

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

LA ACADEMIA ES ORGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXII

SEPTIEMBRE DE 1998

NUMERO 84

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DIAZ-PIEDRAHITA



CONTENIDO - CONTENTS

Botánica (Botany)	Pág.	El Postulado de las Paraletas (The parallel postulate). <i>Luis Moreno Armella</i>	393
La familia Phakopsoraceae en el Neotrópico - II. Géneros <i>Arthuria</i> , <i>Nothoravenelia</i> , <i>Uredopeltis</i> , <i>Kwelingia</i> , <i>Aplopsora</i> y <i>Pucciniostele</i> . (The family Phakopsoraceae in the Neotropics - II. Genera <i>Arthuria</i> , <i>Nothoravenelia</i> , <i>Uredopeltis</i> , <i>Kwelingia</i> , <i>Aplopsora</i> and <i>Pucciniostele</i>). <i>Pablo Buriticá C.</i>	325	Zoología (Zoology) Utilización de las mariposas como bioindicadores del tipo de hábitat y su biodiversidad en Colombia. (Butterflies as bioindicators of habitat type and biodiversity in Colombia). <i>M. Gonzalo Andrade</i>	407
Especies nuevas de <i>Guarea</i> y <i>Trichilia</i> (Meliaceae) en Colombia. (New species of <i>Guarea</i> and <i>Trichilia</i> [Meliaceae] in Colombia). <i>María Eugenia Morales-Puentes</i>	335	Una nueva especie de <i>Colostethus</i> del grupo <i>Edwardsi</i> de Colombia. (A new species of <i>Colostethus</i> group <i>Edwardsi</i> from Colombia). <i>Taran Grant</i>	423
Registros nuevos para la flora de uredinales (royas) de Colombia. (New records for the Colombian uredinal flora [Rust fungi]). <i>Victor Manuel Pardo-Cardona</i>	347	A new frog [Genus <i>Eleutherodactylus</i>] from Cloud Forests of Southern Boyaca. (Una nueva especie de rana del género <i>Eleutherodactylus</i> de los bosques nublados del sureste de Boyacá). <i>John D. Lynch</i>	429
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences). Una caldera volcánica en el macizo de Santander, Colombia. (A volcanic crater in the Santander Massiff, Colombia). <i>Jaime Galvis-Vergara</i>	355	First osteological record of the Dwarf sperm whale in Colombia, with notes on the zoogeography of <i>Kogia</i> in South America. (Primer registro osteológico del cachalote enano en Colombia, con notas sobre la zoogeografía de <i>Kogia</i> en Sur América). <i>M. Muñoz-Hincapié, D. Mora-Pinto, D. M. Palacios,</i> <i>E. Secchi & A. Mignucci-Giannoni</i>	433
Física (Physics) Optica Atómica ¿La óptica del año 2000? (Atom optics ¿The optics of 21 st century?). <i>Angela M. Guzmán</i>	363	Notas (Notes) Reconstrucción <i>in vitro</i> de epitelio corneal en matrices de colágeno. (Reconstruction of the corneal epithelium in collagen matrices <i>in vitro</i>). <i>M.Y. Avila, J. R. Barrero, G. Romero de Pérez & A. Iglesias</i>	445
Historia y Filosofía de la Ciencia (History and Phylosophy of Science). Sobre la teoría cuántica de las moléculas (About Quantum Theory of molecules). <i>M. Born & R. Oppenheimer. Versión castellana de A. Poveda,</i> <i>J.L. Villaveces & G.E. Moyano</i>	375	Vida Académica (Academic Life)	451
		Constitución de la Academia (Members of the Academy)	465

LA FAMILIA PHAKOPSORACEAE EN EL NEOTROPICO - II.

Géneros: ARTHURIA, NOTHORAVENELIA, UREDOPELTIS, KWEILINGIA,
APLOPSORA y PUCCINIOSTELE.

por

Pablo Buriticá C.*

Resumen

Buriticá, P.: La familia Phakopsoraceae en el neotrópico - II. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 22(84): 325-334. 1998. ISSN 0370-3908.

Se citan y describen todas las especies neotropicales de los géneros: *Arthuria*, *Nothoravenelia*, *Uredopeltis*, *Kweilingia*, *Aplopsora* y *Pucciniostele*. Se delimita y precisa el concepto de estos géneros, incluidas varias nuevas para la ciencia.

Palabras claves: Uredinales, Royas, Phakopsoraceae, Neotrópico.

Abstract

Neotropical species of: *Arthuria*, *Nothoravenelia*, *Uredopeltis*, *Kweilingia*, *Aplopsora* and *Pucciniostele*, are cited and described. Generic concept is precised and delimited, some new species are described.

Key words: Uredinales, Rusts, Phakopsoraceae, Neotropics.

Introducción

Los estudios sistemáticos de la flora de Uredinales del Neotrópico, han tenido como base y se han limitado, a un número reducido de especímenes recolectados durante viajes esporádicos, hechos por botánicos o micólogos taxónomos, visitantes u ocasionales; el registro de las especies se ha divulgado a través de estudios de

ámbito regional (países), de acuerdo con el interes particular de cada investigador, o mediante revisiones que tratan en detalle pequeños grupos o géneros que incluyen especies tropicales.

En los últimos años los estudiosos de los Uredinales han realizado nuevas colecciones con énfasis en la región neotropical, tanto en las áreas previamente exploradas como en nuevas áreas. Los principales estudios relativos al análisis global de la población de uredinales en cada país han tenido como base colecciones intensivas realizadas en: en Mexico por Cummins, Hennen, Buriticá,

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

Carrión y otros; en Centro América, por McCain, Hennen y otros; en Cuba, por Urban y otros; en Colombia, por Buriticá y Pardo-Cardona; en Ecuador, por Buriticá y otros; en Peru, por Buriticá y otros; en Brasil, por Hennen, Figueiredo, Albuquerque, Dianese, Medeiros y otros; en Argentina, por Lindquist (q.e.p.d.) y otros; y en Chile, por Oëhrens y otros. Además, y con el liderazgo de J.F. Hennen, en el Arthur Herbarium (PUR), se han iniciado la revisión de grupos (familias, subfamilias y géneros) que incluyen, especialmente especies tropicales. Lo anterior ha permitido comenzar a delimitar rangos, mejorar los niveles de las categorías superiores al género y conocer en mejor forma cada una de las especies, particularmente de aquellas que tan solo se conocían a través de una única colección.

Dentro de los géneros de mayor importancia tropical está *Phakopsora*, que es la base de la familia Phakopsoraceae. Este género y sus afines, han representado verdaderas incógnitas, pues sus estados teleomórficos no han sido colectado con la frecuencia debida, su relación con otros grupos no ha sido estudiada y su composición morfológica y variación específica, no han sido interpretada en toda su profundidad y significado. No existen estudios de conjunto para el grupo. Gracias a que son varias las especies que tienen un gran valor fitopatológico y merced a las nuevas colecciones, ha sido posible contar con un buen número de especímenes con teleomórfos, lo que ha permitido ensamblar un estudio que antes que considerarse completo, se debe interpretar como el punto de partida, para la clarificación de especies y del conjunto como un todo. La primera publicación de esta serie relativa a la familia Phakopsoraceae incluyó la definición de anamórfos y teliomórfos. A esta segunda entrega seguirán otras dos para un total de cuatro.

Géneros estudiados

1. **ARTHURIA** Jackson, Mycologia 23: 463. 1.931.

Especie tipo: *Arthuria catenulata* Jackson & Holway, *En: Jackson, Mycologia 23: 464. 1.931.*

Tipo: sobre *Croton sp.* (Euphorbiaceae), BRASIL: Rio de Janeiro, Paineiros, 17 Agos. 1.921, E.W.D. & M.M. Holway 1.046.

Anamórfo: *Aeciure crotonis* (Hennings) Buriticá & Hennen, *Rev. Acad. Colombiana Cienc. 19(72): 49. 1.994.*
= *Uredo crotonis* Hennings, *Hedwigia 34: 99. 1.895.*

Espermogonio en el grupo VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1.980). Anamórfo en *Aeciure* Buriticá & Hennen.

Teliosoro subepidermal en origen, erumpente, ruptura de la epidermis evidente, de cupular a filiforme; teliosporos unicelulares, en cadenas unidas lateralmente; pared hialina. Germinación sin reposo; metabasidio externo.

Distribución. Exclusivamente tropical; sobre especies de las subclases Rosidae y Asteridae.

Ciclo de vida. Completamente expandido ó parcialmente reducido. Especies eminentemente autoicas isomórficas. Anamórfos del género *Aeciure*, asociados con espermogonio del mismo tipo que los asociados con el teliomórfo.

Clave para las especies neotropicales de *Arthuria*.

1. Teliosoro en columnas con más de 4 esporos en cadena 2.
1. Teliosoro cupuliforme, con menos de 4 esporos en cadena 3.
 2. Esporos anamórficos de obovoides a elipsoides, 30-38X20-27 μm , pared 2-3 μm de grosor
..... *A. catenulata* Jackson & Holway.
 2. Esporos anamórficos de obovoides a redondeados, 28-38X22-28 μm , pared 3-5 μm
..... *A. columbiana* (Kern & Whetzel) Cummins.
 3. Soro anamórfico asociado con espermogonio, esporos redondos, 20-25X19-22 μm , pared 0.5-1 μm de grosor
..... *A. demicicla* Buriticá & Hennen.
 3. Soro anamórfico no asociado con espermogonio, esporos globoides, 25-29X23-26 μm , pared 1-1.5 μm de grosor
..... *A. micra* Buriticá & Hennen.

1.1 *Arthuria catenulata* Jackson & Holway, *En: Jackson, Mycologia 23: 464. 1.931.*

Tipo: sobre *Croton sp.* (Euphorbiaceae), BRASIL: Rio de Janeiro, Paineiros, 17 Ago. 1.921, E.W.D. & M.M. Holway 1.046.

Anamórfo: *Aeciure crotonis* (Hennings) Buriticá & Hennen, *Rev. Acad. Colombiana Cienc. 19(72): 49. 1.994.*

= *Uredo crotonis* Hennings, *Hedwigia 34: 99. 1.895.*

Tipo: sobre *Croton sp.* (Euphorbiaceae), BRASIL: Minas Gerais, Uberaba, Jun. 1.892, E. Ule 1.922.

Espermogonio grupo VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1.980), principalmente epífilo, ocasionalmente anfigíneo,

en grupos de 3 a 8. Anamórfo en *Aeciure*, hipófilo, algunas veces asociado con espermogonio, erumpente, abierto, pulverulento, carmelito claro; esporos de obovados a elipsoides, 30-38(-40) X 20-27 µm; pared amarillenta, 1-3 µm de grosor, uniforme, equinulada; poros germinativos imperceptibles, dispersos 5-7. Teliosoro hipófilo, solitario o en pequeños grupos, ceroso, erumpente, primero ambar luego blanquecino por la germinación de los teliosporos; teliosporos producidos en sucesión, 3-5 esporos en cadena, rectangulares en el centro, esféricos hacia los lados, de claros a hialinos, 25-32 X 20-25 µm; pared hialina, 1-1.5 µm de grosor, uniforme, lisa; germinación *in situ*; metabasidio externo.

Distribución: conocido únicamente del Brasil.

Especímenes estudiados: sobre *Croton sp.*, Euphorbiaceae, BRASIL: Rio de Janeiro, Paineiros, 17 Ago. 1.921, E.W.D. & M.M. Holway 1.046 (tipo); Petropolis, 20 Oct. 1.921, E.W.D. & M.M. Holway 1.237; Minas Gerais, Uberaba, Jun. 1.892, E. Ule 1.922 (tipo *Uredo crotonis* Hennings); entre Formiga y Bambui, 15 Abr. 1.986, J.F. & M.M. Hennen B-86-193; Sao Paulo, 15 Feb. 1.922, E.W.D. & M.M. Holway 1.561; Santos, 24 Ago. 1.979, Hennen & Figueiredo 70-288; Campos de Jordao, 23 Abr. 1.922, E.W.D. & M.M. Holway 1.758; Sao Roque, 24 Jul. 1.978, Figueiredo 78-60; Cerca Campinas, 28 Jul. 1.975, Hennen & Figueiredo, 75-22.

1.2 *Arthuria columbiana* (Kern & Whetzel) Cummins, Bull. Torrey Bot. Club 20: 519. 1.943.

= *Phakopsora columbiana* Kern & Whetzel, J. Dept. Agric. Puerto Rico 14: 304. 1.930.

Tipo: sobre *Croton gossypifolius* Vahl. (Euphorbiaceae), COLOMBIA: Tolima, Ibagué, 20 Jun. 1.929, C.E. Chardón 555.

Anamórfo: *Aeciure columbiana* Buriticá, *En*: Buriticá & Pardo-Cardona, Rev. Acad. Colombiana Cienc. 20(77): 203. 1.996.

Tipo: el mismo para *Arthuria columbiana*.

Espermogonio desconocido. Anamórfo en *Aeciure*, hipófilo, erumpente, abierto, pulverulento, carmelito; esporos obovados, 28-38(-40) X 22-28(-32) µm; pared 3-5 µm de grosor, uniforme, de amarillenta a hialina, espinas ralas y prominentes; poros germinativos 5-7 dispersos, raramente visibles. Teliosoro hipófilo, solitario o en pequeños grupos, ceroso, erumpente, primero dorado luego blanquecino por la germinación de los teliosporos; teliosporos producidos en sucesión, 4-7 en cadena, de

rectangulares a oblongos, 32-42(-52) X 17-22 µm; pared hialina, menos de 1 µm de grosor, lisa; germinación *in situ*; metabasidio externo.

Distribución: en el margen Occidental de los Andes; en Ecuador, Colombia, Venezuela y Trinidad.

Especímenes estudiados: sobre *Croton gossypifolius* Vahl. (Euphorbiaceae), TRINIDAD: Lady Chancellor Rd., 18 Mar. 1.921, Seaver 3.253; 1 Abr. 1.921, Seaver 3.424; North Coast Rd., 26 Ene. 1.952, Baker; La Seiva Valley, 5 May. 1.913, Thaxter 43. COLOMBIA: Tolima, Ibagué, 20 Jun. 1.929, C.E. Chardón 555 (tipo). Sobre *Croton sp.*, VENEZUELA: Dto. Federal, Jaquara, 12 Feb. 1.939, Tamayo. ECUADOR: Tungurahua, entre Ambato y Puyo, 24 Jul. 1.975, Dumont, Carpenter & Buriticá 75-132E.

Observaciones: primer registro de este Uredinal para Ecuador y Venezuela.

1.3 *Arthuria demicicla* Buriticá & Hennen, *sp. nov.*

Tipo: sobre *Croton sp.* (Euphorbiaceae), BRASIL: Sao Paulo, Horto Forestal cerca a Campos de Jordao, 5 Nov. 1.976, J.F. & M.M. Hennen 76-561.

Anamórfo: *Aeciure demicicla* Buriticá & Hennen, *sp. anamorph. nov.*

Tipo: el mismo que para *Arthuria demicicla*.

Spermogoniis epiphyllis, aggregatis, atris, subcuticularibus, cupulatis; hymenio applanatis; caterva VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1.980). Anamorphiis in *Aeciure*, hypophyllis, solitariis, brunneis, circularis, primo subepidermale tandem erumpenti, pulverulenti; sine peridio; aparaphysatis; sporis catenulatis, cum conspicuis celulis disjunctis, globosis, flavidis, 20-25 X 19-22 µm; parieti flavido, 0.5-1.5 µm crasso, cum spinis dispersis; poro germinationis obscuro. Soros teleutosporiferis circa soros anamorphos, hypophyllis, cupuliformis, ceraceis, flavidis, rotundatis, primo subepidermalibus tandem erumpentibus; teliosporis formantis vel intra soros anamorphos vel in soros teleutosporiferos, unicelularibus, catenulatis 1-3(-4), sessilibus, hyalinis, ellipsoideis vel cuboideis, 20-30 X 16-20 µm; parieti laevo, hyalino, 0.5-2 µm apice incrassato in sporis superioribus; germinationis sine dormienti.

Espermogonio epifilo, en grupos, negros, subcuticulares, cupulados, con himenio plano; grupo VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1.980). Anamórfo en *Aeciure*, hipófilo, solitario, carmelito, redondo, subepidermal en origen finalmente erumpente, pulverulento; sin peridio, sin

parafisos; esporos producidos en cadena, con prominentes células disyuntivas, redondos, amarillentos, 20-25 X 19-22 μm ; pared amarillenta, 0.5-1.5 μm gruesa, con espinas esparcidas; poros germinativos imperceptibles. Teliosoro alrededor del anamórfo, hipófilo, cupuliforme, ceroso, amarillento, redondo, subepidermal en origen posteriormente erumpente; teliosporos formados dentro del anamórfo ó en teliosoros, unicelulares, en cadenas 1-3(-4), sesiles, hialinos, de elipsoides a cuboides, 20-30 X 16-20 μm ; pared lisa, hialina, delgada, 0.5-2 μm engrosada en el ápice del espora superior; germinación sin reposo; basidiosporos hialinos, redondos, 8-12 μm de diámetro.

Distribución: Brasil.

Especímenes estudiados: el ejemplar tipo.

Observación: especie de ciclo de vida reducido.

1.4 *Arthuria micra* Buriticá & Hennen, *sp. nov.*

Tipo: sobre *Croton sp.* (Euphorbiaceae), MEXICO: Chiapas, 56 km. al N. de la unión de las carreteras Mex. 190 y 195, al NE. de Tuxtla Gutierrez, 23 Nov. 1.974, J.F. Hennen & P. Buriticá 74-380.

Anamórfo: *Aeciure micra* Buriticá & Hennen, *sp. anamorph. nov.*

Tipo: el mismo que para *Aeciure micra*.

Spermogoniis epiphyllis, aggregatis, atris, subcuticularibus, cupulatis; hymenio appanato, caterva VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1.980). Anamorphis in *Aeciure*, hypophyllis, aggregatis, rotundatis, brunneis, pulverulentis, primo subepidermalibus tandem erumpentibus; sine peridio, aparaphysatis; sporis catenulatis, hyalinis vel brunneis, globosis, 25-29 X 23-26 μm ; parieti hyalino vel flavido, 1.2-2 μm crasso, sparse aculeato; poro germinationis obscuro. Soris teleutosporiferis hypophyllis, circa soros anamorphos, albidis, ceraceis, cupuliformibus, primo subepidermalibus, epiderme tectis tandem erumpentibus; teliosporis vel intra soros anamorphos vel soris teleutosporiferis, hyalinis, 1-3 catenulatis, sessilibus, ellipsoideis vel clavatis, 26-40 X 15-24 μm ; parieti tenui, laevo, hyalino, 4-7 μm apice incrassato in sporis superioribus; poro germinationis obscuro, germinationis sine dormientis; basidiis externis.

Espermogonios epifilos, agrupados, negros, subcuticulares, cupulados; himenio plano; grupo VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1.980). Anamórfo en *Aeciure*, hipófilo, agrupados, redondo, carmelito, pulverulento, subepider-

mal en origen posteriormente erumpente; sin peridio; aparafisado; esporos producidos en cadenas con evidentes células disyuntivas, de hialinos a carmelitos, redondos, 25-29 X 23-26 μm ; pared de hialina a amarillenta, 1.2-2 μm gruesa, con espinas esparcidas; poros germinativos imperceptibles. Teliosoro hipófilo, alrededor del anamórfo, blanquecino, ceroso, cupuliforme, subepidermal en origen, cubiertos por la epidermis y posteriormente erumpentes; teliosporos producidos dentro del anamórfo ó formando teliosoros, hialinos, 1-3 en cadena, sesiles, ellipsoides, clavados, 26-40 X 15-24 μm ; pared lisa, hialina, 4-7 μm engrosada en los esporos superiores; poros germinativos oscuros; germinación sin reposo; metabasidio externo.

Distribución: Mexico.

Especímenes estudiados: sobre *Croton sp.* (Euphorbiaceae), MEXICO: Chiapas, sobre Mex. 190, 56 km. al N. de la unión de las carreteras Mex. 190 y 195, al N-E de Tuxtla Gutierrez, 23 Nov. 1.974, J.F. Hennen & P. Buriticá 74-380 (tipo); San Luis Potosí, 55 kms. N-O de Tamazunchale, 24 Nov. 1.967, J.F. Hennen 67-283.

Observaciones: esta especie es el primer registro del género para México y marca el rango de distribución, más hacia el Norte del mismo.

2. *NOTHORAVENELIA* Dietel, Ann. Mycol. 8: 310. 1.910.

Especie tipo: *Nothoravenelia japonica* Dietel, Ann. Mycol. 8: 310. 1.910.

Tipo: sobre *Securinega fluggeoides* Mueller (Euphorbiaceae), JAPON: Tosa, Kada, 21 Nov. 1.909, T. Yoshinaga.

Anamórfos: I. *Caeoma securinegae* Buriticá & Hennen, Rev. Acad. Colombiana Cienc. 19 (72): 55. 1.994.

Tipo: no designado.

II. *Physopella securinegae* Buriticá & Hennen, Rev. Acad. Colombiana Cienc. 19(72): 55. 1.994.

Tipo: el mismo que para *Nothoravenelia japonica* Dietel.

Espermogonio grupo VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1.980). Anamórfos en *Caeoma* Link y *Physopella* Arthur. Teliosoro subepidermal, erumpente, ruptura de la epidermis evidente, cupular; teliosporos en cadenas de 1-3, unidos lateralmente, formando una cúpula compacta,

unicelulares, célula basal hialina. Germinación después del reposo; metabasidio externo.

Distribución: especies en el Pantrópico y en zona templada. Sobre especies de las subclases Dileniidae y Rosidae.

Ciclo de vida: Completamente expandido. Especies autóicas-dimórficas.

Observaciones: no se conocen especies en el Neotrópico. Dos son asignadas al género: una en el Japón y otra en Africa.

3. **UREDOPELTIS** Hennings, Ann. Mus. Congo Belga 2: 223. 1.908.

Especie tipo: *Uredopeltis congensis* Hennings, Ann. Mus. Congo Belga 2: 223. 1.908.

Tipo: sobre *Markhamia* sp. (Bignoniaceae), CONGO: Dembo, Ago, 1.906, H. Vanderyst.

Anamórfo: *Malupa markhamiae* (Viennot-Bourgin) Buriticá & Hennen, Rev. Acad. Colombiana Cienc. 19(72): 56. 1.994.

= *Uredo markhamiae* Viennot-Bourgin, Bull. Soc. Mycol. Francia 67: 434. 1.952.

Tipo: sobre *Markhamia lutea* Schumann (Bignoniaceae), COSTA DE MARFIL: Rocher de Seguela, 21 km. E. de Seguela, Sep. 1.951, G. Viennot-Bourgin.

Espermogonio desconocido. Anamórfo en *Malupa* Ono, Buriticá & Hennen y *Physopella* Arthur. Teliosoro subepidermal en origen, compuesto por una masa de teliosporos unidos irregularmente, en el exterior del tejido del hospedante; teliosporos unicelulares, sin organización definida en el teliosoro, en varias capas, pigmentados; germinación después del reposo; metabasidio externo.

Distribución: especies eminentemente tropicales, en Asia, Africa y América. Sobre especies de las subclases Dileniidae, Rosidae y Asteridae.

Ciclo de vida: desconocido. Especies autóicas.

Clave para las especies neotropicales:

1. Anamórfo en *Physopella*, teliosporos redondeados, sobre *Guettarda* spp. *Uredopeltis guettardae* Buriticá & Hennen.

1. Anamórfo no formado. Teliosporos angulares, sobre *Croton*. *Uredopeltis dominicana* (Kern) Buriticá & Hennen.

3.1 **Uredopeltis guettardae** Buriticá & Hennen, sp. nov.

Tipo: sobre *Guettarda viburnoides* Chamisso & Schlechter, (Rubiaceae), BRASIL: Goias, 18 kms. SW. de Jatai, Hwy 364, 18 Jul. 1.988, J.F. & M.M. Hennen & R.M. Lopez-Franco 88-574.

Anamórfo: *Physopella guettardae* Buriticá & Hennen, sp. anamorph. nov.

Tipo: el mismo que para *Uredopeltis guettardae*.

Spermogoniis adhuc ignotis. Anamorphiis hypophylliis, dispersis in maculis foliosiis, rotundatis, brunneis, primo subepidermalibus tandem erumpentis; hymenio subepidermalibus, applanato; paraphysibus peripheralis tenuis curvatis, 29-34 X 6-8 μ m; pariete hyalina vel flavidi, incrassata irregulariformis, usque 1-3 μ m; sporiis reniformis, 19-24 X 16-28 μ m; pariete tenuis, 1 μ m crassa, aequaliter, flavidis, minute aculeato; poris germinationis obscuris. Soris teleutosporiferis non visi. Teliosporiis in soris anamorphis, in massa rotundatis, numerosissimus, dispositis irregularibus, 150-200 μ m in diam.; teliosporiis flavidis, obovoideis vel ellipsoideis, 20-25 X 13-15 μ m; pariete flavida, incrassato usque 2-4 μ m.

