inóculo, probablemente debido a que previamente esta parcela estuvo establecida con pasto bermuda (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.), o a caracteres de resistencia heredados de “SH-3437”, resistente a fitonematodos (**Binks & Gowen**, 1996).

Bajo las condiciones de las zonas cafeteras de la región Andina de Colombia, en donde se cultivan 231.000 Ha en plátano, con una producción de 1.650.000 t año⁻¹, equivalentes al 67% de la producción nacional (**Rodríguez & Rodríguez**, 2001), *R. similis* es una gran amenaza para las explotaciones de plátano, constituyéndose además en un factor predisponente para que actúen otros patógenos como hongos, bacterias y virus; por lo tanto es necesario monitorear sus poblaciones y comenzar a realizar manejos integrados en las plantaciones comerciales.

Bibliografía

- Araya M.** 1995. Efecto depresivo de ataques de *Radopholus similis* en banano (*Musa* AAA). *CORBANA* 20 (43): 3-5.
- Araya M., M. Centeno & W. Carrillo.** 1995. Densidad poblacional y frecuencia de los nematodos parásitos de banano (*Musa* AAA) en nueve cantones de Costa Rica. *CORBANA* 20 (43): 6-11.
- Araya M. & A. Chaves.** 1997. Selección del tipo de planta para el muestreo de nematodos en banano (*Musa* AAA). *INFOMUSA* 7 (1): 23-26.
- Arcila M. & F. Torres.** 1998. Aspectos sobre fisiología y manejo poscosecha del plátano en la región cafetera central. Influencia de las condiciones ambientales sobre las propiedades físicas y químicas del fruto. En: Seminario Internacional sobre Producción de Plátano. Armenia, Quindío, Colombia (4 al 8 de Mayo de 1998). Memorias Seminario Internacional sobre Producción de Plátano. Pp 247-259.
- Belalcázar C. S.** 1991. Aspectos agronómicos. En: El Cultivo del Plátano en el Trópico. Manual de Asistencia Técnica No. 50. Impresora Feriva Ltda. Cali - Colombia. 376 pp.
- Binks R. & S. Gowen.** 1996. Evaluación en el campo de las infestaciones de nematodos en germoplasma de *Musa*. *INFOMUSA* 5 (2): 15-16.
- Bricker B.** 1991. MSTAT-C. A microcomputer program for the design, management, and analysis of agronomic research experiments. Michigan State University.
- Cabrales L.** 1995. Determinación del sitio de muestreo de raíces en estudios nematológicos del banano. *ASCOLFI* 19 (1): 129-135.
- Castaño-Zapata J. & H. Salazar.** 1998. Illustrated guide for identification of plant pathogens. University of Caldas. Manizales, Colombia. Pp 74-98.
- Castaño-Zapata, J., L. Del Río-Mendoza & A. Acosta.** 1997. V. Nematodos fitoparásitos. Pp. 113-120. En: Manual para el Diagnóstico de hongos, bacterias, virus y nemátodos fitopatógenos. (Castaño-Zapata, J. y del Río-Mendoza, eds.). Centro Editorial Universidad de Caldas-Zamorano. 210 pp.
- Cruz C. G., C. A. Rebolledo, D. Betancourt, S. A. Morales & J. R. Duque.** 1990. Evaluación técnica económica de los sistemas de producción de plátano en el gran Caldas. Universidad de Caldas. Facultad de Agronomía. 186 pp.
- De Waele D. & R. Davide.** 1998. Nematodos noduladores de las raíces del banano, *Meloidogyne incognita* (Kofoid y White, 1919) Chitwood, 1949 y *Meloidogyne javanica* (Treub, 1885) Chitwood, 1949. En: Plagas de *Musa*. Hoja divulgativa No 3.
- Figuroa M.** 1990. Dinámicas poblacionales de cuatro géneros de nematodos parásitos en plátano (*Musa* AAB, subgrupo plátano cv Currare). *ASBANA* 14 (33): 5-7.
- Gowen S. & P. Queneherve.** 1990. Nematodes of bananas, plantains and abaca. In: Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture. (M. Luc, R. Sikora, and J. Bridge, eds.). CAB International. London. Pp. 431-460.
- Grisales-López F. & T. Lescot.** 1999. Encuesta diagnóstica multifactorial sobre plátano en la zona cafetera central de Colombia. *CENICAFE - Chinchina - Caldas - Colombia*. Pp 1-60.
- Luc M., D. Hunt & J. Machon.** 1990. Morphology, anatomy and biology of plant parasitic nematodes - a Synopsis. In: Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture. (M. Luc, R. Sikora and J. Bridge, eds.). CAB International. London. Pp. 1-44.
- Marín D.** 1997. Rotación de cultivos: Una opción para el manejo de nematodos fitoparásitos en la renovación de plantaciones bananeras. *CORBANA* 22 (48): 107-111.
- Merchán V. V. M.** 1996. Prevención y manejo de la Sigatoka negra. ICA. Manizales. Pp 1-14.
- Meredith J.** 1973. Algunos métodos de campo y laboratorio para trabajar con nematodos. Maracaibo, Venezuela. 44 pp.

- Montiel C., L. Sosa, C. Medrano & D. Romero.** 1997. Nematodos fitoparásitos en plantaciones de plátano (*Musa* AAB) de la margen izquierda del río Chana. Estado Zulia, Venezuela. Departamento Fitosanitario. Facultad de Agronomía. Universidad de Zulia. Venezuela. Pp. 245-251.
- Rodríguez J. L. & A. Rodríguez.** 2001. Aspectos socioeconómicos del cultivo del plátano en Colombia. *INFOMUSA* **10** (1): 4-9.
- Roman J.** 1978. Fitonematología tropical. Colegio de Ciencias Agrícolas. Universidad de Puerto Rico. 256 pp.
- Salazar H. & S. Duque.** 1994. Manejo cultural y químico de la Pudrición acuosa del pseudotallo (*Erwinia chrysantemi* pv *paradisiaca*) en *Musa* sp. *Fitopatología Colombiana* **18** (1): 20-35.
- Taylor A.** 1968. Introducción a la nematología vegetal aplicada. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Guía de la FAO para el Estudio y Combate de los Nematodos Parásitos de las Plantas. 131 pp.
- Thorne G.** 1961. Principles of nematology. USA. McGraw-Hill- Book Company. 547 pp. www.corpoica.org.co, 2000. www.fhia.hn/banano.htm, 1998