Espermogonio desconocido. Anamórfo en *Physopella*, hipófilo, dispersos en manchas definidas en las hojas, redondo, carmelito, subepidermal en origen, posteriormente erumpente; himenio subepidermal, plano; parafisos periferales levemente curvados, 29-34 X 6-8 μ m; pared de hialina a amarillenta, irregularmente engrosada, hasta 1-3 μ m; esporos erifionados, 19-24 X 16-18 μ m; pared delgada, 1 μ m gruesa, uniforme, amarillenta, finamente equinulada; poros germinativos imperceptibles, probablemente en el lado cóncavo. Teliosoro no visto. Teliosporos en el soro anamórfico, en masas redondas, conteniendo numerosos teliosporos sueltos, sin un arreglo definido, 150-200 μ m a través; teliosporos amarillentos, de obovoides a elipsoides, 20-25 X 13-15 μ m; pared amarillenta, engrosada en el ápice hasta 2-4 μ m; poro germinativo no visible.

Distribución: Sur Oriente Brasileño.

Especímenes estudiados: sobre Rubiaceae; *Guettarda viburnoides* Chamisso & Schlechter, BRASIL: Goias, 18 kms. S-O de Jatai, carretera 364, 18 Jul. 1.988, J.F. & M.M. Hennen & Lopez-Franco 88-574 (tipo); 88-577; Sao Paulo, ca. 11 kms. S. de Guara via Anhanguera, 11 Jul. 1.983, J.F. & M.M. Hennen & Adell 83-585.

Observaciones: especie bien característica por la formación de masas redondas de teliosporos que

sobresalen de la superficie del hospedante. Los teliosporos parecen estar en una matriz gelatinosa.

3.2 *Uredopeltis dominicana* (Kern) Buriticá & Hennen, *comb. nov.*

= *Phakopsora dominicana* Kern, *Mycologia* 20: 63. 1.928.

Tipo: sobre *Croton angustatus* Urban (Euphorbiaceae), REPUBLICA DOMINICANA: Santiago, San José de las Matas, 8 May. 1.927, C.E. Chardón, 397.

= *Baeodromus dominicana* (Kern) Thirumalachar & Kern, *Mycologia* 41: 284. 1.949.

Anamórfo: no se forma.

Espermogonio y anamórfos desconocidos. Teliosoro hipófilo, de carmelito a negruzco, costriforme, subepidermal, erumpente, coalescentes, con más de 10 capas de esporos; himenio subepidermal, de plano a tenuemente cóncavo; teliosporos más ó menos uno debajo del otro, no en cadenas, algunas veces apareciendo como ramificados, sueltos ó adheridos verticalmente en grupos de 1-3, de elipsoides a cúbicos, 18-32 X 13-18 μm ; pared lisa, café claro, 2-3 μm gruesa, uniforme, poros germinativos imperceptibles.

Distribución: Antillas y Mexico.

Especímenes estudiados: sobre Euphorbiaceae, *Croton angustatus* Urban, REPUBLICA DOMINICANA: Santiago, San José de las Matas, 8 May. 1.927, C.E. Chardón 397 (tipo); sobre *Croton ciliato-glandulosum* Ortega, MEXICO: Tamaulipas, 16 millas S. de Victoria, 6 Nov. 1.974, J.F. Hennen & P. Buriticá 74-79; Nuevo León, S. de Monterrey, en la vía a Laguna de Sánchez, 23 Sep. 1.967, J.F. Hennen 67-22.

4. **KWEILINGIA** Teng, *Sinensia* 11: 124. 1.940.

Especie tipo: *Kweilingia bambusae* (Teng) Teng. *l.c.*

= *Chrysomyxa bambusae* Teng, *Sinensia* 9: 226. 1.938.

Tipo: sobre bambú (Bambusoideae), CHINA: Kwangsi, Yangso, 24 Mar. 1.938, S.C. & K.L. Teng 3.236.

Anamórfo: no conocido.

= *DASTURELLA* Mundkur & Kheswalla, *Mycologia* 35: 202. 1.943.

Especie tipo: *Kweilingia divina* (Sydow) Buriticá, *comb. nov.*

= *Angiopsora divina* Sydow, *Ann. Mycol.* 34: 71. 1.936.

Tipo: sobre *Bambusa sp.* (Bambusoideae), INDIA: Majhawan, 5 Ene. 1.935, R.N. Tandon 188.

= *Dasturella divina* (Sydow) Mundkur & Kheswalla, *l.c.*

Anamórfo: *Physopella inflexa* (Ito) Buriticá & Hennen, *Rev. Acad. Colombiana Cienc.* 19(72): 56. 1.994.

= *Uredo inflexa* Ito, *J. Agr. Coll. Tohoku Imp. Univ.* 3: 247. 1.909.

Tipo: sobre *Sassa sp.* (Bambusoideae), TAIWAN (como Formosa): Daihoku, R. Susuki.

= *TUNICOPSORA* Singh & Pandey, *Trans. Br. Mycol. Soc.* 56: 301. 1.971.

Especie tipo: *Kweilingia bagchii* (Singh & Pandey) Buriticá, *comb. nov.*

= *Tunicopsora bagchii* Singh & Pandey, *l.c.*

Tipo: sobre *Dendrocalamus strictus* Nees (Bambusoideae) INDIA: Dehra Dun (Uttar Pradesh), New Forest, Jul. 1.962, B.K. Bakshi.

Anamórfo: *Physopella bagchii* Buriticá & Hennen, *Rev. Acad. Colombiana Cienc.* 19(72): 56. 1.994.

Tipo: el mismo que para *Tunicopsora bagchii*.

Espermogonio en el grupo VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1.980). Anamórfos en *Aecidium* Persoon y *Physopella* Arthur. Teliosoro subepidermal, erumpente, ruptura de la epidermis evidente, costriforme, varias capas de esporos, coalescentes; teliosporos uniceldados, en cadenas, unidos lateralmente y terminalmente, pigmentados; poros germinativos imperceptibles; metabasidio externo.

Distribución: especies subtropicales y tropicales, en Suramérica y Asia. Restringido a Monocotiledoneas, especialmente Poaceae y Costaceae.

Ciclo de vida: solo conocido en una especie, siendo completamente expandido, heteróica-dimórfica.

Observaciones: el análisis en conjunto de la familia Phakopsoraceae, muestra que las características usadas previamente para separar *Dasturella* y *Tunicopsora* de

Kweilingia, no se justifican. El teliosoro erumpente y costriforme con teliosporos en cadenas con diferente grado de unión lateral, son las características básicas del género. Si los soros son coalescentes (para formar una felpa) ó no, y sí los anamórfos son parafisados, son características específicas y no de valor crítico para separar géneros, al menos con el conocimiento actual de cada uno de ellos.

Con la especie aquí presentada se amplía el rango del género a el Neotrópico y el rango de hospedantes, manteniéndose todas las especies dentro de la clase Liliopsida.

4.1 *Kweilingia americana* Buriticá & Hennen, *sp. nov.*

Tipo: sobre *Costus pictus* Don (Costaceae), MEXICO: Chiapas, 134. km. al sur de Tonalá en la carretera Mex. 200, 19 Nov. 1.974, J.F. Hennen & P. Buriticá 74-304.

Anamórfo: *Physopella americana* Buriticá & Hennen, *sp. nov.*

Tipo: el mismo que para *Kweilingia americana*.

Spermogoniis adhuc ignotis. *Physopella* soris hypophyllis, in maculis rotundatis 0.5-1 mm. diam., aggregatis, rotundatis, 0.05-0.25 mm. diam., albidis vel flavidis, primo subepidermalibus tandem erumpentibus; paraphysibus peripheralibus et in hymenio, libere, flexuosis, hyalinis, 20-35 X 8-10 μ m; pariete levo, hyalino, aequaliter tenui; *Physopella* sporis sessilibus, incoloris vel flavidis, ellipsoideis, globosis, 21-27 X 17-20 μ m; pariete hyalino, 0.5 μ m aequaliter crasso, dense et minute aculeatis; poris germinationis obscuris. Soris teleutosporiferis in maculis rotundatis, 0.5-1.5 mm diam., aggregatis, rotundatis, crustiformibus, flavidis vel brunneis, ceraceis, primo subepidermalibus tandem erumpentibus; teliosporis 2-4 catenulatis, suntentis ad hyphos protrudentes sporogenos, globosis, hyalinis, 12-18 X 11-15 μ m; parieti hyalino, aequaliter tenui.

Espermogonios desconocidos. Soro de *Physopella* hipófilo, en manchas redondas 0.5-1 mm diam., agrupados, redondos, pequeños 0.05-0.25 mm. diam., de blanquecino a amarillento, subepidermal en origen, erumpente con ruptura de la epidermis evidente; parafisos periferales y en el himenio presentes, libres, flexuosos, hialinos, 20-35 X 8-10 μ m; pared lisa, hialina, delgada, uniforme; esporos sesiles, incoloros o amarillentos, elipsoides, obovoides, redondos, 21-27 X 17-20 μ m; pared hialina, 0.5 μ m grosor, uniforme, con abundantes y pequeñas espinas; poros germinativos no vistos. Teliosoros hipófilos, en manchas redondas, 0.5-1.5 mm.

diam., agrupados, redondos, costriformes, amarillentos o carmelitos, cerosos, subepidermales en origen, posteriormente erumpentes; teliosporos en cadenas cortas, de 2-4 esporos, levantados por hifas esporógenas que salen del tejido del hospedante, redondos, hialinos, 12-18 X 11-15 μ m; pared hialina, delgada, uniforme.

Distribución: México, conocido solo el tipo.

Especímenes estudiados: el tipo.

Observaciones: esta es la primera especie del género, registrada para el Neotrópico. El tipo de hospedante (Liliopsida), la morfología del anamórfo (*Physopella*) y las características del teliomórfo, nos dan confianza para asignarla a *Kweilingia*. Las demás especies se encuentran en Asia sobre bambus.

5. *APLOPSORA* Mains, Amer. J. Bot. 8: 442. 1.921.

Especie tipo: *Aplopsora nyssae* Mains, *l.c.*

Tipo: sobre *Nyssa aquatica* Linneo (Nyssaceae), ESTADOS UNIDOS: Mississippi, Jackson, 12 Nov. 1.888, S.M. Tracy 1.200.

Anamórfo: *Physopella nyssae* (Ellis & Tracy) Buriticá & Hennen, Rev. Acad. Colombiana Cienc. 19(72): 57. 1.994.

= *Uredo nyssae* Ellis & Tracy, J. Mycol. 6: 77. 1.890.

Tipo: el mismo que para *Aplopsora nyssae*.

Espermogonio grupo VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1.980). Anamórfos en *Aecidium* Persoon; *Macabuna* Buriticá & Hennen y *Physopella* Arthur. Teliosoro subepidermal en origen, cubierto por la epidermis, compuesto de una hilera de teliosporos, que presentan 2-3 en cadena hacia el centro; teliosporos unicelulares, de pared delgada; germinación sin reposo; metabasidio externo.

Distribución: Asia, Norte y Sur América. Sobre especies de las subclases Magnoliidae, Hamamelidae, Rosidae y Asteridae.

Ciclo de vida: completamente expandido; heteróico-dimórfico, en la única especie en donde se conoce.

Observaciones: con la descripción dada, se amplía el concepto del género, para dar cabida a las especies que presentan una sola capa de esporos en el teliosoro; pero, con la tendencia a formar cadenas de 2-3 hacia el centro ó una vez van creciendo. Se incluyen tres especies típicas del clima templado septentrional, ya que su rango alcanza a llegar a los límites del trópico de Cáncer.

Algunas características de este género muestran gran afinidad con las básicas correspondientes a la familia Chaconiaceae Cummins & Hiratsuka. Factor que se hace evidente con mayor intensidad, en las especies típicamente tropicales.

Clave para las especies americanas.

1. Parafisos en *Physopella* de pared delgada 2.
1. Parafisos en *Physopella* de pared engrosada 3.
2. Teliosporos oblongos, 16-22 X 9-11 μm ; sobre *Amphicarpa* spp., Leguminosae
.. *Aplopsora tanakae* (Ito) Buriticá & Hennen.
2. Teliosporos clavados, 29-42 X 10-21 μm , sobre *Laportea* spp. Urticaceae
Aplopsora dicentrae (Mains & Anderson) Buriticá & Hennen.
3. Esporos de *Physopella* reniformes.
..... *Aplopsora qualeae* Buriticá & Hennen.
3. Esporos de *Physopella* de redondos a obovoides
Aplopsora nyssae Mains.

5.1 *Aplopsora qualeae* Buriticá & Hennen, sp. nov.

Tipo: sobre *Qualea* sp. (Vochysiaceae), BRASIL: Sao Paulo, Mogi-Mirim, Horto Forestal, 16 Sep. 1.976, J.F. Hennen & M.B. Figueiredo 76-390.

Anamórfo: *Macabuna qualeae* Buriticá & Hennen, sp. anamorph. nov.

Tipo: el mismo que para el teliomórfo.

Spermogoniis adhuc ignotis. Anamorphiis in *Macabuna*, hypophyllis, in grandis maculis foliicolis, sparsis vel 2-5 aggregatis, brunneis, primo subepidermalibus tandem erumpentibus, pulverulentibus; paraphysibus periphericis, liberis, curvatis, 25-36 X 6-9 μm ; pariete levi, flavido, 3-6 μm dorso et apice incrassato; sporis pedicelatis, brunneis, ellipsoideis vel reniformibus, 18-22 X 11-15 μm ; pariete tenuis 0.5-1 μm crasso, in superficie concavi minute et sparse aculeato, in convexus levis; poros germinationis 2, aequatorialibus. Soris teleutosporiferis hypophyllis, circa soros anamorphiis, rotundatis, ceraceis, hyalinis vel flavidis, uno in strato, primo epiderme tectis tandem erumpentibus; teliosporis uni latis aliis, sessilibus, ellipsoideis, 14-22 X 6-10 μm ; pariete hyalino, tenui; statis germinatibus; metabasidiis externis.

Espermogonio desconocido. Anamórfos en *Macabuna*, hipófilos, cubriendo grandes áreas de las hojas, solitarios

ó en pequeños grupos de 2 a 5, carmelitos, subepidermales en origen luego erumpentes, abiertos, pulverulentos; parafisos periferales, libres, curvados, 25-35 X 6-9 μm ; pared lisa, amarillenta, engrosada dorsal y apicalmente 3-6 μm ; esporos pedicelados, carmelitos, de elipsoides a reniformes, 18-22 X 11-15 μm ; pared delgada 0.5-1 μm de espesor, con pequeñas espinas dispersas en el lado convexo y lisas en el lado cóncavo; dos (?) poros germinativos, subequatoriales. Teliosoros hipófilos, alrededor de los anamórfos, redondos, cerosos, de hialinos a amarillentos, compuestos de una capa de esporos, 1-2 en cadena hacia el centro, inicialmente cubiertos por la epidermis y posteriormente expuestos, teliosporos uno al lado del otro, sesiles, elipsoides, 14-22 X 6-10 μm ; pared hialina, delgada; normalmente germinando; metabasidio externo.

Distribución: Brasil.

Especímenes estudiados: sobre Vochysiaceae, *Qualea* sp., BRASIL: Distrito Federal, Parque Nacional, 5 Ago. 1.976, J.F. Hennen & Y. Ono 76-273; Goias, carretera 153 entre Rialma y Rianópolis, 15 Jul. 1.979, J.F. & M.M. Hennen 79-180; Minas Gerais, en carretera 452, 71 kms. al N.O. de Araxá, 9 Oct. 1.976, J.F. & M.M. Hennen 76-444; Sao Paulo, Mogi Mirim, Horto Forestal, 16 Sep. 1.976, J.F. Hennen & M.B. Figueiredo 76-390 (tipo); 76-392; 79-216; Mogy das Cruces, 4 Jul. 1.922, E.W.D. & M.M. Holway 1.999.

Observaciones: especie fácilmente separable de las demás por los esporos anamórficos reniformes. Primer Uredinal conocido sobre esta familia hospedante.

5.2 *Aplopsora tanakae* (Ito) Buriticá & Hennen, comb. nov.

= *Cerotelium tanakae* Ito, En: Ito & Homma, Trans. Sapporo Nat. Hist. Soc. 15: 118. 1.938.

Tipo: sobre *Amphicarpa edgworthii* Benth var. *japonica* Oliver (Leguminosae), JAPON: Hokkaido, Sapporo, Maruyama, 5 Oct. 1.926, T. Tanaka.

Anamórfo: *Physopella tanakae* Ono, Buriticá & Hennen, Mycol. Res. 96(10): 846. 1.992.

Tipo: el mismo que para el teliomórfo.

Espermogonios desconocidos. Anamórfo en *Physopella*, hipófilo, redondo, pequeño, dispersos ó en pequeños grupos; parafisos de cilíndricos a clavados, 20-40 X 6-12 μm ; pared amarillenta, uniformemente delgada, ocasionalmente engrosada (3 μm) en el ápice; esporos de globosos a elipsoides, 16-24 X 15-19 μm ; pared uniforme,

1-1.5 μm gruesa, hialina, con abundantes y pequeñas espinas; 8-10 poros germinativos, dispersos. Teliosoro hipófilo, pequeño, dispersos ó en grupos, alrededor del anamórfo, color ambar, subepidermal, cubierto por la epidermis; teliosporos unicelulares, formando capas de 1-2(-3) esporos hacia el centro del soro, de oblongos a cilíndricos, 16-32 X 7-12 μm ; pared uniformemente delgada (1 μm), hialina; germinación sin reposo.

Distribución: Japón y Estados Unidos.

Especímenes estudiados: sobre Leguminosae, *Amphicarpa edgworthii* Benth. var. *japonica* Oliver, JAPON: Hokkaido, Sapporo, Maruyama, 5 Oct. 1926, Tanaka (tipo); Yubari-Gun, Kuriyama, 1 Sep. 1969, Hiratsuka & Sato. Sobre *Amphicarpa bracteata* (Linneo) Fernald, ESTADOS UNIDOS: Indiana, Brown Co., State Park, cerca a Martin Lodge, 23 Ago. 1958, Cummins; 16 Oct. 1958, Cummins; 7 Jul. 1959, Cummins; 15 Sep. 1959, Cummins, Hiratsuka & Liu; Sep. 1982, J.F. & M.M. Hennen & P. Buriticá.

Observaciones: resulta curiosa la distribución geográfica de esta especie, pues solo ha sido colectada en dos distantes Continentes. Es de sospechar que nuevos estudios, con equipos adecuados de laboratorio y criterios de análisis mas profundos, darán luces y confirmarán la errática distribución geográfica, de esta especie.

5.3 *Aplopsora dicentrae* (Mains & Anderson) Buriticá & Hennen, *comb. nov.*

= *Cerotelium dicentrae* Mains & Anderson, Amer. J. Bot. 8: 445-446. 1921.

Tipo: sobre *Laportea canadiensis* (Linneo) Weddell (Urticaceae), ESTADOS UNIDOS: Illinois, Urbana, 19 Ago. 1919, H.W. Anderson.

Anamórfo: *I. Aecidium dicentrae* Trelease, Trans. Wis. Acad. Sci. 6: 136. 1884.

Tipo: sobre *Dicentra cucullaria* (Linneo) Bernhardt (Fumariaceae), ESTADOS UNIDOS: Wisconsin, Jun. 1884, L.H. Pammel.

II. *Physopella dicentrae* Buriticá & Hennen, *nom. anamorph. nov.*

Tipo: el mismo que para el teliomórfo.

Espermogonio hipófilo, disperso, carmelito, subcuticular; himenio plano; crecimiento determinado; grupo VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1980). Anamórfo asociado con espermogonio en *Aecidium*, dispersos en toda la hoja,

amarillo, cupuliforme; peridio blanco, recurvado; células peridiales de poligonales a romboideas, 24-35 X 15-22 μm ; pared exterior fuertemente estriada, 7-9 μm gruesa; pared interior finamente verrucosa, 3-5 μm de gruesa; esporos catenulados, de incoloros a amarillo pálido, de globoides a elipsoides, 16-20 X 15-18 μm ; pared amarillenta, 0.5-1 μm de gruesa, irregularmente engrosada, finamente verrucosa. Soro anamórfico en *Physopella* hipófilo, de amarillento a carmelito, disperso ó en pequeños grupos, inicialmente abierto por un poro, posteriormente completamente abierto, subepidermal; himenio subepidermal, plano; parafisos periferales provenientes de tejido hifoide, hialinos, cilíndricos, suavemente curvados, 20-40 X 7-9 μm ; pared hialina, uniforme; esporos sesiles ó con remanentes de células disyuntoras, de incoloros a pálidos, de obovoides a elipsoides, 23-28 X 17-21 μm ; pared hialina, 1-2 μm de gruesa, uniforme, con pequeñas y abundantes espinas; poros germinativos imperceptibles. Teliosoro hipófilo, cerca al anamórfo, ambar, cupular, crecimiento indeterminado, subepidermal, cubierto por la epidermis; himenio subepidermal, plano; teliosporos unicelulares, unidos lateralmente, en una capa con 1-3 esporos en cadena hacia el centro, hialinos, de romboideas a elipsoides, 25-40 X 9-21 μm ; pared hialina, delgada, uniforme, ocasionalmente 1-3 μm en el ápice. Germinación sin reposo.

Distribución: Noreste de los Estados Unidos y Sureste de Canadá.

Especímenes estudiados: sobre Fumariaceae; *Dicentra cucullaria* (Linneo) Bernhardt, CANADA: Quebec, Ursule, 25 May. 1933, Pinurleau. ESTADOS UNIDOS: Distric Columbia, Rock Creek Park, 25 Abr. 1922, Bain & Diehl; Illinois, Urbana, 4 May. 1921, Anderson; 18 May. 1919, Anderson; Indiana, Carroll, Lockport, 20 May. 1923, Deam 38.357; Jay, Pennville, 7 May. 1924, Deam 40.080A; Iowa, Iowa City, 7 May. 1887, MacBride; Decorah, May. 1886, Holway; Kansas, Manhattan, May. 1888, Kellerman & Swingle; Topeka, 9 May. 1904, Baker; Missouri, Concordia, May., Demetrio; New Jersey, Essex, Nest Orange, 9 May. 1915, Wilson; Nebraska, 1899, Hunter; New York, New York City, 21 Abr. 1913, Fromme; Pennsylvania, Lancaster, 5 May. 1900, Heller 4.972; South Dakota, Oakwood, 9 May. 1891, Wilcox; Wisconsin, Wyalusing St. Park, 12 May. 1959, Green; Madison, Jun. 1884, Pammel (tipo de *Aecidium dicentrae* Trelease). Sobre *Laportea canadiensis* (Linneo) Weddell (Urticaceae), ESTADOS UNIDOS: Illinois, Urbana, 4 May. 1921, Anderson; 19 Ago. 1919, Anderson (tipo de *Aplopsora dicentrae* (Mains & Anderson) Buriticá &

Hennen); Indiana, Tippecanoe, Stewarts Woods, Jul. 1.974, Hennen & Smith; Lafayette, 4 Oct. 1.974, Komm; Wisconsin, Denzer, 14 Jun. 1.963, Greene; Hannibal, 27 Jul. 1.920, Davis.

Observaciones: esta especie es una de las pocas que dentro dentro de la familia Phakopsoraceae, se encuentra en un rango tan al Norte y por fuera del trópico. Sobrevive al usar el heteroicismo y la infección sistémica en *Dicentra*.

5.4 *Aplopsora nyssae* Mains, Amer. J. Bot. 8: 442. 1.921.

Tipo: sobre *Nyssa* aff. *aquatica* Linneo (Nyssaceae), ESTADOS UNIDOS: Mississippi, Jackson, 12 Nov. 1.888, S.M. Tracy 1.200.

Anamórfo: *Physopella nyssae* (Ellis & Tracy) Buriticá & Hennen, *comb. anamorph. nov.*

= *Uredo nyssae* Ellis & Tracy, J. Myc. 6: 77. 1.890.

Tipo: el mismo que para el teliomórfo.

Espermogonio desconocido. Anamórfo en *Physopella*, disperso, redondo, pequeño, acanelado; himenio subepidermal, plano; parafisos periféricos clavados, incurvados, 16-26 X 10-13 μm , pared interior 1 μm gruesa, 3-4 μm en el lado exterior, amarillenta; esporos de obovoides a oblongos, 18-26 X 14-16 μm ; pared amarillenta, delgada 1 μm de gruesa, uniforme, abundantes y pequeñas espinas, poros germinativos imperceptibles. Teliosoro hipófilo, agrupado, redondo, cubierto por la epidermis, amarillento, transparente, blancuzco por la germinación; teliosporos de cilíndricos a clavados, 29-40 X 7-15 μm , en una capa unidos lateralmente, 1-2 hacia el centro; pared hialina, delgada, uniforme, lisa; germinación sin reposo.

Distribución: Sureste de los Estados Unidos.

Especímenes estudiados: sobre Nyssaceae, *Nyssa aquatica* Linneo, ESTADOS UNIDOS: Mississippi, Jackson, 12 Nov. 1.888, Tracy (Tipo); Ocean Spring, 8 Nov. 1891, Earle; Kentucky, Great Cypress Swamp, Calvert, s.d., Egleston. Sobre *Nyssa sylvatica* Marshall, ESTADOS UNIDOS: Georgia, Chattahoochie Nat. Forest, 24 Ago. 1.977, Y. Ono, J.F. & M.M. Hennen & McCain; Maryland, Herald Harbor, 29 Oct. 1.933, Stevenson; Virginia, Mt. Vernon, 10 Oct. 1933, Diehl; Texas, W. of Marshall, 30 Oct. .974, J.F. Hennen & P. Buriticá 74-12. Sobre *Camptotheca acuminata* Decaisne, ESTADOS UNIDOS: Florida, Disney World, 19 Mar. 1.971, Alfieri; 13 Abr. 1.971, Wore.

Observaciones: *Camptotheca acuminata* Decaisne es un hospedante introducido al Nuevo Mundo, y se desconocía su susceptibilidad a este Uredinal.

6. **PUCINIOSTELE** Tranzschel & Komarov, *En: Komarov, Arb. Nat.- Ges. St. Peters.* 30: 138. 1.899.

Especie tipo: *Pucciniostele mandschurica* Dietel, *Ann. Mycol.* 2: 21. 1.904.

= *Pucciniostele clarkiana* Komarov & Tranzschel, *Arb. Nat.-Ges. St. Peters.* 30: 128. 1.899.

Tipo: no designado. Dos colecciones originalmente citadas: sobre *Astilbe chinensis* Franchet & Savatier (Saxifragaceae), CHINA: en el margen de los ríos Suifun y Siao Suifun, hacia Ninguta, 12 Jun.-6 Jul. 1.896, Komarov; Mandshuria, Prov. Chirin, 18-30 Ago. 1.896, Komarov (Fungi Rossiae Exsicati 279 y 280, respectivamente).

= *KLASTOPSORA* Dietel, *Ann. Mycol.* 2: 24. 1.904.

Especie tipo: *Klastopsora komarovii* Dietel, *Ann. Mycol.* 2: 24. 1.904.

Tipo: el mismo que para la especie anterior.

= *Phragmostele* Clemens, *Genera of Fungi* p. 100. 1909.

Anamórfo: *Caeoma mandschurica* Buriticá & Hennen, *Rev. Acad. Colombiana Cienc.* 19(72): 57. 1994.

Tipo: El mismo que sea designado para el teliomórfo. Los especímenes citados tienen este estado.

Espermogonio en el grupo VI (Hiratsuka & Hiratsuka, 1980). Anamórfo en *Caeoma* Link. Teliosporos dimórficos; primarios producidos en el anamórfo, en agrupaciones como tetradas; secundarios producidos en verdaderos teliosoros alrededor del anamórfo, subepidermal, cubiertos por la epidermis; teliosporos unicelulares, formando cadenas libres lateralmente; pared gruesa, pigmentada; germinación despues del reposo.

Distribución: Asia. Sobre especies de la subclase Rosidae, Familia Saxifragaceae.

Ciclo de vida: Parcialmente reducido. Especies autóicas-isomórficas respecto al anamórfo, dimórficas respecto a los teliosporos.

Observaciones: no se han encontrado especies de este género en el Neotrópico y por la distribución de la familia del hospedante, sería raro encontrar representantes en estas latitudes.

ESPECIES NUEVAS DE *GUAREA* Y *TRICHILIA* (MELIACEAE) EN COLOMBIA

por

María Eugenia Morales-Puentes*

Resumen

Morales-P. M. E. Especies nuevas de *Guarea* y *Trichilia* (Meliaceae) en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 22 (84): 335-345. 1998. ISSN 0370-3908.

Cinco especies nuevas de Meliaceae se describen e ilustran: *Guarea lozanni*, *G. quadrangularis*, *G. penningtoniana*, *Trichilia carinata* y *T. oligofoliolata*, las dos primeras especies provienen de la región de Taraira en el Guaviare, la tercera del macizo de Chiribiquete, la cuarta y quinta son propias de la región andina en el departamento del Tolima. Todas corresponden a la "Selva Tropical Inferior".

Palabras claves: Meliaceae, *Guarea*, *Trichilia*, Taxonomía, Colombia.

Abstract

Five new species of Meliaceae, are described and illustrated: *Guarea lozanni*, *G. quadrangularis*, *G. penningtoniana*, *Trichilia carinata* and *T. oligofoliolata*. The two first species belong to the región of Taraira in the Guaviare, the third to the massif of Chiribiquete, the fourth and fifth correspond to the Andean región in the departament of the Tolima.

Key words: Meliaceae, *Guarea*, *Trichilia*, Taxonomy, Colombia.

Dentro de los géneros importantes de la familia Meliaceae están: *Guarea*, representado con cerca de 70 especies en el mundo, de las cuales 40 corresponden a América tropical; para Colombia se han registrado hasta el presente 23; el género *Trichilia* abarca cerca de 182 especies en el mundo, de las cuales están presentes 90 en la América tropical y 27 en Colombia. (Morales-P., 1997)

Las especies de Meliaceae registradas en Colombia se caracterizan por prosperar en la Selva Tropical Inferior (Cuatrecasas, 1988), formación vegetal en la que crecen las especies acá propuestas.

Como parte del "Estudio de la Familia Meliaceae y su potencial de uso para Colombia", se realizó la revisión de material depositado en diferentes herbarios del país. Tras la misma resultaron tres nuevas especies de *Guarea* y dos de *Trichilia*, ambas de la Sección *Moscoxylon*. A continuación se describen y tipifican las cinco nuevas especies.

* Bióloga M.Sc., Investigadora Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA. C.I. Macagual. Florencia, Caquetá. Colombia. A.A. 337. e-mail: corpoi10@gaitana. interred.net.co

***Guarea quadrangularis* Morales-P. sp. nov. Figura 1.**

Typus: Colombia. Departamento de Vaupés, Estación Biológica Caparú, 3 km al norte del lago Taraira, nov 1989, *T. Defler 291*, fl (holotypus COAH, Isotypus COAH).

Species valde affinis *Guarea carinata* Ducke, a qua differt ramis glabris striatis, folia praebentia 3-7 paria foliolorum, e quibus basalia minora: petioluli 12-15 mm longi. Foliola opposita vel subopposita, oblonga usque ad obovata. Venatio secundaria constans 11-14 paribus nervorum. Inflorescentia axillaris vel caulinaris, thyrsoides. Pedicelli 1 mm longi vel absentes. Flores unisexuales, 4-meri, 8 staminibus, tubo staminali quadrangulati, ovario quadrangulati lanato, adpresso, et nectario angusto annulari.

Arboles entre los 20-27 m alt., DAP 0.21-0.40 m. Plantas dioicas. Ramas glabras y estriadas. Hojas compuestas dispuestas espiralmente, paripinnadas, con una yema apical circunada, 26.8-70.6 cm long; raquis y peciolas semiteretes o teretes, glabros y estriados; peciolas 9-11 cm long. 3-7 pares de folíolos por hoja; peciólulos 12-15 mm de largo, gruesos, ventralmente acanalados, dorsalmente redondeados; folíolos, opuestos o subopuestos, coriáceos, oblongos, elipsoides y con menor frecuencia obovados, 7-25.5 cm long x 4.8-9.8 cm ancho, los folíolos basales pequeños a reducidos; glabros o con indumento corto y adpreso por el envés, ápice acuminado, base ligeramente asimétrica, redonda a obtusa; venas secundarias 11-14 pares, muy visibles por el envés. Inflorescencia axilar o caulinar, tirsoide, con pocas flores (5-27), 10-13 cm long, eje de la inflorescencia grueso, estriado y glabro. Pedicelos sésiles o hasta 1 mm long y glabros. Flores unisexuales, 4-meras, 8-10 mm long; prefloración valvada; cáliz cupulado fusionado hasta 3/4 partes de la longitud total, lóbulos dilatado-trianguulares, ápice agudo, 3 mm long; pétalos libres, estrechamente triangulares, ápice agudo, base ensanchada, glabros, 8 mm long; flores masculinas con 8 estambres formando un tubo estaminal cuadrangular, alargado, ápicalmente truncado y glabro, base truncada, 7 mm long, anteras insertas dentro del tubo, sésiles y glabras, 1.7 mm long; el pistilodio cuadrangular y delgado con óvulos rudimentarios, 6.5 mm long; nectario visible anular y angosto; flores femeninas con pistilo cuadrangular, lanoso adpreso, 5.5 mm long, ovario 4-carpelar, 2 óvulos por carpelo, estilo corto 1.5 mm long, escumiforme y estriado verticalmente, estigma acostillado lateralmente, formando 8 lóbulos estigmáticos, con una depresión superior central a manera de

cráter, glabro, estaminodios rudimentarios, delgados e indehiscentes. No se ha observado el fruto.

Parátipo: Colombia, Departamento de Vaupés, Mpio. Taraira, Estación Biológica Caparú, 3 km al norte del lago Taraira, jul 1989, *T. Defler 292*, fl (COAH).

Etimología: El epíteto específico se refiere a la forma cuadrangular del tubo estaminal y el ovario.

Distribución. Conocida únicamente por las colecciones típicas. Crece en la Selva Tropical Inferior, en terreno ondulado formado por pequeñas colinas de ca. 200 msnm. Florece en los meses de julio y noviembre.

Guarea quadrangularis es afín a *G. carinata* Ducke, pero se distingue claramente por tener: hojas con los folíolos basales más reducidos, peciólulos 12-15 cm long; folíolos coriáceos, con el ápice acuminado y la base asimétrica; venas secundarias entre 11-14 pares, inflorescencia laxa de 10-13 cm long, flores de 8-10 mm long, cáliz cupulado y glabro, sépalos 3 mm long; pétalos estrechamente triangulares, 8 mm long y glabros; tubo estaminal cuadrangular, ápicalmente truncado, 7 mm long; ovario cuadrangular y estigma con 8 lóbulos y se registra en la región amazónica colombiana.

***Guarea lozanii* Morales-P. sp. nov. Figura 2.**

Typus: Colombia, Departamento de Vaupés, Mpio. de Taraira, Estación Biológica Caparú, 3 km al norte del lago Taraira, nov 1989, *T. Defler 295*, fl (holotypus COAH, isotypus COAH).

Affinis *Guarea venenata* Penn., a qua differt foliolis oblongis. Venatio secundaria constans 23 paribus nervorum. Inflorescentia paniculata axillaris. Pedicelli 6-10 mm de long. Flores 4-5-meri staminibus 10, cum projectione apicali connectivi, nectario lobulato. Ovario ovato-globoso, lanato.

Árbol de 17 m. alt., DAP 0.16 m., monóico; hojas compuestas dispuestas espiralmente, paripinnadas con una yema circunada ápicalmente, 69.9 cm long; raquis redondo y glabro; peciolas semiteretes de 19.6 cm long y glabros; 7 pares de folíolos; peciólulos 6-12 mm de largo, ventralmente acanalados, dorsalmente redondeados, con pulvínulos; folíolos oblongos, cartáceos, 28.8 cm long, x 7.6 cm ancho y glabros, ápice acuminado, base ligeramente asimétrica, cuneada hasta aguda; venas secundarias 23 pares de nervios muy visibles en el envés, venas de menor grado tenues. Inflorescencia en panícula, axilar, 18.2 cm long, eje de la inflorescencia estriado y glabro. Pedicelos 6-10 mm de largo y glabros; presencia

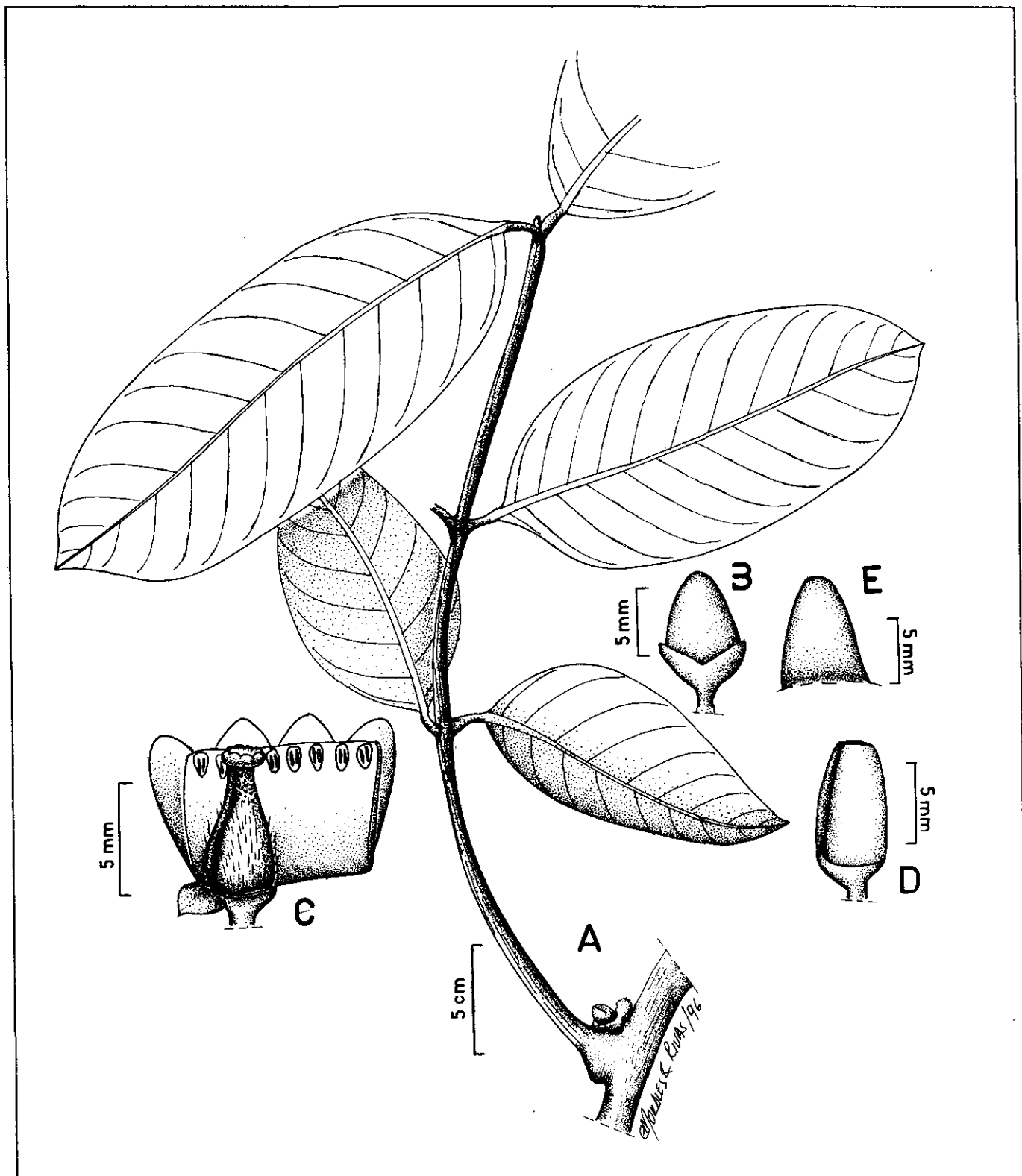


Figura 1. *Guarea quadrangularis* Morales-P sp. nov. A. Hoja; B. Flor cerrada; C. Flor en corte longitudinal; D. Vista externa del tubo estaminal; E. Antera; F. Sépalo; G. Pétalo (*Defler* 295. COAH).

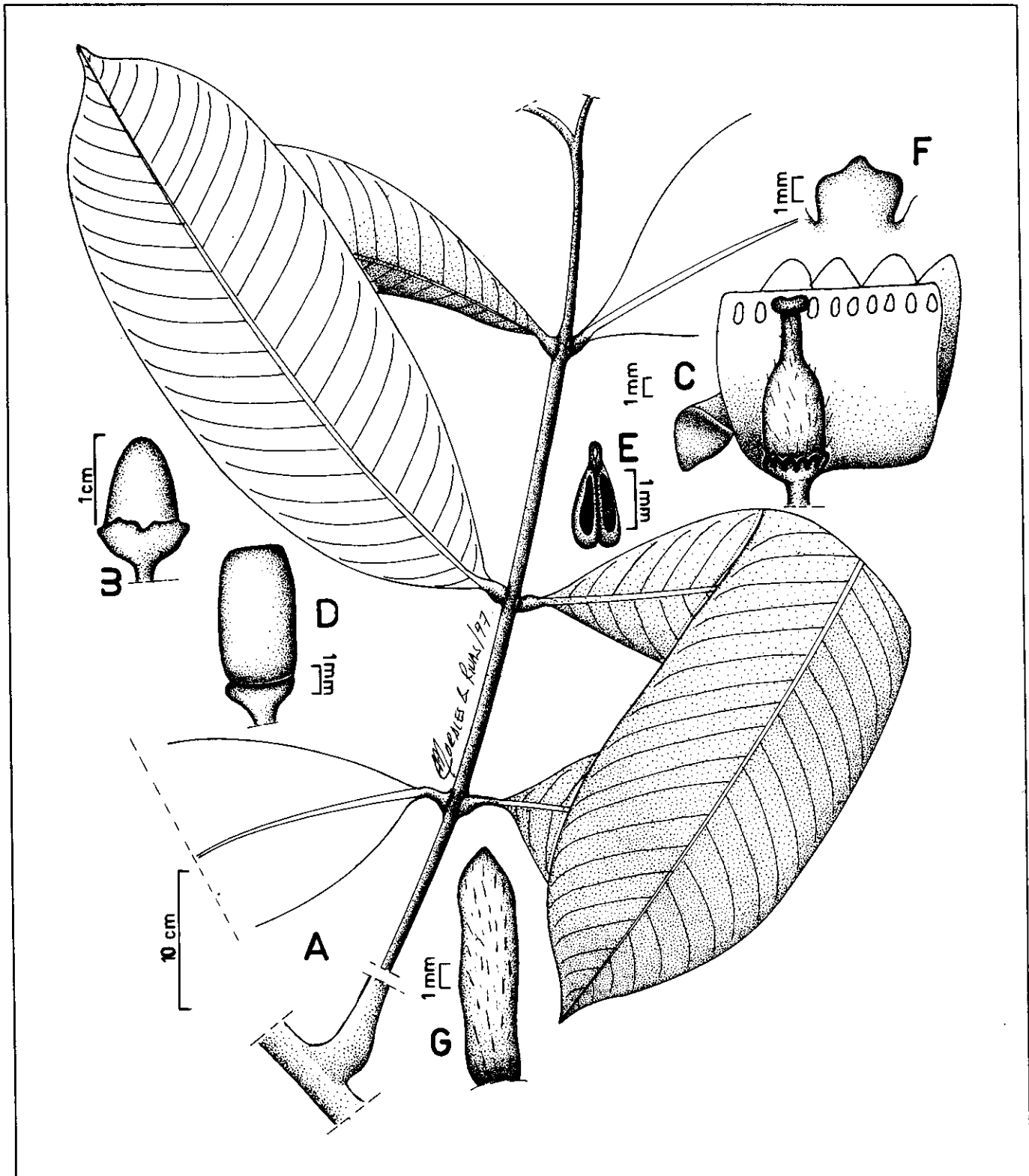


Figura 2. *Guarea lozani* Morales-P sp. nov. A. Hoja; B. Flor cerrada; C. Flor en corte longitudinal; D. Vista externa del tubo estaminal; E. Pétalo (Deffler 295, COAH).

de brácteas florales triangulares. Flores bisexuales, 10 mm long; prefloración valvada; cáliz cupulado, 4-5 sépalos fusionados hasta $\frac{3}{4}$ de su longitud, lóbulos ampliamente obovados, 3 mm long, ápice acuminado hasta redondo, base ensanchada y glabros; 4-5 pétalos libres, ovado-lanceolados, 10 mm long x 1.8 mm ancho, ápice redondeado, indumento disperso; tubo estaminal, cilíndrico angostándose hacia el ápice, glabro, 7 mm long, 10 anteras, sésiles, insertas dentro del tubo estaminal, 1.8 mm long, con la proyección apical del conectivo de forma lobulada, glabras, existe una distancia entre el ápice del tubo y las anteras de 0.5 mm de largo; pistilo 7 mm long; ovario ovado-globoso, 4-carpelar, 2 óvulos por carpelo, lanoso esparcido, estilo largo 3 mm long, lanoso, estigma discoide, liso y con una depresión superior central; nectario ancho, anular, lobado verticalmente, 2 mm long, rodeando la base del ovario. No se ha observado el fruto.

Etimología: Especie dedicada al Profesor Gustavo Lozano-C., botánico emérito del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, quien prestó su asesoría en desarrollo del presente trabajo.

Distribución. Únicamente conocida por el ejemplar tipo que proviene de la "Selva Tropical Inferior" del departamento del Vaupés, donde crece en terrenos ondulados de colinas bajas de ca. 200 msnm. Florece en agosto.

Guarea lozani guarda una estrecha relación con *G. venenata* Penn., pero se diferencia claramente en estado vegetativo por tener hojas glabras hasta de 69.9 cm long y peciólulos de 6-12 mm long y con pulvinulo, venas secundarias organizadas en 23 pares y vénulas tenues o ausentes. Presenta también una inflorescencia en panícula con 18.2 cm long y glabra; pedicelos 6-10 mm long, con brácteas florales triangulares. Flores hasta 10 mm long; cáliz cupulado; anteras 10, con proyección apical del conectivo; ovario lanoso.

Guarea penningtoniana Morales-P. sp. nov. Figura 3

Typus: Colombia: Dptos. Caquetá-Guaviare, 28 nov 1992, C. Barbosa; R. Cortés & al. 8090, fr (holótipo e isótipo: COL).

Affinis *Guarea carinata* Ducke, *G. cartaguenya* Cuatr., *G. caulobotrys* Cuatr. *G. corrugata* Cuatr., a quibus differt petiolulis pulvinulatis, foliolis lanceolatis, venis secundariis in 13-23 paribus, fructibus 12-costatis.

Árbol de 5 m alt. Tallo hueco, estriado y glabro. Hojas compuestas, dispuestas espiralmente, paripinnadas con

una yema circinada ápicalmente de 67-75 cm long; raquis y peciolo dorsalmente redondos, ventralmente acanalados, estriados y glabros, 30-31 cm long; peciólulos 8-12 mm de largo, con pulvinulos y estriados, cara dorsal redondeada, cara ventral acanalada; 5-7 pares de folíolos por hoja. Folíolos cartáceos, lanceolados, de 31.3-36 cm long, x 6-7.6 cm ancho, ápice cuspidado, base aguda, glabros; venas secundarias con 13-23 pares; vénulas reticuladas. Frutos globosos a obovados, caulinares, con 4 carpelos 2-3.2 cm long x 1.4-2.5 cm ancho, con 12 costillas por fruto, cada costilla de 2-5 mm de ancha, ápice redondo o apiculado, base atenuada hasta cuneada, pubérulo adpresos entre cada depresión y con 8 semillas; dehiscencia en 4 valvas, es decir con 2 semillas por carpelo. Semillas elíptico-trianguulares, ápicalmente agudas y con la base redonda a truncada y de 8-10 mm long x 2-5 mm de ancho, semillas rodeadas por una sarcotesta de consistencia membranosa. No se ha observado flor.

Etimología: Dedicada al especialista en Meliaceae del Neotrópico, Dr. Terence Pennington del Jardín Botánico de KEW, quien prestó su asesoría en desarrollo del presente trabajo.

Distribución. Hasta el presente solo se conoce por las colecciones típicas que proceden de la zona limitrofe de los departamentos de Caquetá y Guaviare. Crece en la Selva Tropical Inferior, en bosques dominado por *Cespedesia*, entre los 100-200 msnm.

Guarda una estrecha relación con *Guarea carinata* Ducke, *G. cartaguenya* Cuatr., *G. caulobotrys* Cuatr. y *G. corrugata* Cuatr., como se muestra en la tabla 1.

Se diferencia claramente de este grupo de especies en estado vegetativo por los peciólulos con pulvinulo; folíolos lanceolados, 31.3-36 cm long por 6-7.6 cm ancho, es decir 4 a 5 veces más largo que ancho, glabros; venas secundarias 13-23 pares y prominentes. Frutos globosos a obovados, caulinares, 2-3.2 cm long por 1.4-2.5 cm ancho, con 12 costillas prominentes, ápice redondo o apiculado y base atenuada.

Trichilia carinata Morales-P. sp. nov. Figura 4

Typus: Colombia, Departamento Tolima, Mpio. de Méndez, finca Bremen, nov 1996, H. Mendoza; A. Repizzo A. & H. Gordillo 1026, fl.fr. (Holotypus: Herbario Alejandro von Humboldt; Isotypi: COL y Herbario Alejandro von Humboldt).

Species e sectione *Moscoxylum* C. DC., valde affinis *Trichilia appendiculata* (Tr. & Pl.) C. DC., a qua differt

foliolis ablongis, ovatis usque obovatis, basi asymmetrica; inflorescentia 16.6-26.9 cm longa, floribus semper 5-meris, calyce cupuliformi, tubo staminali cupuliformi, ovario pyriformi, lanato adpresso, stigma glandulari.

Árboles de 6-7 m. alt. Ramas tomentosas o pubéculas, estriadas y lenticeladas. Hojas compuestas, dispuestas espiralmente, imparipinnadas; raquis y peciolas teretes hasta semiteretes, tomentosos, estriados y lenticelados, 17-21 cm long. 5-15 pares de folíolos, con los 3-4 pares de folíolos basales muy reducidos y a veces caducos. Peciólulos de 2-5 mm long, (el folíolo terminal posee un peciólulo más largo), con indumento tomentoso corto y adpreso. Folíolos alternos hasta subopuestos, membranosos, oblongos, ovados hasta obovados, 4.1-14 cm long. x 2.1-5.4 cm ancho, ápice acuminado, con menos frecuencia agudo, base aguda, cuneada o redonda y ligeramente asimétrica (la asimetría es muy marcada en los folíolos basales), con indumento corto pubérulo y

adpreso sobre el nervio principal; venas secundarias 13-20 pares, visibles por la haz y envés. Inflorescencia axilar en tirso, 16.6-26.9 cm long, ejes de la inflorescencia cortamente tomentosos, estriados; pedicelos 1-2 mm long y tomentosos. Flores bisexuales, 5-meras, 5-8 mm long: prefloración valvada; cáliz cupuliforme fusionado en 3/4 partes de su longitud o con sépalos lobulados, y de 1-2 mm long, ápicalmente acuminados hasta redondos, pubescentes; pétalos libres, lanceolados, 5-8 mm long, ápice acuminado o agudo, base ligeramente ensanchada y tomentosa; tubo estaminal cupuliforme, membranoso, glabro, 4.5 cm long; anteras 8-10, exsertas en el ápice del tubo, saliendo a diferente longitud, entre 0.5-1 mm de largo; ovario piriforme y ensanchado, lanoso y adpreso; 3-carpelar, 2 óvulos por carpelo, estilo alargado hasta el doble de la longitud del ovario; estigma glandular hasta discoide y ligeramente lobulado y glabro; nectario ausente.

Tabla 1. Especies afines a *Guarea penningtoniana* Morales-P. sp. nov.

Caracteres\ Especies	<i>Guarea penningtoniana</i> . Morales-P. sp. Nov.	<i>G. carinata</i> Ducke	<i>G. cartaguenya</i> Cuatr.	<i>G. caulobotrys</i> Cuatr.	<i>G. corrugata</i> Cuatr.
Forma del folíolo	Angostamente lanceolados	Oblanceolados a elípticos	Oblanceolados	Oblanceolados a oblongos	Oblongos a elípticos
Ápice del folíolo	Cuspidado	Corto cuspidado	Agudo hasta cuspidado	Atenuado o cuspidado	Atenuado o cuspidado
Indumento del folíolo	Glabro	Envés pubescente con pelos crispados, puntos glandulares y estrías.	Envés pubescente con pelos crispados, puntos glandulares y estrías.	Envés pubérulo	Envés con puntos glandulares y estrías
Tamaño del folíolo	31.3-36 cm long x 6-7.6 cm ancho	10-25 cm long x 5-10 cm ancho	25-38 cm long x 10-15 cm ancho	25-35 cm long x 9-13.5 cm ancho	15-25 cm long x 8-12 cm ancho
No. de venas secundarias	13-23 pares	10-13 pares	18-28 pares	14-19 pares	12-16 pares
Forma del fruto	Globoso a obovado	Globoso a piriforme	Ovoide hasta piriforme	Obovoide	Piriforme
No. de costillas en el fruto	12	3	20	10-12 poco definidas o ausentes	16
Ápice del fruto	Redondo o apiculado	Truncado	Truncado	Truncado	Obtuso
Indumento del fruto	Pubérulo adpreso hasta glabro	Tomentoso o pubescente	Pubérulo o papiloso	Pubérulo y áspero	Corrugado, pubérulo- adpreso
Tamaño del fruto (long.)	2-3.2 cm long	3-4.5 cm long	5-9 cm long	3.5-4 cm long	5.5. cm long
No. de valvas	4	5-6	5-6	4	4
Forma de la semilla	Elíptica-triangular	Ovoide	Ovoide	Ovoide	Ovoide

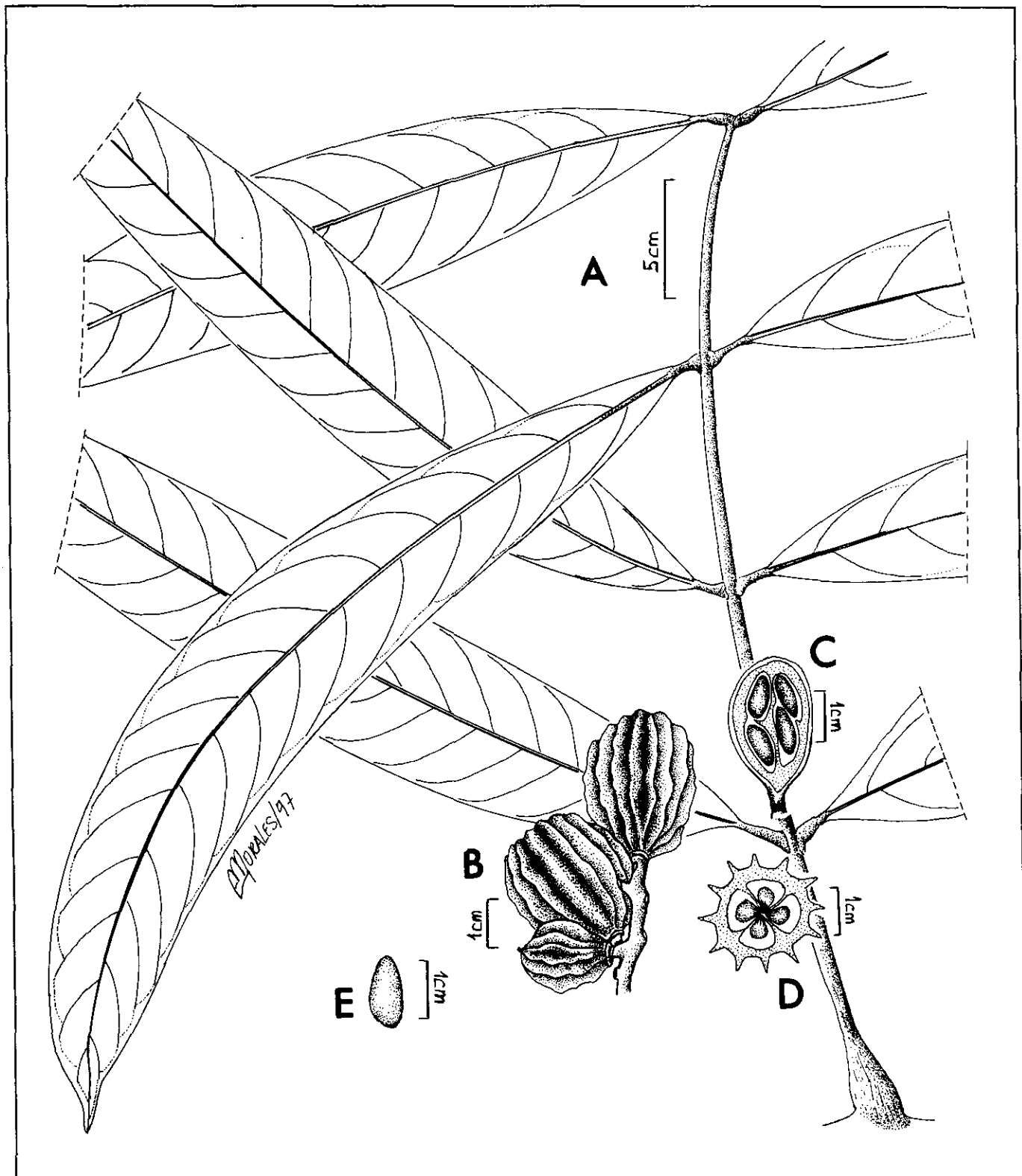


Figura 3. *Guarea penningtoniana* Morales-P sp. nov. A. Hoja; B. Frutos; C. Fruto en corte longitudinal; D. Fruto en corte transversal; E. Semilla (Barbosa et al. 8090, COL).

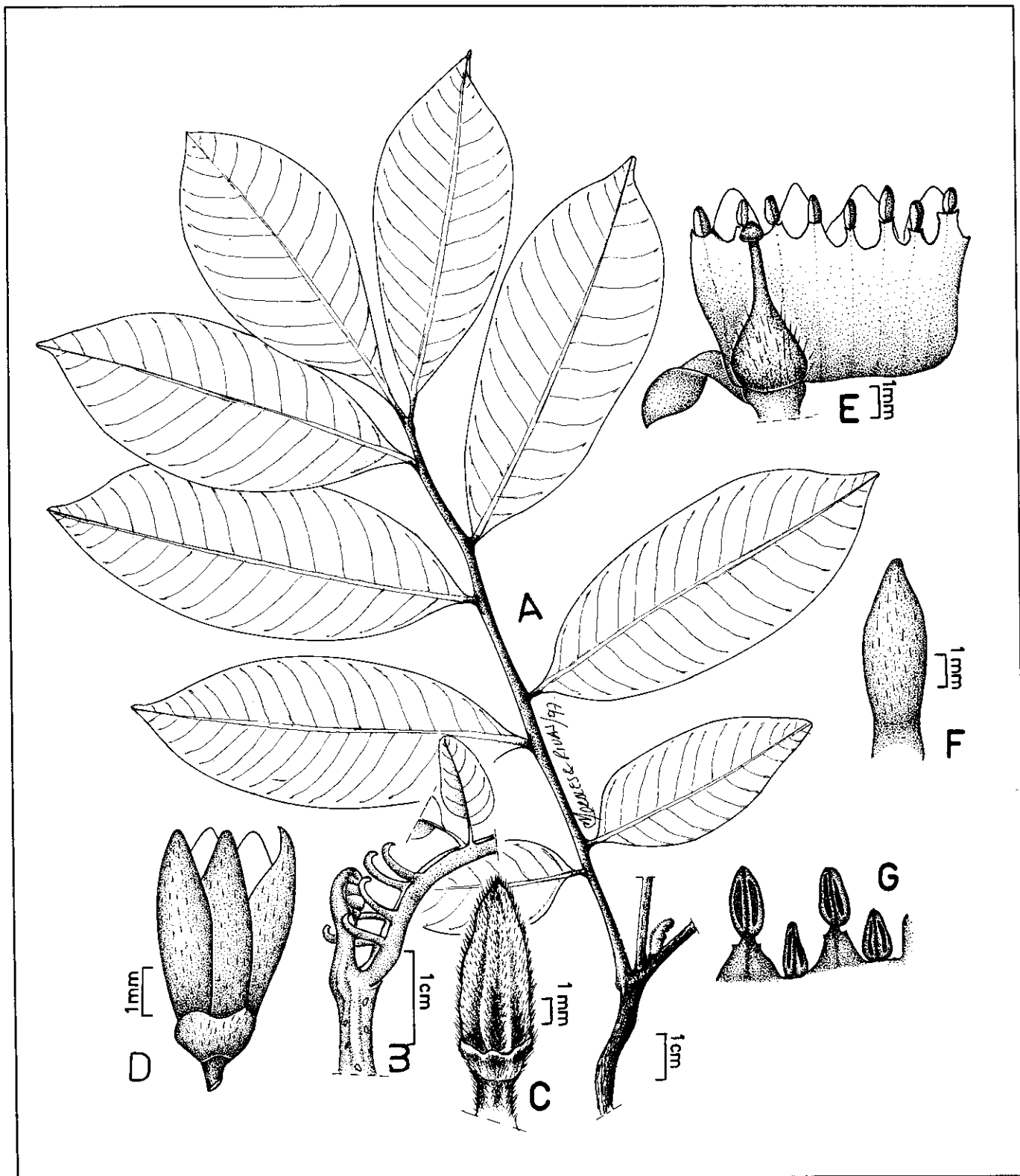


Figura 4. *Trichilia carinata* Morales-P sp. nov. A. Hoja; B. Detalle de los folíolos basales y la yema circinada axilar; C. Fruto; D. Flor; E. Flor en corte longitudinal; F. Pétalo; G. Margen del tubo estaminal y anteras; (Mendoza et al. 1026, Herbario Alejandro Von Humboldt, COL).

Ejes de la infrutescencia con pubescencia escasa, hasta glabros y lenticelados. Fruto elipsoide, lanoso, 7-11 mm long x 3-4 mm ancho, ápice acuminado, con 5 costillas bien definidas, apertura en 3 valvas, cada una con una semilla que se une en una placenta central. Semillas elipsoides, 2.5-3 mm long, ápicalmente agudas y basalmente redondeadas.

Etimología: El epíteto específico se refiere a la presencia de costillas bien definidas en el fruto.

Distribución. Esta especie es conocida en el Tolima con el nombre "Coya colorado"; prospera en la Selva Inferior hacia los 300 metros de altitud. Florece y fructifica en noviembre.

La nueva especie pertenece a la Sección *Moscoxylum* C. DC. Guarda una estrecha relación con *Trichilia appendiculata* (Tr. & Pl.) D. CD., de la que se diferencia claramente por tener los 3-4 últimos pares de folíolos basales muy pequeños, en algunos casos caducos y elipsoides; presenta además peciólulos 2-5 mm long, folíolos membranosos, inflorescencias de 16.6-26.9 cm long, cortamente tomentosas y estriadas; pedicelos tomentosos de 1-2 mm long. Flores bisexuales con pétalos libres, de 5-8 mm long y tomentosos, tubo estaminal cupuliforme y membranoso; ovario y fruto lanosos y adpresos. Los frutos tienen el ápice acuminado, y muestran 5 costillas bien definidas, semillas de 2.5-3 mm long. *T. carinata* también se puede relacionar con *T. schomburkii* C. DC. subsp. *javarensis* Penn., de la cual se separa por el cáliz patelado, los 8 estambres, los frutos estriados y con el indumento de pubérulo a ceroso, que alcanzan 2-3 cm long, con 1-2(4) semillas por fruto.

Trichilia oligofoliolata Morales-P sp. nov. Figura 5

Tipo: Colombia: Dpto. Tolima, Mpio. Méndez, finca Bremen, nov 1996, *Mendoza H.*; *Repizzo A.* & *Gordillo H. 1070*, fl (holotipo: Herbario Alejandro Von Humboldt, isótipo: COL y Herbario Alejandro Von Humboldt).

Species e sectione *Moscoxylum* C. DC. affinis *Trichilia acuminata* (H. & B. ex Roem. & Schultes) C. DC., a qua differt foliolis avato-lanceolatis, venis secundariis in 18-23 paribus; Inflorescentia 17 cm longa, pedicellis floralibus 1-3 mm long, calyce campanulato; antheris cum parva projectione connectivi; ovario globoso y lanato adpresso.

Árbol de 7 m. alt. Tallo estriado y con diminutas lenticelas. Hojas dispuestas espiralmente, unifolioladas; peciolos 1.8-2.2. cm long, tomentosos, ventralmente acanalados y dorsalmente redondeados, presencia de un

engrosamiento cerca a la base del folíolo, en una tonalidad de color más oscura con respecto a resto del peciolo a manera de pulvinulo. Folíolos cartáceos, ovado-lanceolados, glabros, 6-20.8 cm long. x 5.5-7.25 cm ancho, ápice agudo hasta acuminado, base ligeramente asimétrica, obtusa y lustrosos; venas secundarias 18-23 pares, arqueado-ascendentes, siendo más prominentes por el envés. Inflorescencia axilar en tirso, y laxa, 17 cm long; pedicelos 1-3 mm long. Flores bisexuales, 4-5 meras, crema, brácteas florales cocleadas triangulares; prefloración valvada; cáliz campanuliforme, sépalos fusionados hasta ½ de su longitud, tomentosos, 1.5 mm long; pétalos fusionados en la base, ovados, ápice redondo hasta agudo, estrechándose hacia la base, presencia de indumento disperso, 2.5-4 mm long; tubo estaminal acopado, 2 mm long, ápice del tubo con 4-5 lóbulos triangulares filiformes, que se alternan con las anteras; 4-5 anteras, dorsifijas, con una pequeña proyección apical del conectivo, exsertas en el ápice del tubo con un corto filamento de 0.5 mm long, glabras, cara interna superior del tubo estaminal con indumento de pelos simples dispersos; nectario anular reducido o ausente; ovario globoso 2-carpelar, 2 óvulos por carpelo, lanoso adpreso, estilo corto, glabro, estigma discoide-glandular. No se ha observado el fruto.

Etimología. El epíteto específico hace alusión a las hojas unifolioladas.

Distribución. Conocida como "coya colorado", procedente de los bosques secos del norte del Tolima, sobre los 300 m de altitud, en la Selva Inferior. Con floración en noviembre.

Guarda una estrecha relación con *Trichilia acuminata* (H. & B. ex Roem. & Schultes) C. DC., son especies con tallos poco lenticelados, hojas unifolioladas y cartáceas, flores pentameras. Se separa claramente de *T. acuminata* por los folíolos elípticos u orbiculados; venas secundarias 13-15 pares. Flores sésiles; cáliz cupulado; tubo estaminal cupulado; ovario ovoide y densamente pubérulos, estigma capitado o apiculado. También se relaciona con *T. singularis* C. DC. y se diferencia fundamentalmente por la variación en el número de folíolos, 10 estambres, su hábitat corresponde a zonas inundables de bosques muy húmedos.

Agradecimientos

Al profesor T. D. Pennington del Botanical Gardens KEW por su revisión y asesoría en las descripciones y dibujos, al profesor G. Lozano por su asesoría, al programa de Botánica Económica del Instituto de

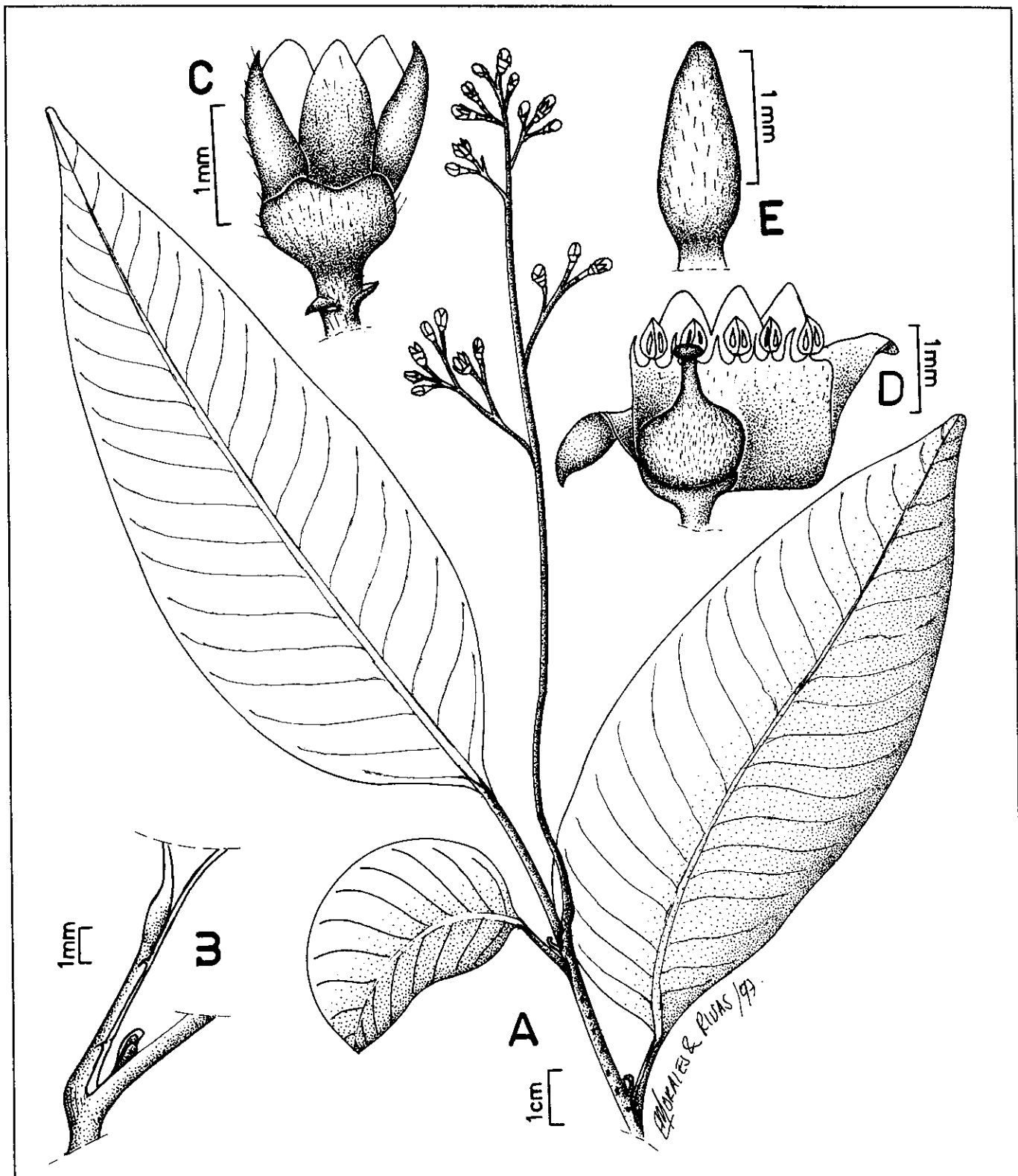


Figura 5. *Trichilia oligofoliolata* Morales-P sp. nov. A. Hábito e inflorescencia axilar; B. Detalle del peciolo y de la yema axilar; C. Flor; D. Flor en corte longitudinal; E. Pétalo (Mendoza et al. 1070, Herbario Alejandro Von Humboldt, COL).

Ciencias Naturales, especialmente a los profesores P. Leyva y C. Garzón por el respaldo y cooperación, a los directores de herbarios D. Cardenas (COAH), H. Mendoza (Herbario Alexander von Humboldt) y R. Cortes (UDBC) por facilitar el material tipo, al botánico Pedro Ortiz por las diagnosis latinas, a los profesores José C. Murillo y Sandra Cruz por su apoyo y colaboración, finalmente las ilustraciones fueron realizadas por la autora con la ayuda de la bióloga J. Rivas.

Bibliografía

- Cuatre Casas, J. 1988. Formaciones Vegetales de Colombia. Pérez-Arbelaezia 22:419-540.
- Morales-P, M. E. 1997. Estudio de la Familia Meliaceae y su potencial de uso para Colombia. Tesis de Maestría en Biología y Sistemática. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. 307 pp.
- Pennington T. D. & Styles B. T. 1975. A Generic Monograph of the Meliaceae. Blumea 22:419-540.
- _____ & Taylor, D. A. 1981. Meliaceae. Flora Neotropica Monograph. Ed. The New York Botanical Garden. 28: 470 p.

REGISTROS NUEVOS PARA LA FLORA DE UREDINALES (ROYAS) DE COLOMBIA

por

Víctor Manuel Pardo-Cardona*

Resumen

Pardo-Cardona, V. M.: Registros nuevos para la flora de uredinales (royas) de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **22**(84): 347-354. 1998. ISSN 0370-3908.

Se incrementa la información sobre la flora de Uredinales (royas) de Colombia y del mundo al proponer, una nueva especie, registrar 11 nuevos hospedantes para especies ya conocidas, 6 especies no conocidas para el país, y 9 hospedantes ya registrados, pero nuevos para Colombia.

Palabras claves: Uredinales, royas, Colombia

Abstract

The information of Colombian uredinal flora is increased by the proposal of a new species, the report of 11 new hosts, 6 new records for the country and 9 hosts previously known but new for Colombia.

Key words: Uredinales, rust-fungi, Colombia.

Durante los años de 1997 y 1998 se ha continuado en el Museo Micológico de la Universidad Nacional de Colombia sede de Medellín, el trabajo sobre los Uredinales Colombianos a partir de nuevas expediciones de colección, con la revisión y estudio de colecciones de años anteriores. Tal trabajo ha permitido encontrar novedades sobre la flora de este importante grupo de hongos. La frecuencia con la cual se encuentran estas novedades corrobora la riqueza de la diversidad biológica colombiana y el bajo nivel de recolección y reco-

nocimiento para este grupo en particular y para la mayoría de los grupos de hongos en general.

Los registros nuevos para la flora uredinológica Colombiana, que en algunos casos también lo son para la ciencia, son los siguientes:

1. *Aecidium tournefortiae* P. Hennings, Hedwigia 34:338. 1895.

Sobre: *Tournefortia scabrada* H.B.K. (Boraginaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Amagá, vereda La Delgadita, 1.455 m. alt., Ago 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 940

* Profesor Titular, Museo Micológico, Universidad Nacional de Colombia, Apartado aéreo 3840, Medellín.

Tournefortia scabrida es nuevo hospedante de *A. tournefortiae*. Esta especie de roya ya había sido registrada en Colombia sobre *T. bicolor* Sw. (Pardo-Cardona 1994).

2. *Kuehneola loeseneriana* Jackson & Holway ex Buriticá, Rev. Acad. Colombiana Cienc. 20 (77): 226. 1996.

Anamorfo: *Spirechina loeseneriana* (P. Hennings) Arthur, J. Myc. 13: 30. 1907.

= *Uredo loeseneriana* P. Hennings, Hedwigia 37: 373. 1898.

= *Uromyces usterii* Spegazzini, Rev. Mus. La Plata 155: 7. 1908.

= *Uromyces loesenerianus* (P. Hennings) Sydow, Monog. Ured. 2: 202. 1910.

Sobre: *Rubus macrocarpus* Benth. (Rosaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Jardín, alto de Ventanas, 2.800 m. alt., 3 Dic 1991, Pardo-Cardona 151, MMUNM 376 (II, III).

Rubus macrocarpus es nuevo hospedante de *K. loeseneriana*. Esta es una especie ampliamente distribuida en Colombia sobre *R. urtifolius* Poiret y *Rubus* sp (Buriticá & Pardo-Cardona 1996), y en otros países suramericanos como Venezuela, Ecuador, Perú, Bolivia y Brasil. Además de los dos hospedantes anteriormente mencionados, también está registrada sobre *R. brasiliense* Mart., *R. erythroclados* Mart. y *R. floribundus* H.B.K. (Dennis, 1970; Jackson 1931).

3. *Puccinia abrepta* Kern, Mycologia 11: 140. 1919.

Sobre: *Cyperus caracasanus* Kunth. (Cyperaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Medellín, corregimiento San Antonio de Prado, vereda Potrerito, 1.940 m. alt., 15 Feb 1998, M. Rendón, MMUNM 1011 (II, III).

Cyperus caracasanus es nuevo hospedante de *P. abrepta*, aunque Buriticá & Pardo-Cardona (1996) la registran sobre *Cyperus* aff. *caracasanus*. Esta es una especie muy peculiar, pues es hasta ahora, la única roya de Cyperaceae que en Colombia se le ha encontrado el estado teliomórfico. Con *C. caracasanus* son tres las especies del género *Cyperus* que son parasitadas por *P. abrepta* pues recientemente se halló también sobre *C. ferax* L.C. Rich. (Gómez, 1997).

4. *Puccinia arthuriana* H.S. Jackson, Bot. Gaz. 65:295. 1918 var. *arthuriana* Urban, Acta Univer. Carolinae 1971: 9. 1973.

= *Argomyces vernoniae* Arthur, N. Am. Flora 8(3):218. 1912

= *Bullaria arthuriana* (Jackson) Arthur & Mains, N. Am. Fl. 7: 496. 1922.

No *Puccinia vernoniae* Schweinitz 1912.

Sobre: *Vernonia canescens* H.B.K. (Asteraceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Caramanta, corregimiento de Alegrias, 1.800 m. alt., 21 Feb 1997, C.A. Roza, MMUNM 863 (I, III).

Puccinia arthuriana es nuevo registro para Colombia. Ha sido registrada en Centroamérica desde México hasta Costa Rica, en las islas del Caribe y en Suramérica (Cummins 1978) aunque no en Brasil (Hennen et al. 1982). Dennis (1970) la reporta para Venezuela.

Esta es la cuarta especie de *Puccinia* Persoon registrada sobre el género *Vernonia* en Colombia donde anteriormente lo han sido *Puccinia becki* Mayor, *P. neorotundata* Cummins y *P. vernoniae-mollis* Mayor (Buriticá & Pardo-Cardona 1996).

5. *Puccinia claviformis* Lagerheim, Tromso Mus. Aarsh. 17:53. 1895.

= *Aecidium solanitum* Schweinitz, en: Berkeley & Curtis, J. Acad. Phil. II: 283. 1853.

= *Dicaeoma claviforme* Kuntze, Rev. Gen. 3: 468. 1898.

= *Puccinia huallagensis* Hennings, Hedwigia 43: 158. 1904.

= *Puccinia solanicola* Mayor, Mém. Soc. Neuchatel Sci. Nat. 5: 505. 1913.

= *Puccinia solanita* Arthur, Mycologia 14:19. 1922.

= *Micropuccinia solanita* Arthur & Jackson, N. Am. Flora 7:562. 1922.

Sobre: *Solanum scorpioideum* Rusby (Solanaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Medellín, vereda El Manzanillo, 1.670 m. alt., Ago 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 929 (III).

Solanum scorpioideum es nuevo hospedante de *Puccinia claviformis*. Esta especie de roya está ampliamente distribuida en Colombia sobre un rango de siete especies del género *Solanum*: *S. diversifolium* (H.B.K.) Schlecht., *S. hirtum* Vahl., *S. dolichosepalum* Bitter., *S. aff. myrianthum* Britt., *S. aff. ovalifolium* H. & B., *S. straminifolium* Jacq. y *S. torvum* Swartz (Buriticá & Pardo-Cardona 1996).

6. *Puccinia cnici-oleracei* Persoon ex Desmazières, Catal. Pl. Omis. p. 24. 1823 *sensu lato*.

- = *Puccinia asteris* Duby, Bot. Gall. 2:888. 1830.
- = *Puccinia doloris* Spegazzini, Anal. Soc. Cient. Argentina 12:23. 1881.
- = *Puccinia melampodii* Dietel & Holway, en: Holway, Bot. Gaz. 24:32. 1897.
- = *Puccinia acanthospermi* P. Hennings, Hedwigia 41:296. 1902.
- = *Puccinia eleutherantherae* Dietel, Ann. Mycol. 7:354. 1909.
- = *Puccinia spilanthisicola* Mayor, Mém. Soc. Neuchatel Sci. Nat. 5:531. 1913.

Sobre: *Melampodium divaricatum* (Rich.) DC (Asteraceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, Municipio de Fredonia, vereda Palomos, 1.310 m. alt., Ago 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 954 (III).

Melampodium divaricatum es nuevo hospedante para esta especie de Uredinales en Colombia y Suramérica aunque ya se encuentra registrado por Sydow (1904) en Centroamérica (Guatemala).

Puccinia cnici-oleracei sensu lato es una especie de amplia distribución en Colombia sobre un rango también amplio de hospedantes que incluye nueve géneros y 12 especies de Asteraceae (Pardo-Cardona 1994, 1997).

7. *Puccinia cordiae* Arthur, Mycologia 8:17. 1916.

- = *Puccinia cordiae* Vestergren, Mycomycetes rar. sel. fasc. LV no. 1374. 1909.
- Anamorfo: *Uredo cordiae* (Hennings) Hennings, Hedwigia 43:163. 1904.
- = *Uromyces cordiae* Hennings, Hedwigia Beiblatt 38:129. 1899.

Sobre: *Cordia alliodora* Cham., (Boraginaceae), COLOMBIA, departamento de Caldas, municipio de Palestina, granja Luker, 1.050 m. alt., 13 Jun 1997, M. Salazar 24, MMUNM 891 (II, III); via Chinchiná - Manizales, orillas del río Chinchiná, lindero de un cafetal cultivado, 24 Ago 1996, P. Buriticá (II, III).

Los teliosporos de nuestro espécimen presentan un poro germinativo muy conspicuo en la célula basal mostrándose como un pequeño umbo lateral y la ornamentación es mucho más concentrada en el ápice,

características que no están expresadas en la descripción original. *Puccinia cordiae* es nuevo registro para Colombia. Ya lo había sido en Brasil (Hennen et al. 1982) y México (León-Gallego & Cummins 1981).

8. *Puccinia dolosa* Arthur & Fromme, Torreyia 15:262. 1915. var. *dolosa* Ramachar & Cummins, Mycopath. Mycol Appl. 25 (1-2): 12. 1965.

Sobre: *Paspalum paniculatum* L. (Poaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Titiribí, vereda Otramina, finca El Pilar, 1.600 m. alt., 7 feb 1997, M. Salazar 16, MMUNM 848 (II).

El espécimen fue determinado con la colaboración del Dr. Halvor B. Gjaerum del NCRI (Noruega). La morfología de los uredosporos de nuestro espécimen encaja perfectamente con la descripción de la especie.

Con el presente registro de *Puccinia dolosa* var. *dolosa*, el cual es nuevo para Colombia, se completa la distribución hemisférica de esta especie que previamente lo había sido en el sur de los Estados Unidos, Puerto Rico, Panamá, Venezuela y Brasil (Cummins 1971, Dennis 1970, Hennen et al. 1982).

9. *Puccinia emiliae* Hennings, Hedwigia 37:278. 1898.

Sobre: *Emilia sagittata* (Vahl.) DC, departamento de Antioquia, municipio de Ciudad Bolívar, vereda Cristo Rey, 1.360 m. alt., 10 May 1994, Meneses 31, MMUNM 561 (III).

Emilia sonchifolia DC, departamento del Quindío, municipio de Montenegro, finca El Agrado, 1.310 m. alt., M. Salazar 30, MMUNM 906; departamento del Valle del Cauca, municipio de Toro, finca Cañaveral, 950 m. alt., L.M. Agudelo, MMUNM 912 (III).

Emilia sagittata es nuevo hospedante de *Puccinia emiliae* para Colombia y Suramérica, y ya se encuentra registrada en las Antillas (Sydow & Sydow 1904); y *E. sonchifolia* es nuevo hospedante de esta especie de Uredinales para Colombia y la zona Andina de Suramérica pues ya se encuentra registrada para Trinidad y Tobago (Dennis 1970) y Brasil (Hennen et al. 1982).

10. *Puccinia exilis* H. & P. Sydow, Monog. Ured. 1:481. 1903.

Sobre: *Pavonia* sp (Malvaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Medellín, corregimiento de San Antonio de Prado, 2.240 m. alt., Ago 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 953 (III).

Pavonia exilis es nuevo registro para Colombia y la zona Andina de Suramérica. Con el presente registro se completa el rango de distribución hemisférica de esta especie de Uredinales pues ya está registrada en México (León-Gallego & Cummins 1981) y Brasil (Hennen et al. 1982).

Puccinia exilis es la cuarta roya del género *Puccinia* con ciclo de vida reducido altamente evolucionado colectada sobre Malvaceae en Colombia pues ya lo están *P. anodae* Sydow, *P. heterospora* Berkeley & Curtis y *P. malvacearum* Bertero ex Montagne (Buriticá & Pardo-Cardona 1996). Las diferencias morfológicas de estas tres especies con *P. exilis* son muy notorias.

11. *Puccinia impedita* Mains & Holway *apud* Arthur, Mycologia 10: 135. 1918.

= *Bullaria impedita* Arthur & Mains, N. Amer. Flora 7: 493. 1922.

Anamorfo: *Uredo salviarum* Mayor, Mém. Soc. Neuchatel Sci. nat. 5: 592. 1913.

Sobre: *Salvia scutellarioides* H.B.K. (Labiatae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Medellín, corregimiento de San Antonio de Prado, 2.190 m. alt., Ago 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 986 (II).

Salvia scutellarioides es nuevo hospedante de *Puccinia impedita* en Colombia.

12. *Puccinia liabi* Mayor, Mém. Soc. Neuchatel Sci. Nat. 5: 539. 1913.

Sobre: *Liabum hastifolium* P. & E. (Asteraceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Angelópolis, 1.985 m. alt., 23 Nov 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 988 (III).

Liabum hastifolium es nuevo hospedante para *Puccinia liabi*. Es el segundo registro de esta especie de roya en Colombia desde 1910, cuando Mayor (1913) la colectó en el mismo municipio donde se hace el presente registro.

13. *Puccinia macra* Arthur & Holway. En: Arthur, Am. J. Bot. 5: 465. 1918.

Sobre *Paspalum prostratum* S. & M. (Poaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Marinilla, 2.050 m. alt., 11 Dic 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 992 (II).

Paspalum prostratum es nuevo hospedante de *Puccinia macra* en Colombia. Anteriormente había sido

colectada sobre *P. paniculatum* L. y *P. candidum* (H.B.K.) Kunth (Buriticá & Pardo-Cardona 1996).

14. *Puccinia malvacearum* Bertero ex Montagne. En: Gay, Hist. Fis. Política de Chile 8: 43. 1852.

= *Puccinia sidae* Patouillard, Bull. Soc. Myc. Francia p. 97. 1888.

= *Puccinia sidae-rhombifoliae* Mayor, Mém. Soc. Neuchatel Sci. Nat. 5: 484. 1913.

= *Micropuccinia malvacearum* Arthur & Jackson, En: Arthur, Bull. Torrey Bot. Club 48: 41. 1921.

Sobre: *Sida poeppigiana* (C. Schum.) Fryx. (Malvaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de La Estrella, 2.250 m. alt., 23 Nov 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 987 (III).

Sida poeppigiana es nuevo hospedante de *Puccinia malvacearum* en Colombia. Esta es una especie de roya de amplia distribución en nuestro país donde ya está registrada sobre 3 géneros y 12 especies de Malvaceae (Buriticá & Pardo-Cardona 1996).

15. *Puccinia oxalidis* Dietel & Ellis, En: Dietel, Hedwigia 34:291. 1895.

Anamorfo: *Uredo oxalidis* Léveillé, Ann. Sci. Nat. II. 16:240. 1841.

= *Trichobasis oxalidis* Léveillé, Ann. Sci. Nat. IV. 20:299. 1863.

= *Uredo oxalidearum* Cooke, Grevillea 10:123. 1882.

Sobre *Oxalis latifolia* H.B.K. (Oxalidaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Medellín, corregimiento San Cristóbal, vereda La Ilusión, 2.120 m. alt., 28 Nov 1996, Gómez 25, MMUNM 805 (II).

Oxalis lotoides H.B.K., COLOMBIA, Santafé de Bogotá, Jardín Botánico, 2.540 m. alt., 2 Jul 1997, Salazar 23, MMUNM 886 (II).

Oxalis lotoides es nuevo hospedante de *Puccinia oxalidis*. *O. latifolia* es nuevo hospedante de *P. oxalidis* en Colombia aunque Dennis (1970) lo registra para Colombia y Venezuela, sin precisar el país; y ya había sido registrado para México (León-Gallego & Cummins 1981). *P. oxalidis* es una de las royas de mas amplia distribución en Colombia y ya había sido hallada sobre *O. martiana* (Zucc.) Small., *O. pubescens* H.B.K. y *Oxalis* sp (Buriticá & Pardo-Cardona 1996).

16. *Puccinia psidii* Winter, Hedwigia 24:171. 1884.

Para sinonimia ver **Buriticá & Pardo-Cardona** (1996).

Sobre: *Myrcia popayanensis* Hieron (Myrtaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Medellín, corregimiento San Cristóbal, vereda Las Playas, 1.700 m. alt., 7 Nov 1996, 15 May 1997, H.J. Muñoz, MMUNM 782 (II).

Myrcia popayanensis es nuevo hospedante de *P. psidii*. Esta es una especie de amplia distribución en Colombia donde se ha encontrado sobre siete especies de cuatro géneros de Myrtaceae (**Buriticá & Pardo-Cardona** 1996) y *M. popayanensis* es la cuarta especie de este género parasitada por esta roya.

17. *Puccinia solani-tristis* P. Hennings, Hedwigia 355:236. 1896.

Sobre: *Solanum* sp (Solanaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Medellín, corregimiento San Antonio de Prado, 2.295 m. alt., Ago 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 950 (III).

Puccinia solani-tristis es nuevo registro para Colombia. El tipo de la especie fue colectado en Brasil sobre *S. triste* Jacquin y posteriormente en otras especies de *Solanum* igualmente en Brasil. Este es el segundo registro de esta especie de roya en Suramérica.

Las especies Americanas de *Puccinia* Persoon sobre el género *Solanum* L. constituyen un complejo de royas microcíclicas, muchas de las cuales han sido descritas a partir de colecciones Colombianas. El único estudio coherente de este grupo fue hecho por **Kern** (1933). La determinación se basó en las claves y descripciones contenidas en dicho estudio.

18. *Puccinia steiractinia* Jackson & Holway, En: Jackson, Mycologia 24: 168. 1932.

Anamorfos: *Uredo steiractinia* Jackson & Holway, En: Jackson, Mycologia 24: 168. 1932 ex Pardo-Cardona, **nom. anamorph. nov.**

Aecidium gymmolomiae Mayor, Mém. Soc. Neuchatel Sci. Nat. 5:574. 1913.

Sobre *Steiractinia Klatii* (**Rob. & Greenm**) Blake (Asteraceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Medellín, cerro de Pan de azúcar, 1.980 m. alt., 6 Sep 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 975 (II).

Steiractinia Klatii es nuevo hospedante para *P. steiractinia*. En su descripción original, Jackson & Holway incluyeron el estado uredial pero no le asignaron nombre de acuerdo al Código de Nomenclatura. El anamorfo puede hallarse como el único estado esporico de la especie, como lo comprueba MMUNM 975, razón por la cual hemos tomado la decisión de asignarle nombre. Una revisión efectuada a MMUNM 657, con el propósito de efectuar comparaciones, mostró la presencia de mesosporos, los cuales no están mencionados en la descripción original.

19. *Puccinia striiformis* Westendorp, Bull. Roy. Acad. Belg., Cl. Sci. 21:235. 1854.

= *Puccinia glumarum* Eriksson & P Hennings, Z. Pflanzenkr. 4: 197. 1854.

Anamorfo: *Uredo glumarum* J.K. Schmidt, Allgem. Oekon-tech. Fl 1: 27. 1827.

Sobre: *Calamagrostis pittieri* Hack. (Poaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Marinilla, vereda El Mercado, 2.100 m. alt., 10 Mar 1998, M. Salazar 55, MMUNM 1.016 (II).

Calamagrostis pittieri es nuevo hospedante para *Puccinia striiformis* y es el primer registro sobre *Calamagrostis* en Colombia donde previamente ha sido colectada sobre *Hordeum vulgare* L. y *Triticum aestivum* L. (**Buriticá & Pardo-Cardona** 1996). Esta especie de Uredinales es de distribución mundial, aunque predominante en el hemisferio norte y parasita especies pertenecientes a unos 44 géneros de Poaceae, entre los cuales está *Calamagrostis* (**Cummins** 1971).

20. *Puccinia substriata* Ellis & Bartholomew, Erythea 5: 47. 1897. var. indeterminada.

= *Puccinia pilgeriana* P. Hennings, Engl. Bot. Jahrb. 40:226. 1908.

= *Puccinia tubulosa* Arthur, Am. Jour. Bot. 55:464. 1918. nom. nudum.

= *Puccinia paspalicola* Arthur, Man. Rusts U.S. & Canada. Purdue Res. Found. 438 pp. (p 127). 1934.

Anamorfos: *Uredo cubangoensis* Rangel, Mus. Rio de Janeiro Arg. 18: 160. 1916.

Aecidium tubulosum Patouillard & Gaillard, Bull. Soc. Myc. France 4:97. 1888.

= *Aecidium uleanum* Pазschke, Hedwigia, 31:95. 1892.

= *Aecidium solaniphilum* Spegazzini, Revista Argentina Bot. 1:101. 1925.

Sobre: *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop. (Poaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Marinilla, vereda El Mercado, 2.100 m. alt., 5 Mar 1998, M. Salazar 56, MMUNM 1.017 (II).

Digitaria sanguinalis es nuevo hospedante de *Puccinia substriata*.

21. Puccinosira albida Buriticá & Pardo-Cardona, sp. nov.

Tipo: Sobre: *Triumfetta lapula* L., (Tiliaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Santa Fe de Antioquia, vereda El Espinal, Centro Cotové, Universidad Nacional de Colombia, 550 m. alt., 28 Jul 1997, Pardo-Cardona 387, MMUNM 924 (III).

Spermogoniis epiphyllis, globosis, paucis, oppositis teliosoris, maculis nigeris insidentibus 1 - 2 μ m. Soris teleutosporiferis hypophyllis, raro epiphyllis, albidis, columnaceis; peridia adherentis, hyalinis; cellulae peridii oblongae, 20 - 38 x 12 - 18 μ m, exteriores 4 - 6 μ m, minute verruculosa; sporis elipsoideis vel oblongis, apicis rotundatis vel truncatis, medio leniter constrictis, bicellularis, 12 - 20 x 22 - 30 μ m; pariete levibus, hyalina, usque 1 μ m crassa; cellulae rectangularis intercalaris disjugatis, 8 - 10 x 2,5 - 3 μ m.

Espermogonios epifilos, globosos, pocos, opuestos a los teliosoros, dispuestos en manchas negras de 1-2 μ m. Teliosoros hipófilos, rara vez epifilos, blancos, columnares; peridio adherente, hialino; células oblongas, 20 - 38 x 12 - 18 μ m; pared interior 2 - 3 μ m, exterior 4 - μ m, finamente verrucosa. Teliosporos de elipsoides a oblongos, con terminales redondeados o truncados, separados por células intercalares rectangulares de 8 - 10 x 2,5 - 3 μ m, no o ligeramente constrictos en el septo, bicelulares, ocasionalmente unicelulares, de 12 - 20 x 22 - 30 μ m; pared lisa, hialina, de menos de 1 μ m de espesor.

Puccinia albida difiere de *P. pallidula* (Spegazzini) Lagerheim esencialmente en el color blanco del teliosoro y de los esporos.

22. Ravenelia stevensii Arthur, Mycologia 7: 178. 1915.

Uredo stevensii Arthur, Mycologia 7: 178. 1915.ex Pardo-Cardona, nom. anamorph. nov.

Sobre *Acacia riparia* H.B.K., Mimosaceae (= *Senegalia riparia* (H.B.K.) Britton & Rose ex Britton &

Killip), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Ituango, vereda Cenizas, 1.220 m. alt., 20 sep 1994, Pardo-Cardona 314, MMUNM 587 (II).

R. stevensii es nuevo registro para Colombia, especie que ya está registrada en México, y el tipo fue descrito a partir del mismo hospedante (*A. riparia*) en Puerto Rico (Cummins 1978).

En Pardo-Cardona 314 sólo se halló el estado anamórfico, razón por la cual hemos decidido asignarle nombre de acuerdo al Código de Nomenclatura. La mayor parte de los caracteres morfológicos, tales como la morfología, la ornamentación y el número y distribución de los poros germinativos de los uredosporos, así como la morfología y tamaño de los parafisos, coinciden plenamente con la descripción original.

Es la primera roya que se registra sobre una especie de *Acacia* Mill. (Mimosaceae) en Colombia.

Acacia riparia hace parte de un grupo de Mimosaceae, plantas arbóreas, cuya altura oscila entre 3-5 mts, poco gruesas, no maderables, pero útiles como sombrío, cabos de herramientas, producción de taninos (Pérez-Arbelaéz 1994) y especialmente para recuperación de suelos erosionados.

23. Uredo hyptidis-atrorubentis Mayor, Mém. Soc. Neuchatel Sci. Nat. 5: 593. 1913.

Sobre: *Hyptis lantanaefolia* Poir. (Labiatae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Cisneros, 1.390 m. alt., Nov 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 985.

Hyptis lantanaefolia es nuevo hospedante de *Uredo hyptidis atro-rubentis*. Es el segundo hallazgo de este Uredinal en Colombia pues anteriormente sólo había sido registrado por Mayor sobre *H. atrorubens* en 1913 también en el departamento de Antioquia, y una de sus colecciones (238) fue hecha en el mismo municipio de Cisneros.

24. Uromyces clignyi Patouillard & Hariot, J. Bot. 14: 237. 1900.

Anamorfo: *Uredo anthistiriae* Petch., Ann. R. Bot. Gard. Peradeniya 5: 254 - 255. 1912.

Sobre: *Botriochloa pertusa* (L.) A. Camus (Poaceae), COLOMBIA, municipio de Santa Fe de Antioquia, vereda El Espinal, Centro Cotové (U. Nal.), 550 m. alt., Jul 1997, L.F. Restrepo, MMUNM 970 (II).

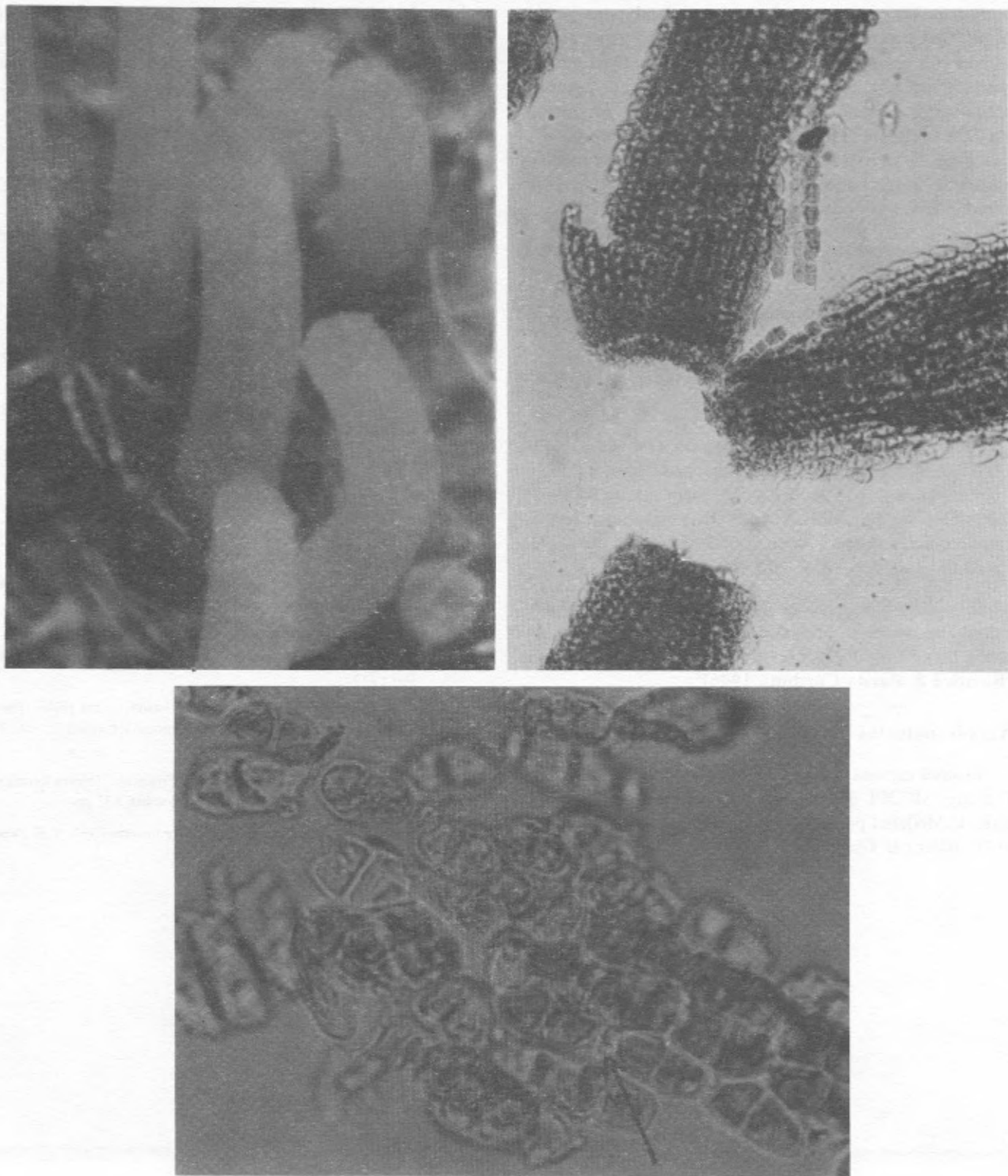


Figura 1. *Puccinosira albida*. Arriba izquierda: hábito de los teliosoros columnares; arriba derecha: aspecto de los teliosoros en el cual se aprecian los teliosporos y el peridio (1 mm = 7,5 μ m); abajo: teliosporos, células intercalares (flecha) (1 cm = 20 μ m). Fotografías a partir del tipo.

Botriochloa pertusa es nuevo hospedante para *Uredo clignyi* en Colombia pues ya lo está en otras regiones del mundo (Cummins 1971). *U. clignyi* es un Uredinal de gran importancia económica en Colombia pues parasita además a *D. aristatum* (Poir.) Hubbard (Pasto Angleton) y a *D. annulatum* (Forsk.) Stapf. (Pasto Climacuna). Es una especie fácilmente reconocible por presentar un uredosoro aparafisado con uredosporos amarillos a café dorados con 7-10 poros dispersos.

25. *Uromyces hedysari-paniculati* (Schweinitz) Farlow, En: Ellis, N. Amer. Fungi 246: 1879

= *Puccinia hedysari-paniculati* Schweinitz, Schrift. Nat. Ges. Leipzig 1:74. 1822.

Anamorfo: *Uredo amagensis* Mayor, Mém. Soc. Neuchatel Sci. Nat. 5:584. 1913.

Sobre: *Desmodium axillare* (Sw) DC (Fabaceae), COLOMBIA, departamento de Antioquia, municipio de Pueblo Rico, carretera Tarso-Pueblo Rico, 1.750 m. alt., 22 Jul 1992, Pardo-Cardona 196, MMUNM 429 (II); municipio de Jericó, carretera hacia Buenos Aires, 2.000 m. alt., 24 Jul 1992, Pardo-Cardona 216, MMUNM 449 (II).

Desmodium axillare es nuevo hospedante de *Uredo hedysari-paniculati*, la cual está registrada en Colombia sobre otras cuatro especies del género del hospedante (Buriticá & Pardo-Cardona 1996).

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos al herbario Gabriel Gutiérrez MEDEL de la Universidad Nacional de Colombia, sede de Medellín por la determinación de los especímenes, al Dr. Halvor B. Gjaerum (NCRI) por su colaboración en la

determinación de algunas especies, al laboratorio LIBUN de la misma Universidad por las facilidades para las microfotografías, y al doctor Pablo Buriticá por la revisión del manuscrito y por sus valiosas sugerencias.

Bibliografía

- Buriticá, C., P., Pardo-Cardona, V.M.. 1996. Flora Uredineana Colombiana. Rev. Acad. Colombiana Cienc. 20 (77):183-236.
- Cummins, G.B. 1978. Rust Fungi on Legumes and Composites in North America. Univ. Arizona Press, Tucson, Arizona, USA. 424 pp.
- Dennis, R.W.G. 1970. Fungus flora of Venezuela and adjacent countries. Kew Bulletin Additional Series, Royal Botanical Garden. Kew, England, 531 pp.
- Hiratsuka, N. et al. 1992. The rust flora of Japan. Tsukuba Shuppankai. Ibaraki, Japan. 2 vols.
- Jackson, H.S. 1931. The rusts of South America based on Holway collections - III. Mycologia 23: 96-116.
- Hennen, J.F., Hennen, M.M., Figueiredo, M.B. 1982. Índice das ferrugens (Uredinales) do Brasil. Arq. Inst. Biol. Sao Paulo 49 (Suppl. 1):1-201.
- Kern, F.D. 1933. The microcyclic species of *Puccinia* on *Solanum*. Mycologia 25 (6): 435 - 441.
- León-Gallego, H.M., Cummins, G.B. 1981. Uredinales (Royas) de México, INIA, SARH de México, Culiacán, México, 439 pp.
- Pardo-Cardona, V.M. 1997. Novedades y correcciones de la flora de Uredinales de Colombia. Rev. Acad. Colombiana Cienc. 21 (80): 209 - 215..
- Pardo-Cardona, V.M. 1994. Índice comentado de las royas (Fungi. Uredinales) del Departamento de Antioquia, Colombia, S.A. Rev. del I.C.N.E. 5 (2): 99-172.
- Pérez-Arbeláez, E. 1994. Plantas útiles de Colombia. Tercera Reedición. Editorial Víctor Hugo. Medellín, Colombia, 831 pp.
- Sydow, H. & P. 1904, 1910. Monographia Uredinearum. Vols. I, II. Reprint 1971. Verlag von J. Cramer, New York.

UNA CALDERA VOLCANICA EN EL MACIZO DE SANTANDER, COLOMBIA

por

Jaime Galvis Vergara*

Resumen

Galvis-Vergara, J.: Una caldera volcánica en el macizo de Santander, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **22**(84): 355-362. ISSN 0370-3908.

Desde la época colonial, se conocen las mineralizaciones auríferas de California y Vetas. Hay publicaciones en las que presentan descripciones de los filones, las paragénesis minerales allí observadas, análisis químicos de oro, plata y otros metales, así como varias hipótesis acerca de la génesis de las ocurrencias minerales. Hay nuevos datos y conceptos, que permiten dar un enfoque diferente a la génesis de las mineralizaciones y a su cronología relativa y absoluta.

Palabras claves: Oro, litología, tectónica, Génesis mineral, Santander, Colombia.

Abstract

The gold mineral occurrences in California and Vetas have been known since the colonial period. There are publications describing the veins, the mineral associations and the results of chemical analysis for gold, silver and several other metals. There are also some hypothesis about the ore genesis. There are new data and concepts which permit a different approach to the genesis of the mineralizations and about their absolute and relative geochronology.

Key Words: Gold, lithology, tectonics, mineral genesis. Santander, Colombia.

Litología

Las unidades litológicas más antiguas que se observan en la región de California y Vetas, son rocas metamórficas, parcialmente migmatizadas o granitizadas y granitoides producto del proceso de migmatización.

Las rocas metamórficas, allí presentes, son neises feldespáticos, neises cuarzofeldespáticos (ver fotografía No. 1), neises biotíticos, cuarcitas, anfibolitas, neises anfibólicos y en algunas zonas próximas, mármoles. Las metamorfitas mencionadas, están ampliamente expuestas en la vertiente septentrional de la cuenca del Río La Baja, en los cursos superiores de las quebradas San Antonio, Agualimpia, Chicagua y San Juan. Hay también amplios afloramientos en el curso superior de la Quebrada La

* Carrera 48G No. 95-19 Bogotá, Colombia.

Plata, a lo largo del cañón del Río Vetas, en los páramos de Vetas, Páez y Romeral y a lo largo de la carretera que conduce de Vetas al caserío de Berlín. En este último sitio, hay exposiciones de cuarcitas que forman cuchillas prominentes. Los afloramientos de los neises, en áreas de alturas superiores a 3.000 metros, son casi continuos.

Los neises feldespáticos parecen ser producto de metamorfismo de sedimentos pelíticos, los neises cuarzofeldespáticos pueden haberse originado en arcosas y areniscas arcillosas. Los neises biotíticos, parecen ser producto de migmatización incipiente de anfibolitas, ya que es frecuente observar biotita reemplazando anfíbol. Las anfibolitas parecen ser producto de metamorfismo de basaltos. Las cuarcitas aún conservan texturas de antiguos sedimentos detríticos, en los metaconglomerados se alcanzan a identificar los guijarros redondeados (ver fotografía No. 2). La presencia de mármoles sugiere que las metamorfitas en cuestión se originaron en sedimentos marinos.

En un sector próximo a California, a lo largo del cañón de la Quebrada San Andrés y en el curso de la Quebrada La Angostura, se encuentran esquistos, cuya relación con las demás metamorfitas mencionadas se desconoce.

Las metamorfitas antes mencionadas, tanto neises como esquistos, se encuentran parcialmente migmatizadas. Se observan rocas metamórficas no afectadas, la típica mezcla de texturas néisicas y granitoides que caracteriza a las migmatitas y rocas de un uniforme aspecto granitoide o pegmatoide (ver fotografía No. 3). Las migmatitas se pueden observar en magníficas exposiciones en las zonas de páramo, donde se identifican estructuras tales como nebulítica, agmática (ver fotografía No. 4), surreítica, schollen, estictolítica, stromática, schlieren, etc. Entre las rocas metamórficas que se presentan en California y Vetas, las cuarcitas aparecen como las más refractarias al fenómeno de migmatización, posiblemente debido a que su carencia de aluminio impidió la formación de feldespatos y micas, minerales que se presentan como un producto del ingreso de álcalis, en dicho fenómeno. Las rocas granitizadas presentan una composición influenciada por la composición de la roca original; por tanto, se presentan granitos alaskíticos originados en metaareniscas, granitos anfibólicos originados en anfibolitas, etc.

Hay amplias extensiones de rocas totalmente granitizadas en el páramo de Berlín y a lo largo de la carretera que conduce de dicha localidad a Vetas.

Cronológicamente, las siguientes unidades litológicas, expuestas en la zona, son sedimentos rojos, tobáceos del

Mesozoico inferior. Generalmente se hallan en forma de espesos prismas de sedimentos detríticos, los cuales no presentan continuidad en sus unidades. Es frecuente encontrar intercalaciones de rocas piroclásticas y en algunas localidades de lavas. Hay exposiciones de sedimentos rojos al Sureste, de California en vecindades de Matanza y al Norte, en el páramo de Cáchira.

A los sedimentos y vulcanitas mencionados, sucede una espesa secuencia de sedimentos marinos del Cretáceo, los cuales pueden hallarse reposando sobre los sedimentos rojos, antes referidos, tal como se presentan en Matanza, o sobre unidades litológicas más antiguas, aún sobre las del Precámbrico, como se encuentran en vecindades de California, en los cursos superiores de las quebradas La Higuera y La Venta. La secuencia de sedimentos marinos del Cretáceo presenta lutitas negras, calizas, cherts, areniscas y algunos niveles de fosforita. Hacia el tope se encuentran sedimentos litorales con algunos mantos de carbón.

Las unidades litológicas mencionadas, en especial las del Precámbrico, se encuentran intruídas por pórfidos riódacíticos y en la Cuchilla de Violetal, al Oriente de California, se presenta un domo volcánico. Allí el edificio volcánico se extiende en un área circular de 9-10 kilómetros cuadrados. Por fuera de ésta, hay además exposiciones de varias apófisis y diques. Hay una amplia variación textural en las rocas magmáticas que se presentan en la Cuchilla de Violetal y sus alrededores, desde una roca equigranular de composición granodiorítica, tal como se observa en la Quebrada Las Animas, hasta un pórfido riódacítico de matriz gris clara y fenocristales bipiramidales de cuarzo (ver fotografía No. 5), tal como se observa en la carretera Vetas-California, en cercanías del puente de la Quebrada Móngora. También se encuentra en forma de roca totalmente afanítica. En la cuenca superior de la Quebrada El Chorrerón, en proximidades de la cumbre de Violetal, se presenta una brecha volcánica con fragmentos de rocas de diversa composición, entre las cuales curiosamente abundan las rocas sedimentarias. En las zonas menos erosionadas, especialmente hacia los páramos, se pueden observar depósitos de cenizas y arenas volcánicas (ver fotografía No. 6).

En la región de Vetas y California se encuentra un pórfido diferente al anteriormente descrito, con fenocristales de feldespato, láminas de biotita y una matriz muy silíceas (ver fotografía No. 7). Este pórfido se ve en vecindades de la Mina El Volcán, en algunos sectores de la cuenca de la Quebrada La Plata y en algunas zonas del cañón del Río La Baja. Su presencia coincide con zonas donde el pórfido de Violetal, las zonas de alteración que éste produjo y las unidades litológicas del Precámbrico,



Fotografía No. 1. Neises feldespáticos, cruzados por una veta. Zona de El Diamante.



Fotografía No. 2. Metaconglomerado cuarzoso, carretera Vetas-El Salado.



Fotografía No. 3. Granito migmatítico. Carretera Vetas- Berlín.



Fotografía No. 4. Textura agmática en migmatita. Vía California-Vetas.



Fotografía No. 5. Pórfido con fenocristales bipiramidales de cuarzo. Vecindades de la quebrada Móngora.



Fotografía No. 6. Ceniza volcánica. Proximidades de Vetas.

aparecen fracturados, en parte totalmente brechados y con abundantes diaclasas abiertas, lo que sugiere que hayan sido sometidos a esfuerzos distensivos. Todo lo anterior lleva a conjeturar que el pórfido biotítico puede ser producto de un nuevo pulso magmático, posterior al que dio lugar al domo volcánico de Violetal.

Las unidades litológicas más recientes, se reducen a tillitas (ver fotografía No. 8), abundantes en las zonas topográficamente más altas, depósitos coluviales a lo largo de los cañones de los ríos La Baja y Vetas y un pequeño depósito aluvial en el curso inferior de la Quebrada Móngora.

Tectónica

Hay un importante sistema de fallas N-S, de las cuales cabe mencionar la falla de Suratá, la cual cruza al Occidente de California. El carácter de esta falla se desconoce, la amplitud de la zona de brechamiento, sugiere la posibilidad que sea direccional. Hay un notorio alineamiento al Oriente de Vetas, el cual cruza por el Páramo de Las Puentes, con dirección N-S. Aparentemente se originó en una falla paralela a la de Suratá.

Alrededor del Cerro de Violetal, hay una serie de fallamientos circulares concéntricos, en la mayor parte de los cuales se presenta pórfidos silicificados los cuales producen relieves positivos en forma de murallas. Estas fallas están relacionadas al emplazamiento del edificio volcánico y a probables colapsos que originaron la formación de la caldera. Las silicificaciones forman un anillo de paredones casi continuo.

Además de lo anterior, se presenta un sistema de fallas NE-SW, de las cuales cabe mencionar la que encauza al Río La Baja, la que encauza a la Quebrada Móngora, una tercera en el cañón de la Quebrada La Plata y una más a lo largo de la cual transcurre la Quebrada El Salado, en cercanías de Vetas. Es importante anotar además, que hay una gran cantidad de fracturas y diaclasas con dirección NE-SW en toda la región.

Génesis mineral

En primer lugar, cabe hacer referencia al anillo de pórfido silicificado que tiene por centro el Cerro de Violetal (ver fotografía No. 9). Esta forma anular se sitúa en el curso inferior del Río Vetas, en ambas márgenes del cañón de dicho río, continúa entre las quebradas Móngora y La Plata a lo largo del Filo de Los Caneyes (ver fotografía No. 10), sigue al Occidente de la Laguna de la Virgen, de allí continúa hacia el Norte, a lo largo de

la cuchilla que sirve de divisoria de aguas entre las quebradas El Aserradero y Páez (ver fotografía No. 11), curvándose hacia la desembocadura de la Quebrada Las Animas en el Río La Baja. De ahí sigue por la vertiente septentrional del río mencionado, donde la cortan las quebradas San Juan, San Antonio, Chicagua y Aguallimpia, y sigue en dirección Suroeste hacia la confluencia de los ríos La Baja y Vetas. A lo largo del anillo se pueden observar paredones de roca muy escarpados y casi desnudos de vegetación. La roca de dicha estructura es pórfido que presenta alteración filíca; se observa muy silicificado y con notable abundancia de muscovita y piritita. Además se encuentra calcopirita en grano fino. Es notable la presencia de minerales secundarios de cobre, principalmente calcantita y en menor proporción carbonatos (ver fotografía No. 12). Los paredones de roca presentan además extensas cubiertas superficiales de jarosita, alunita y epsomita.

La estructura anular descrita, parece haberse originado en un colapso que formó una caldera. Las fallas circulares sirvieron de vía para posterior ingreso de pórfido y de soluciones hidrotermales, las cuales al mezclarse con aguas meteóricas descendentes, determinaron la alteración y las mineralizaciones (Elston, 1994) (Rytuba, 1994). El Cerro de Violetal, parece ser un domo resurgente, ya que hay claros indicios de un previo hundimiento, entre otros, la presencia de una brecha volcánica con bloques de rocas sedimentarias cerca de su cúspide.

A continuación es importante mencionar unas mineralizaciones caracterizadas por presentar abundante sílice calcedónica y paragénesis indicativas de un ambiente epitermal. Dichas ocurrencias minerales se presentan a lo largo de cañón del Río La Baja, en parte de la cuenca de la Quebrada La Plata y en la Mina El Volcán. Las mejores exposiciones se encuentran en el cañón del río La Baja, en el sector de San Celestino y San Antonio y en vecindades de la Quebrada San Juan. Allí se observa brechada, la roca porfirítica con alteración filíca, antes mencionada. (ver fotografía No. 13) y los fragmentos de dicha roca, rodeados de calcedonia de color gris ahumado (ver fotografía No. 14), la cual en algunos sitios toma un color negro. Dicha calcedonia en la zona de la Quebrada San Juan presenta piritita, manchas de cinabrio y un agregado fino de minerales metálicos que parecen ser sulfosales. En San Celestino, la calcedonia presenta tetrahedrita, estibina y piritita. En algunos sectores del cañón del Río La Baja, tales como la Mina Santa Catalina se encuentran además galena y blenda. Las menas de calcedonia se han caracterizado en California y vetas por sus altos contenidos de oro (Ward, Goldsmith,



Fotografía No. 7. Pórfido biotítico. Vecindades de la Mina El Volcán.



Fotografía No. 8. Tillita en Páramo Rico.



Fotografía No. 9. Cerro de Violeta.



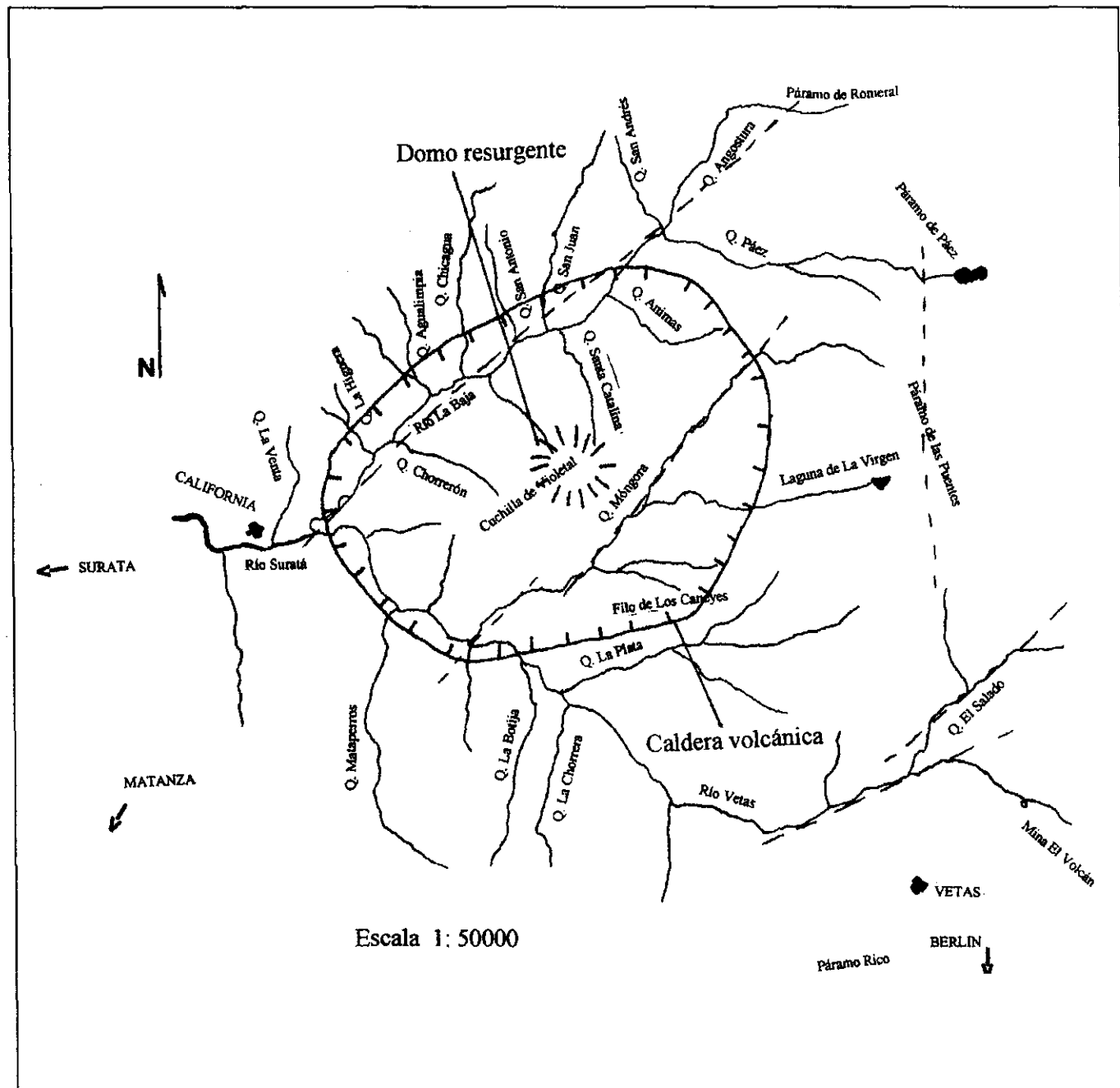
Fotografía No. 10. Paredones silicificados en el Filo de Los Caneyes.



Fotografía No. 11. Silicificaciones en la cuchilla de la divisoria de aguas entre las quebradas Páez y El Aserradero.



Fotografía No. 12. Manchas de calcantita y malaquita en mineralizaciones en vecindades de la Quebrada Agualimpia.



Cruz y Restrepo, 1971). Cabe agregar que dichas menas presentan una alta radioactividad, en especial en San Celestino y San Juan, donde se ha determinado la presencia de varios minerales de uranio, tales como pechblenda, autunita, coffinita, zeunerita, etc. (Polanía, 1982).

La presencia de menas de calcedonia coincide con fallas NE-SW y diaclasas con el mismo rumbo (ver fotografía

No. 15), pero cabe agregar que en La Plata, San Juan y El Volcán, coinciden con la presencia de apófisis de pórfido biotítico, lo que sugiere que dicha roca puede ser el generador de esas mineralizaciones. Más aún, el aspecto de la fracturación en esas zonas, con abundantes diaclasas abiertas (ver fotografía No. 16), parece indicar distensión producida por nuevas intrusiones.



Fotografía No. 13. Mineralización brechada en la cuenca de la Quebrada San Juan.



Fotografía No. 14. Mineralización brechada y soldada por calcedonia de un nuevo evento hidrotermal, en la cuenca de la Quebrada La Plata.



Fotografía No. 16. Enjambre de vetillas de calcedonia con rumbo NE-SW, cerca de la confluencia de los ríos La Baja y Vetas.



Fotografía No. 15. Mineralización de calcedonia con manchas de cinabrio y sulfosales en grano fino. Vecindades de la Quebrada San Juan.



Fotografía No. 17. Diaclasas abiertas en mineralización en vecindades de la Quebrada San Juan.

Referencias Citadas

- Elston, E. W.** 1984. Siliceous Volcanic Centers as Guides to Mineral Exploration : Review and Summary.- *Economic Geology*, 1982. **89**(8): 1662-1686.
- Polanía J. H.** 1982. Mineralizaciones de Uranio y Otros Metales en California : *Geología Norandina* No. 6.
- Rytuba, J. J.** 1994. Evolution of Volcanic and Tectonic Features in Caldera Settings and their Importance in the Location of Ore Deposits : *Economic Geology*, Vol. **89**(8): 1687-1696.
- Ward, E. D., Goldsmith, R., Cruz, J. & Restrepo, H.** 1971. Recursos Minerales de Parte de los Departamentos de Norte de Santander y Santander. *Inventario Minero Nacional*, Tomo III Ingeominas. p. 1-140.

OPTICA ATOMICA ¿LA OPTICA DEL AÑO 2000?

por

Angela M. Guzmán*

Resumen

Guzmán, Angela M.: Optica atómica ¿La óptica del año 2000?. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 22(84): 363-373. 1998. ISSN 0370-3908.

En óptica atómica los papeles de la luz y la materia se invierten con respecto a los de la óptica convencional, dando origen a la posibilidad de manipular átomos con láseres. Esta revisión versa sobre los fundamentos y desarrollos recientes de la Optica Atómica: los métodos de enfriamiento y confinamiento de átomos con láseres, la formación de redes de potencial óptico, la obtención del Condensado de Bose-Einstein (BEC) y el “láser de átomos”. Se describen los rangos esenciales del condensado y de los diferentes modelos teóricos propuestos para la obtención de un haz atómico coherente, señalando los retos tecnológicos involucrados en su implementación. Se mencionan algunas perspectivas y posibilidades de aplicación.

Palabras claves: Optica atómica, Optica cuántica, Condensado de Bose-Einstein, Láser de átomos.

Abstract

In atom optics the roles of light and matter are exchanged with respect to those of conventional optics. Atom optics makes possible the manipulation of atoms with lasers. This review deals with foundations and recent developments on atom optics: laser cooling and trapping, optical lattices, Bose-Einstein Condensation (BEC), and the “atom laser”. Main features of BEC and theoretical models for generation of a coherent atomic beam are described, indicating the technological challenges involved in their implementation. Special attention is devoted to the model of Guzmán et al. Perspectives and possible applications are mentioned.

Key words: Atom Optics, Quantum Optics, Bose-Einstein Condensate, Atom laser.

1. Introducción

La naturaleza de la luz y de la materia ha intrigado al hombre desde hace muchos siglos. Los atomistas griegos ya hablaban de elementos constitutivos de la materia: el aire, el fuego, el agua, la tierra. Los físicos en la actualidad sabemos que los átomos están formados por leptones y bariones y hemos aprendido a no asociar trayectorias con el movimiento de la nube electrónica del átomo. D' Broglie asoció a cada partícula una onda de probabilidad cuya longitud de onda depende de su momentum. En redes cristalinas es posible hacer difracción de electrones cuando su longitud de onda de D' Broglie es comparable a la distancia entre planos interatómicos. Así la materia manifiesta un comportamiento ondulatorio análogo al de la luz, aunque no debe olvidarse que las "ondas" de materia tienen masa y la luz no. Al movimiento del centro de masa de los átomos se asocia también una longitud de onda de D'Broglie. Sin embargo, dado que la masa de un átomo es varios miles de veces mayor que la del electrón, su longitud de onda de D'Broglie es varios miles de veces menor que la de un electrón con la misma energía, lo que dificulta el visualizar el carácter ondulatorio del movimiento del centro de masa.

¿Y qué es la luz? Newton la imaginaba como un haz de partículas, Huygens demostró su comportamiento ondulatorio, Maxwell demostró que la luz portaba momentum y podía ejercer presión sobre la materia, Einstein asoció de nuevo con ella 'corpúsculos' y la electrodinámica cuántica la describe como fotones o cuantos de excitación de un modo del campo de vacío que pueden ser detectados con igual probabilidad en cualquier región del espacio, pero que cuando son absorbidos por la materia le transfieren una cantidad específica de momentum y energía. En la electrodinámica cuántica de cavidades las condiciones de frontera influyen los modos del campo y los "fotones" correspondientes son cuantos de excitación de los modos de campo en la cavidad, que difieren de los modos de campo en el espacio libre. La emisión espontánea de un átomo, que en el espacio libre es irreversible, en una cavidad puede hacerse reversible o incluso, suprimirse. Willis E. Lamb Jr., Premio Nobel de Física 1955 por el descubrimiento del "corrimiento Lamb" en mediciones del espectro del átomo de hidrógeno, ha publicado recientemente un artículo titulado "Anti-photon" (Lamb, 1993) en que plantea el interrogante de si los físicos no le hemos dado al "fotón" una realidad que no le es propia. Según el autor "Por el título de este artículo debería ser claro que al autor no le gusta el uso de la palabra "fotón", que data de 1926. Desde su punto de vista, no existe tal cosa como un fotón. Sólo una comedia de errores y accidentes históricos condujeron a su popularidad entre físicos y científicos en el campo de la óptica.". Entre tanto la fotónica adquiere

relevancia y áreas como la criptografía cuántica despierta interés para la transmisión y codificación de información imposible de intervenir, basándose en la imposibilidad de desdoblarse un fotón.

Aunque la óptica ha sido objeto de estudio desde la antigüedad, con la aparición del láser en 1951 se inició un desarrollo científico y tecnológico vertiginoso. Hoy en día nos son familiares sus múltiples aplicaciones en telecomunicaciones, medicina, industria metálica, etc.

Más recientemente se ha desarrollado un nuevo campo de aplicaciones del láser: la posibilidad de manipular iones y átomos con láseres. Esta aplicación, menos difundida, se basa en la capacidad del láser de producir efectos mecánicos sobre la materia, que ponen de relieve su naturaleza ondulatoria. El desarrollo de técnicas que permiten reflejar, enfocar, difractar o hacer interferir ondas materiales ha dado origen a la **óptica atómica**. Como resultado novedoso y de gran relevancia de la investigación en este campo, se ha producido un nuevo estado de la materia, el condensado de Bose-Einstein, que presenta propiedades de coherencia análogas a las de los láseres convencionales. Este artículo es una revisión de los fundamentos y desarrollos recientes en óptica atómica que no pretende ser exhaustiva, sino brindar al lector una visión general y actualizada del área.

2. Efectos mecánicos de la luz

Mientras los fundamentos físicos de la manipulación de partículas cargadas con campos eléctricos y magnéticos fueron establecidos desde el siglo pasado y sus aplicaciones son la base de la tecnología electrónica en la actualidad, la manipulación de átomos neutros se hizo posible mediante su interacción con láseres.

Si bien Maxwell introdujo conceptos de momentum del campo electromagnético y presión de radiación, los efectos mecánicos de la luz a nivel atómico han sido estudiados en detalle sólo en las últimas dos décadas.

En 1975, Theodor Hänsch y Arthur Schawlow (Hänsch and Schawlow 1975) propusieron el método de enfriamiento Doppler de átomos neutros con láser. El método se basa en la conservación del momentum y la energía en la interacción. Consideremos un haz de átomos y un haz láser contrapropagante con frecuencia ligeramente inferior a la de una transición atómica. Debido a que los átomos se encuentran en movimiento, por efecto Doppler, la frecuencia de la luz y por tanto la energía de un fotón en su sistema de referencia es mayor que la observada en el sistema del laboratorio. Si la diferencia entre la frecuencia propia del átomo y la del láser es igual al corrimiento Doppler, es posible que el átomo absorba un fotón. Mediante el proceso de absorción, el átomo hace una transición a un nivel excitado y adquiere el momentum del fotón absorbido, lo

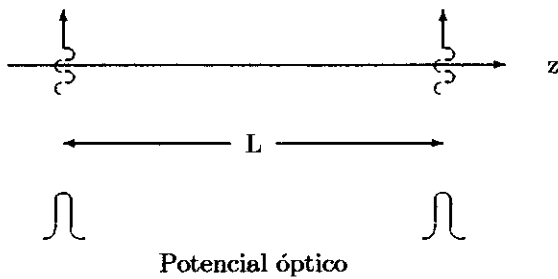


Figura 1. Diagrama de un resonador atómico de tipo Fabry-Pérot

que disminuye su velocidad de propagación. El átomo decae a su estado base por emisión espontánea y adquiere un momentum de retroceso, en dirección aleatoria, igual al momentum del fotón emitido. En promedio sobre varios ciclos de fluorescencia el momentum de retroceso por emisión espontánea es nulo y el láser ejerce una fuerza neta de fricción que reduce la energía cinética de los átomos. La aceleración de frenado resultante es cien mil veces mayor que la aceleración de la gravedad. Análogamente, si el láser tiene mayor frecuencia que la frecuencia propia del átomo y se propaga en la misma dirección del haz atómico, los átomos incrementan su velocidad.

En la década de los 80, dos de los galardonados con el premio Nobel de Física 1997, William Phillips y Claude Cohen-Tannoudji, investigaban, el primero, métodos experimentales para lograr frenar y por lo tanto “enfriar” un haz de átomos mediante láseres, el segundo, teóricamente, buscaba comprender la interacción radiación-materia a nivel atómico, las fuerzas involucradas, los procesos de dispersión y difusión.

Simultáneamente, varios grupos de investigación desarrollaban multiplicidad de montajes y arreglos de láseres que permiten manipular los átomos, en forma análoga a como los dispositivos ópticos permiten manipular la luz, dando origen con ello a la óptica atómica. En la óptica atómica los papeles de la materia y la luz se invierten. Los láseres sirven de espejos para reflejar haces atómicos (Balykin and Letokhov, 1989): el gradiente de intensidad en el perfil de un láser actúa como una barrera de potencial que produce la reflexión. Utilizando dos espejos láser que actúan como “paredes” o potenciales ópticos (Figura 1) es posible construir el análogo atómico de un interferómetro de Fabry-Pérot (Wilkens et al., 1993). La altura de la barrera de potencial óptico depende de la intensidad del láser y de su desintonización con respecto a la frecuencia propia del átomo. Si la frecuencia del láser es mayor que

la frecuencia atómica, los átomos en el estado base ocupan con mayor probabilidad la zona entre los dos láseres.

También es posible producir ondas estacionarias de luz que actúan como rejillas de difracción para haces atómicos (ver p.ej Minogin, 1987). La dispersión coherente resultante de la interacción materia-radiación produce difracción de un paquete de onda atómico. Cuando un átomo atraviesa transversalmente una onda estacionaria generada por dos láseres contrapropagantes y absorbe un fotón, adquiere su momentum. El desdoblamiento por difracción de un paquete de onda es debido a que en un campo resonante las amplitudes de probabilidad se corren en el espacio de momentum en múltiplos del momentum del fotón.

3. Confinamiento tridimensional de átomos neutros

En la década de los 70 se había logrado confinar electrones y aislar iones individuales en experimentos con trampas electromagnéticas. H. Dehmelt y W. Paul, precursores y ejecutores de estos trabajos, recibieron el Premio Nobel en 1989 por su contribución a la espectroscopía de alta resolución. Sin embargo el confinamiento de átomos, debido a su carácter neutro, exigía el uso de técnicas diferentes.

A principios de los 80 se estudiaba la posibilidad de confinar átomos con láseres. En 1985 el físico experimentalista Steven Chu (Chu et al., 1985) y su grupo en Bell Labs. demostraron la posibilidad de confinar tridimensionalmente un gas atómico en la intersección de seis láseres que actuaban como un medio viscoso para los átomos, por lo cual el sistema recibió el nombre de “melaza óptica”. Trabajos posteriores han permitido realizar desarrollos tecnológicos para manipulación genética del ADN mediante láseres y patentar las denominadas “pinzas” ópticas para este uso.

Inicialmente se pensó que el confinamiento en una melaza óptica era producido mediante enfriamiento Doppler, sin embargo, las temperaturas medidas por W. Phillips en una melaza de átomos de Sodio ($40\mu K$), resultaron inferiores a la mínima temperatura obtenible por enfriamiento Doppler, estimada en $240\mu K$.

En 1989, el grupo de la École Normale Supérieure (Dalibard, Cohen-Tannoudji, 1989) presentó la teoría de un nuevo mecanismo de enfriamiento, el método de enfriamiento Sísifo, que involucra el análisis de la interacción de los láseres con los diferentes subniveles magnéticos de los estados excitado y base del átomo. El modelo simple de dos niveles había resultado insuficiente para explicar las bajas temperaturas observadas en la melaza óptica.

En la versión unidimensional del enfriamiento Sísifo, los átomos se mueven en el campo resultante de la super-

posición de dos láseres con polarizaciones lineales perpendiculares entre sí (configuración $lin \perp lin$) y que viajan en direcciones opuestas. La superposición de las ondas genera un gradiente de polarización, que modula espacialmente la energía de los subniveles magnéticos del átomo. Esta modulación actúa como un potencial sinusoidal para el movimiento traslacional de los átomos, denominado potencial óptico. En la Figura 2 se esquematiza el proceso para una transición atómica de un nivel base $J = 1/2$ a un nivel excitado con $J = 3/2$. Los potenciales ópticos sinusoidales correspondientes a los subniveles magnéticos $M = +1/2$ y $M = -1/2$ están desfasados espacialmente. A medida que los átomos se mueven en el campo láser, sufren variaciones de su energía interna que son compensadas por variaciones en su energía traslacional. El efecto de enfriamiento se produce porque la interacción con el láser tiende a mantener los átomos en el estado de más baja energía, de modo que cuando alcanzan una cima del potencial, el láser induce una transición a un pozo del potencial correspondiente al otro subnivel magnético. En su movimiento los átomos se ven obligados constantemente a escalar cimas de potencial a costa de su energía cinética y van disminuyendo su velocidad. El mecanismo de enfriamiento recibió el nombre de enfriamiento Sísifo en alusión al rey griego condenado por toda la eternidad a subir una roca por una colina para dejarla caer y recomenzar sucesivamente.

A principios de la década de los 90, se formulan teorías que predicen la cuantización del movimiento traslacional de átomos en potenciales ópticos (Wilkens et al., 1991; Castin and Dalibard, 1991). Queda abierta la posibilidad de confinamiento atómico dentro de pozos de potencial ópticos de ancho espacial inferior a la longitud de onda λ de la luz, y de profundidad apenas cientos de veces mayor que la energía de retroceso (Figura 3).

La generalización tridimensional del método conduce eventualmente a confinamiento 3D de los átomos en pozos de potencial óptico. La mínima temperatura obtenible por enfriamiento Sísifo es del orden de los microKelvins, temperatura correspondiente a la energía de retroceso $\approx 10^{-10} eV$ que adquiere un átomo al emitir un fotón de la frecuencia del láser utilizado en el proceso de enfriamiento.

La comprobación experimental de la existencia de estados cuantizados de movimiento atómico no se hizo esperar. En 1992 Paul Jessen y sus colegas (Jessen et al., 1992) observaron transiciones de átomos de Rb enfriados con láser mediante espectroscopía de resonancia fluorescente de alta resolución. Los espectros observados fueron claro indicio de la cuantización de la energía del centro de masa de átomos confinados en pozos de potencial óptico y se midió la diferencia de energía entre los niveles vibratoriales correspondientes. Se obtuvo una localización

espacial de los átomos del orden de $\lambda/15$ con un 60% de la población de átomos atrapados en el estado base vibracional del pozo de potencial óptico. En 1993 el grupo francés (Grynberg et al., 1993) presentó evidencia experimental de cuantización del movimiento atómico en los potenciales ópticos bi- y tridimensionales de una melaza óptica de átomos de Cesio mediante espectroscopía Raman estimulada.

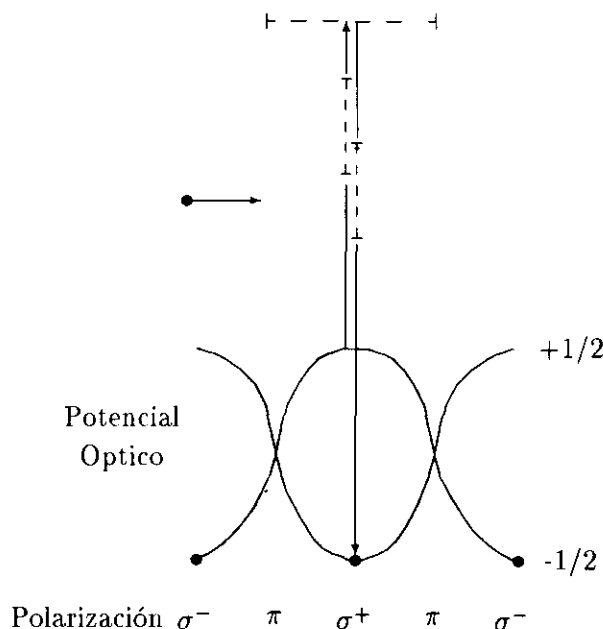


Figura 2. Esquema del proceso de enfriamiento Sísifo.

En 1994 aparecen trabajos (Verkerk et al., 1994; Petas et al., 1994) sobre métodos experimentales para la creación y diseño de redes ópticas bi- y tridimensionales. Aunque el factor de llenado de puntos reticulares de la red obtenido experimentalmente es muy bajo, se producen redes ópticas con diferentes estructuras cristalográficas y se miden las frecuencias de vibración atómicas correspondientes.

Gran esfuerzo teórico se ha dedicado a describir la dinámica de átomos no interactuantes en redes ópticas (Berg-Sørensen et al., 1992; Berg-Sørensen et al., 1993; Marksteiner et al., 1996). En ella intervienen el proceso de enfriamiento por efecto Sísifo, la emisión espontánea y fenómenos de difusión en la red. Para analizar el efecto de la interacción dipolo-dipolo en la dinámica de la red y en posibles fenómenos de transporte, A. Guzmán y P. Meystre (Guzmán and Meystre, 1998)

calcularon los elementos matriciales del potencial dipolo-dipolo eléctrico (Goldstein et al., 1996) para átomos atrapados en una red cúbica de caras centradas (CCC). Se encontró que debido a la anisotropía de la interacción dipolar, los fenómenos de transporte que tienden a alinear los átomos en columnas resultan favorecidos. Estos resultados pueden contribuir a la comprensión de fenómenos de transporte en redes ópticas que pueden tener incidencia en el bajo factor de llenado observado experimentalmente.

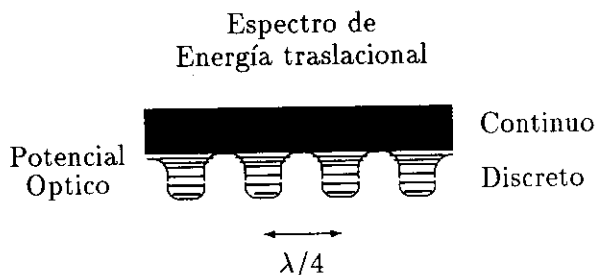


Figura 3. Diagrama de niveles de energía traslacionales para el potencial óptico

4. El condensado de Bose-Einstein

La posibilidad de la existencia de un condensado de bosones fue predicha teóricamente en 1924 por S. N. Bose y A. Einstein: un gas de bosones no interactuantes por debajo de cierta temperatura desarrollará súbitamente una población macroscópica en su estado cuántico de más baja energía.

Por cerca de 15 años numerosos grupos buscaron la condensación de Bose-Einstein en un vapor de Hidrógeno con spin polarizado. La búsqueda del condensado con muestras diluidas de átomos alcalinos enfriados con láser es más reciente, data de principios de esta década. En 1995 el grupo de C. E. Wieman en JILA-NIST de la Universidad de Colorado en Boulder, obtuvo experimentalmente un nuevo estado de la materia: el condensado de Bose-Einstein (Anderson et al., 1995).

Las técnicas de enfriamiento mediante láser desarrolladas en la década pasada habían permitido obtener temperaturas del orden de los microKelvin, pero no suministraban las densidades atómicas necesarias para satisfacer la condición temperatura-densidad requerida para producir el condensado. Había que disminuir la temperatura y/o aumentar la densidad. Para disminuir la temperatura, Wieman encontró una solución: enfriar átomos de ^{87}Rb con láser, confinarlos en una trampa magnética y continuar enfriándolos mediante la técnica de enfriamiento por evaporación. Esta técnica consiste en liberar los átomos más "calientes", dejando que los más "fríos" al-

cancen un nuevo equilibrio térmico por colisiones. Mediante la aplicación de un campo magnético rotante se construyó la trampa TOP (Time orbiting potential) que permitió disminuir las pérdidas de átomos confinados en el centro de la misma. El condensado apareció a una temperatura cercana a los 170nK, a una densidad atómica de $2.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ y pudo ser preservado por más de 15 segundos. Mediante iluminación de la muestra con láseres, se obtuvieron imágenes de la formación y de la expansión del condensado, una vez que es liberado.

5. Láseres de átomos

La condensación de Bose-Einstein, así como la posibilidad real de manipular átomos ultrafríos hicieron revivir el interés por la búsqueda de posibles esquemas de generación de haces atómicos coherentes. Los átomos considerados deben ser bosones, que pueden ocupar un mismo estado cuántico, caracterizado por su estado interno de energía y un estado cuántico de traslación del centro de masa. La cuantización del movimiento del centro de masa se logra mediante confinamiento de los átomos en trampas magnéticas, en pozos de potencial óptico como los generados por enfriamiento de Sísifo, o mediante barreras de potencial como en el resonador atómico de Fabry-Pérot (Wilkins et al., 1993).

En los últimos dos años, el grupo de W. Ketterle en MIT (Ketterle, 1997) ha estudiado las propiedades de coherencia del condensado de Bose-Einstein. Haciendo interferir dos condensados obtuvo franjas de interferencia que evidencian coherencia espacial de largo rango y constituyen una medida directa de la coherencia de primer orden (Andrews et al., 1997).

Como en el caso de las fuentes luminosas, la evidencia de coherencia de primer orden no es conclusiva respecto al estado cuántico del sistema. Luz monocromática, filtrada de la luz emitida por una fuente térmica, puede producir franjas de interferencia con el mismo contraste que un láser. Sin embargo las dos fuentes están caracterizadas por una estadística de fotones diferente: mientras la luz térmica se caracteriza por una distribución exponencial de la probabilidad de detectar un número dado de fotones, la luz láser se caracteriza por una distribución de probabilidad Poissoniana. Para diferenciar una fuente térmica monocromática de un láser, es necesario medir las funciones de correlación de orden superior, es decir, demostrar que el estado cuántico del sistema es un estado coherente. Mediciones recientes de la correlación de segundo orden muestran una gran analogía entre el condensado de Bose-Einstein y el estado cuántico de la luz en un láser (Ketterle and Miesner, 1997).

Sin embargo, desde el punto de vista teórico, se ha explorado la posibilidad de generar haces atómicos cohe-

rentes en un esquema dinámico (Guzmán et al., 1996; Olshanil et al., 1995; Wiseman and Collett, 1995; Spreeuw et al., 1995; Holland et al., 1995). El condensado de Bose-Einstein observado es un estado de equilibrio y de mínima energía de un gas de átomos bosónicos confinados en una trampa. Un láser se obtiene en un estado de no equilibrio mediante manipulación externa que hace posible generar continuamente luz coherente en un proceso dinámico estacionario. Se discute en la literatura (Wiseman, 1997) si un condensado de Bose-Einstein, cayendo bajo la acción de la gravedad puede denominarse "láser de átomos", o si esta denominación debe reservarse para fuentes coherentes y continuas de materia.

Las propuestas teóricas generan expectativas de desarrollar un láser atómico más análogo en su dinámica al láser convencional. A diferencia del condensado, el "láser de átomos" debería provenir de la acumulación de población en un estado propio de energía de una cavidad atómica (no necesariamente en el estado base) y estar descrito por una función de onda coherente, con estadística Poissoniana. Este estado es generado y mantenido mediante un proceso de bombeo adecuado y el haz atómico debe ser extraído de la cavidad manteniendo su coherencia.

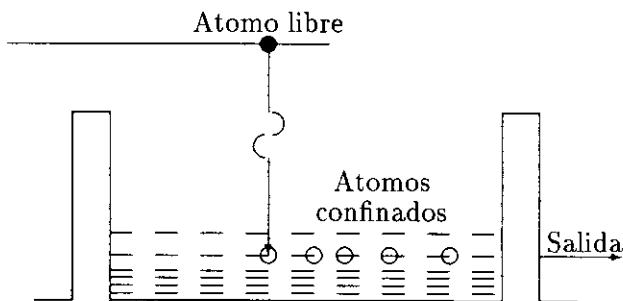


Figura 4. Diagrama de un láser basado en decaimiento por emisión espontánea en un estado confinado de una cavidad óptica

Los modelos propuestos pueden clasificarse en dos grupos: los que consideran átomos no interactuantes (Olshanil et al., 1995; Wiseman and Collett, 1995; Spreeuw et al., 1995) y los que se fundamentan en la interacción entre átomos (Guzmán et al., 1996; Holland et al., 1996). Los primeros demuestran que es posible la acumulación de población de átomos en un modo dado de una cavidad que los rodea y confina su movimiento traslacional. Átomos que se encuentran inicialmente en un estado excitado, no necesariamente confinados en una cavidad, decaen por emisión espontánea al estado base

atómico y simultáneamente quedan confinados en un estado propio de energía traslacional del centro de masa en la cavidad (Figura 4). Dado su carácter bosónico la probabilidad de que otro átomo decaiga en el mismo estado es proporcional al número de átomos que se encuentren en dicho nivel, de modo que la emisión espontánea se ve incrementada por un factor bosónico, que conduce a la acumulación de átomos en un modo de la cavidad. En los trabajos citados no se realiza un análisis sobre las propiedades estadísticas del estado cuántico del conglomerado de átomos, aspecto crucial para determinar su grado de coherencia. La mayor debilidad de estos modelos consiste en ignorar la interacción entre átomos confinados en resonadores ópticos. Por otra parte, el ancho de línea calculado para uno de estos modelos (Wiseman and Collett, 1995) excede notoriamente el límite ideal propuesto por Wiseman en su análisis de las propiedades que debería tener un láser de átomos (Wiseman, 1997).

En la segunda categoría se encuentran: (i) el modelo de la Universidad de Arizona y la Universidad Nacional de Colombia (Guzmán et al., 1996) que introduce un resonador óptico brillante, en que los átomos interactúan con un campo láser y sufren colisiones dipolo-dipolo; (ii) el modelo del grupo de Boulder (Holland et al., 1995) basado en enfriamiento evaporativo. En ambos casos los átomos interactúan, es decir, sufren colisiones, y dicha interacción es el mecanismo que da lugar a la acumulación de población en un estado propio de una trampa atómica. La diferencia básica entre estos modelos de láser atómico y un láser convencional yace precisamente en la interacción inter-atómica: en el caso del láser, los fotones no interactúan y la no linealidad que conlleva a la generación de estados coherentes de la radiación es debida a la interacción con la materia. En el caso atómico, la interacción atómica puede dar lugar a la no linealidad necesaria para generar coherencia en un estado propio de un resonador atómico.

La configuración propuesta por Guzmán et al. para el resonador atómico tridimensional consta de un arreglo bidimensional de cuatro láseres en configuración $lin \parallel lin$ como muestra la Figura 5, dispuesto en un plano perpendicular al eje de un resonador atómico tipo Frabry-Pérot (Figura 1).

El arreglo bidimensional de láseres genera un potencial óptico bidimensional esquematizado en la Figura 6, con su correspondiente diagrama de contorno. Átomos en el estado base y diferentes subniveles magnéticos $M=+1/2$ y $M=-1/2$ experimentan potenciales periódicos desfasados espacialmente cuyos mínimos están indicados en el diagrama de contorno con los signos + y -. Mediante el proceso de enfriamiento es posible confinar átomos en pozos del potencial de la red bidimensional en una configu-

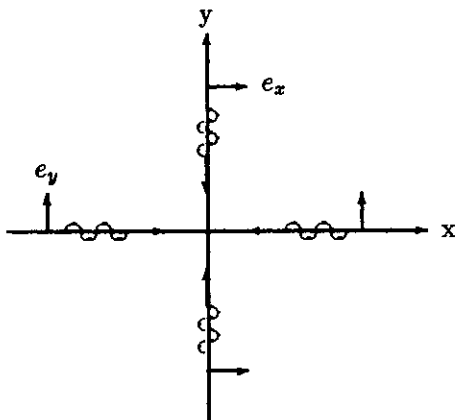


Figura 5. Arreglo bidimensional de láseres en la configuración lin || lin.

ración con proyecciones del momentum angular opuestas en puntos reticulares vecinos, análoga a la de los materiales antiferromagnéticos.

En la dirección perpendicular al plano del arreglo de láseres el confinamiento se obtiene mediante un resonador de Fabry-Pérot (ver Figura 7).

Los niveles de energía del resonador Fabry-Pérot pueden aproximarse por los niveles de un pozo de potencial cuadrado de paredes infinitas:

$$E_n = [n\lambda/2L]^2 E_R, \quad (1)$$

donde E_R es la energía de retroceso del átomo.

El confinamiento atómico tiene lugar en regiones espaciales cilíndricas de longitud L y área transversal de diámetro menor que la longitud de onda λ de la luz (Régimen de Lamb-Dicke). Los átomos confinados poseen un momento de dipolo inducido por el arreglo de láseres. Las colisiones entre ellos son de tipo dipolo-dipolo, interacción de largo alcance que tiene lugar mediante acoplamiento con los modos del campo de vacío, e implica emisión y absorción de fotones (Lenz et al., 1993). Debido al confinamiento transversal la interacción dipolo-dipolo debe tener lugar preferencialmente mediante la emisión y absorción de fotones cuyo momentum sea prácticamente paralelo al eje del resonador Fabry-Pérot atómico (eje z en la Figura 7).

Del cálculo de los elementos matriciales V_{jlm} de la interacción dipolo-dipolo para átomos confinados inicialmente en un mismo estado m del resonador atómico (Chaves y Guzmán, 1998) se obtuvo que el elemento matricial para transferencia de momentum igual al momentum de un fotón en las direcciones paralela o antiparalela al eje del resonador (colisiones inelásticas) es mucho

mayor que aquel que no involucra transferencia de momentum (colisiones elásticas). En la Figura 8 se muestra el elemento matricial en unidades de la energía de retroceso E_0 y en función de la transferencia de momentum M en unidades del momentum del fotón.

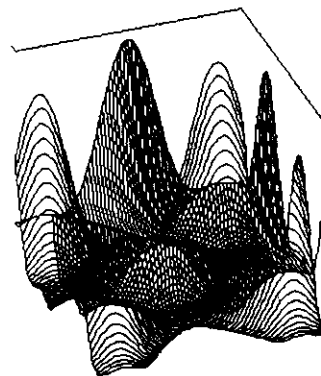
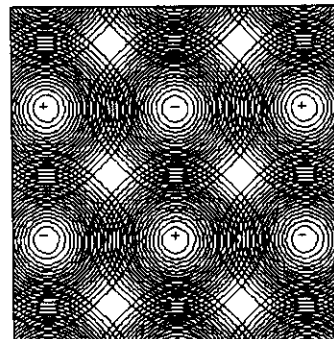


Figura 6. Potencial óptico generado en la configuración lin || lin y su correspondiente diagrama de contorno

Para $L \gg \lambda$, una colisión con transferencia del momentum de un fotón implica una transición entre niveles cuánticos de movimiento del centro de masa con $\Delta n \approx 2L/\lambda \gg 1$. Ello permite reducir el estudio de la dinámica de las colisiones a un conjunto discreto de estados, que a pesar de pertenecer al cuasi-continuo de niveles del Fabry-Pérot, no son contiguos, y aplicar así modelos de tres o cuatro niveles, análogos a los modelos láser.

Las colisiones inelásticas sólo pueden tener lugar absorbiendo o cediendo energía a un depósito. Por tanto en el modelo láser se consideraron colisiones inelásticas que

transfieren uno de los átomos a un depósito. Al desarrollar un análisis de la dinámica de poblaciones en algunos estados (o "modos") del resonador, mediante la teoría cuántica de muchos cuerpos, se encontró (Guzmán et al., 1993) que, para acoplamiento fuerte con el depósito, es posible obtener una distribución tipo Poisson para la población atómica en uno de los "modos" del resonador atómico, característica de un estado cuántico coherente y análoga a la de los estados de la radiación en un láser.

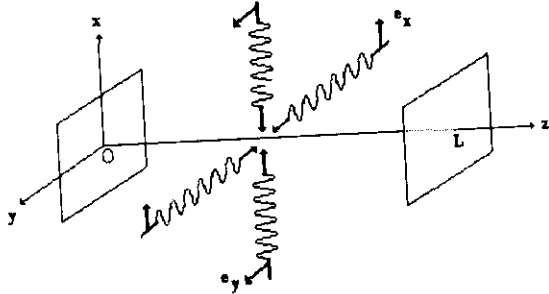


Figura 7. Diagrama de un resonador atómico tridimensional para el modelo láser de átomos de Guzmán et al.

Las colisiones elásticas no modifican la dinámica de las poblaciones en los niveles del Fabry-Perot, pero sí afectan la coherencia de la función de onda que describe el campo atómico.

Un análisis de la dinámica de la fase (Wiseman et al., 1996) de los modelos láser basados en colisiones mostró que las colisiones elásticas, debido a que destruyen la coherencia, producen un crecimiento cuadrático de la tasa de difusión de la fase con el número de átomos en el nivel láser. Para el modelo basado en enfriamiento evaporativo se obtuvo que el ancho de línea del láser de átomos es mucho mayor que el flujo de salida, lo que hace imposible realizar una medición precisa de la fase del campo, debido a que el campo de salida no contiene un número promedio de bosones mucho mayor que 1 (Wiseman, 1997). La contribución predominante al ancho de línea proviene de las colisiones elásticas.

Si la sección eficaz para colisiones elásticas dentro del modo láser fuera despreciable en comparación con la sección eficaz de colisiones inelásticas que acoplan la fuente con el modo láser, como parece ser el caso de las colisiones dipolares en el modelo de A. Guzmán et al., el comportamiento de la fase sería análogo al de un láser óptico y el problema del ancho de línea se solucionaría. Para el modelo de Holland et al., el ancho del espectro de potencia del láser atómico aumenta con la población en el

nivel láser, en tanto que en el de Guzmán et al. disminuiría, en completa analogía con los láseres ópticos.

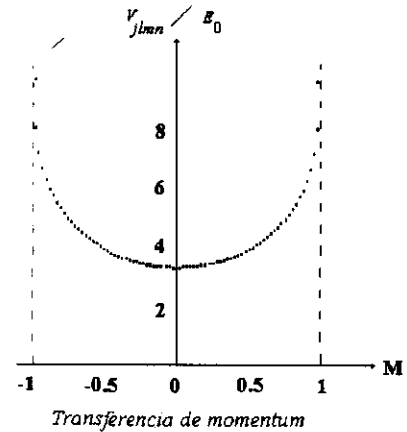


Figura 8. Elemento matricial del operador interacción dipolo-dipolo para colisiones entre átomos en un mismo modo del resonador en función de la transferencia de momentum. (Chaves y Guzmán, 1998).

En todos los modelos se requiere transferir átomos desde una fuente al modo láser, debido a que los átomos siendo partículas materiales no pueden ser creados como los fotones. El bombeo tiene lugar desde un depósito externo a la trampa o desde modos de la trampa energéticamente superiores al modo láser.

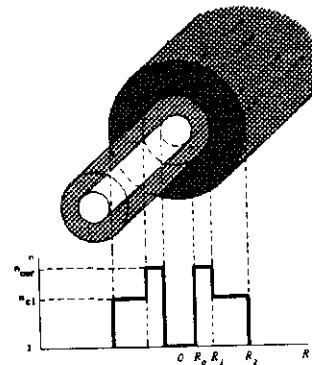


Figura 9. Esquema de una fibra óptica hueca. En la parte inferior se representa el perfil de índice de refracción. La onda evanescente en el núcleo hueco de la fibra produce una pared de potencial óptico que guía los átomos

El mecanismo de remoción de átomos en la trampa para formar un haz coherente de salida constituye otro reto tec-

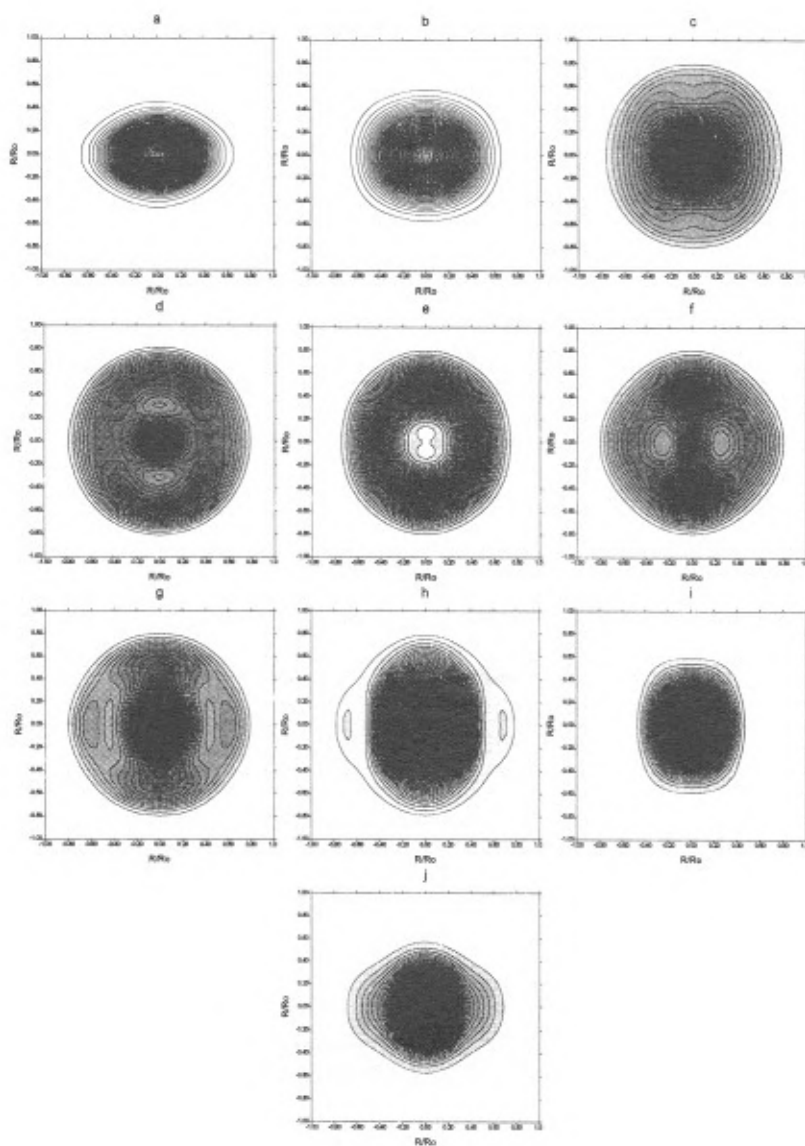


Figura 10. Distribuciones de probabilidad para un haz atómico de entrada no cilíndrico: $a:z = 0\mu\text{m}$, $b:z = 1.57\mu\text{m}$, $c:z = 3.15\mu\text{m}$, $d:z = 4.73\mu\text{m}$, $e:z = 6.31\mu\text{m}$, $f:z = 7.88\mu\text{m}$, $g:z = 9.46\mu\text{m}$, $h:z = 11.04\mu\text{m}$, $i:z = 12.62\mu\text{m}$, $j:z = 14.2\mu\text{m}$

nológico. Experimentalmente se ha realizado un acoplador de salida para el condensado de Bose-Einstein (Mewes et al., 1997) que permitiría generar "pulsos" coherentes de materia; sin embargo no se han estudiado las propiedades de coherencia del "pulso" de salida.

Para transportar el haz coherente sería útil realizar un acoplamiento a una guía de ondas atómicas. Experimentalmente se ha logrado guiar átomos de Rb con un campo láser evanescente en el interior de una fibra óptica hueca como la esquematizada en la Figura 9 (Ito et al., 1996). Se demostró un incremento del flujo atómico en un factor de 20 para una fibra hueca con diámetro interior de $7\mu\text{m}$ y longitud de 3cm . Un análisis de los modos de propagación de haces atómicos a temperaturas del orden de los μK en fibras ópticas huecas ha sido realizado por E. Arévalo y A. Guzmán (Arévalo y Guzmán, 1998). En la Figura 10 se muestran los perfiles de probabilidad para un haz atómico guiado a lo largo del eje z por una fibra hueca de diámetro interior $2\mu\text{m}$. El perfil inicial del haz es elíptico, la temperatura del haz definida con respecto a la energía cinética de los átomos es de $1\mu\text{K}$ y su longitud de onda de D'Broglie de $0.5\mu\text{m}$. Se observa que la propagación es multimodal y que el perfil cambia debido a que los modos involucrados tienen distintas constantes de propagación (Arévalo, 1998).

1 ¿La óptica del 2000?

El Premio Nobel 1997 fué concedido a William Phillips, Claude Cohen-Tannoudji y Steven Chu, por considerar que además de contribuir a una mayor comprensión de la interacción entre luz y materia, su trabajo tiene aplicaciones de gran impacto tecnológico. Las técnicas de enfriamiento desarrolladas y la comprensión del comportamiento cuántico de gases a temperaturas ultrabajas, pueden conducir a un avance muy significativo en la precisión de la medición del tiempo y la longitud. Una de las metas es obtener relojes atómicos con una precisión cien veces mayor que la actual. Los relojes atómicos constituyen el estándar internacional para calibrar el sistema de posicionamiento global (Global Positioning System) basado en señales satelitales. El sistema es usado para navegación espacial y en general para la determinación exacta de posiciones.

Las aplicaciones tecnológicas de haces atómicos coherentes no son fácilmente vislumbrables en la actualidad. Es posible imaginar un gran impacto en la tecnología de deposición de películas, fabricación de microchips ópticos o microláseres. Todos los avances en manipulación de átomos con láseres podrán contribuir a generar una técnica de litografía atómica, que constituiría

la clave para una mayor miniaturización y compacidad de chips electrónicos y optoelectrónicos.

Bibliografía

- Anderson M.H., Ensher J.R., Matthews M.R., Wieman C.E. and Cornell E.A., 1995. Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor. *Science* **269**, 198-201.
- Andrews M.R., Towsend C.G., Miesner H.-J., Durfee D.S., Kurn D. M and Ketterle W., 1997. Observation of interference between two Bose condensates, *Science* **275**, 637-641.
- Arévalo E. y Guzmán A. 1998. Propagación en una guía para átomos. Enviado a III RIAO - OPTILAS'98.
- Balykin V. I. and Letokhov V. S. 1989. Atomic cavity with light induced - mirrors. *Appl. Phys. B*, **48**, 517-523.
- Berg-Sørensen K.J., Castin Y., Bonderup E. and Mølmer K., 1992. *J. Phys. B* **25**, 4195.
- Berg-Sørensen K., Castin Y., Mølmer K., and Dalibard J., 1993. *Europhys. Lett.* **22**, 663.
- Castin Y. and Dalibard J., 1991. Quantization of Atomic Motion in Optical Molasses. *Europhys. Lett* **14**, 761.
- Chaves F., Guzmán A. M. 1998. Interacción dipolo-dipolo de átomos en un resonador Fabry-Pérot. Enviado a III RIAO - OPTILAS'98.
- Chu S., Hollberg L.W, Bjorkholm J.E, Cable A., Ashkin A., 1985. Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.* **55**, 48-51.
- Dalibard J., Cohen-Tannoudji C., 1989. Laser cooling below the Doppler limit by polarization gradients: Simple theoretical models. *JOSA B*, **6**, 2023-2045.
- Goldstein E.V., Pax P. and Meystre P., 1996. Dipole-Dipole interaction in three-dimensional optical lattices. *Phys. Rev. A* **53**, 2604-2615.
- Grynberg G., Lounis B., Verkerk P., Courtois J.-Y., Salomon C., 1993. Quantized motion of cold cesium atoms in two- and three- dimensional optical potentials. *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2249-2252.
- Guzmán A.M., Moore M. and Meystre P., 1996. Theory of coherent atomic-beam generator. *Phys. Rev. A* **53**, 977-984.
- Guzmán A.M., and Meystre P., 1998. Dynamical effects of the dipole-dipole interaction in three-dimensional optical lattices. *Phys. Rev. A* **57**, 1139-1148.
- Hänsch T.W, Schawlow A.L, 1975. *Opt. Commun.* **13**, 68.
- Holland M., Burnett K., Gardiner C., Cirac J. I. and Zoller P., 1996. Theory of an atom laser. *Phys. Rev. A* **54**, R1757-R1760.
- Ito H., Nakata T, Sasaki K, Ohtsu M., Lee K. I., Jhe W. 1996. Laser Spectroscopy of Atoms Guided by Evanescent

Waves in Micron-Sized Hollow Optical Fibers. *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4500.

Jessen P.S., Gerz C., Lett P.D., Phillips W.D., Rolston S.L., Spreuw R.J.C., and Westbrook C.I., 1992. Observation of quantized motion of Rb atoms in a optical field. *Phys. Rev. Lett.* **69**, 49-52.

Ketterle W., 1997. Bose-Einstein-Kondensate - eine neue Form von Quantenmaterie. *Phys. Bl.* **53** Nr.7/8, 678-680.

Ketterle W. and Miesner H.-J., 1997. Coherence Properties of Bose-Einstein condensates and atom lasers. *Phys. Rev. A* **56**, 3291-3293.

Lamb W. E. Jr 1993. Anti-photon. Proceedings of the International Conference on Lasers'92, 1-4, (Society for Optical and Quantum Electronics, Alexandria, VA)

Lenz G., Meystre P. and Wright E.M., 1993. Nonlinear atom optics. *Phys. Rev. Lett.* **71**, 3271-3274.

Marksteiner S., Ellinger K., and Zoller P., 1996. Anomalous diffusion and Lévy walks in optical lattices. *Phys. Rev. A* **53**, 3409-3430.

Mewes M.-O., Andrews M.r., Kurn D.M, Durfee D.S, Towsend C. G. and Ketterle W., 1997. Output Coupler for Bose-Einstein Condensed Atoms. *Phys. Rev. Lett.* **78** 582-585.

Minogin V.G., 1987. Laser light pressure on atoms. Gordon and Breach Science Publishers. OPA (Amsterdam).

Olshanii M., Castin Y. and Dalibard J., 1995. Proceedings of the 12th International Conference on Laser Spectroscopy, ed. M. Inguscio, M. Allegrini and A. Lasso, World Scientific.

Petsas K.L., Coates A.B and Grynberg G., 1994. Crystallography of optical lattices. *Phys. Rev. A* **50**, 5173-5189.

Spreuw R.J.C, Pfau T., Janicke U. and Wilkens M., 1995. Preprint Fakultät für Physik, Universität Konstanz.

Verkerk P., Meacher D.R., Coates A.B, Courtois J.-Y., Guibal S., Lounis B., Salomon C., and Grynberg G., 1994. *Europhys. Lett.* **26**, 171.

Wilkens M., Schumacher E. and Meystre P., 1991. Band theory of a common model of atom optics. *Phys. Rev. A* **44**, 3130-3137.

Wilkens M., Goldstein E., Taylor B. and Meystre P., 1993. Fabry Pérot interferometer for atoms. *Phys. Rev. A* **47**, 2366-2369.

Wiseman H.M. and Collett M.J, 1995. An atom laser based on dark-state cooling. *Phys. Lett. A*, **202**, 246.

Wiseman H., Martins A. and Walls D., 1996. An atom laser based on evaporative cooling. *Quantum Semiclass. Opt.* **8**, 737.

Wiseman H. M., 1997. What is an atom laser?. *Phys. Rev.A* **56**, 2068.

SOBRE LA TEORIA CUANTICA DE LAS MOLECULAS

Original publicado por

M. Born & R. Oppenheimer

Versión castellana por

Arnulfo Poveda*, José Luis Villaveces† y Gloria Esperanza Moyano†

Resumen

Poveda, A., Villaveces, J. L. & Moyano, G. E.: Sobre la Teoría Cuántica de las moléculas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **22**(84): 375-391. 1998. ISSN 0370-3908.

Se muestra que las partes conocidas de los términos espectrales moleculares, correspondientes a la energía de los movimientos electrónicos, rotaciones nucleares y vibraciones nucleares, pueden obtenerse sistemáticamente como los miembros de un desarrollo en serie de potencias de la raíz cuarta de la relación entre la masa del electrón y la masa promedio de los núcleos. El procedimiento lleva a unas ecuaciones para las rotaciones que representan una generalización de la hipótesis de Kramers y Pauli (del trompo con momentum angular intrínseco). También se obtiene una justificación de las observaciones presentadas por Franck y Condon sobre la intensidad de las líneas de banda. Esto se muestra para el caso de las moléculas diatómicas.

Palabras claves: Aproximación de Born-Oppenheimer. Términos espectroscópicos de moléculas Teoría cuántica Teoría de perturbaciones.

Abstract

It is shown that the parts of molecular spectral terms corresponding to electronic motion, nuclear rotational and nuclear vibrational energies may be obtained systematically as members of a power series development on the fourth root of the ratio between the electron mass and the average nuclear mass. Such procedure leads to rotational equations which represent a generalization of the Kramers and Pauli hypotheses (about a top with intrinsic angular momentum). Furthermore, justifications of the Franck and Condon considerations about the band intensities are given. This is shown for diatomic molecules.

Key words: Born-Oppenheimer approximation Spectral terms for molecules Quantum Theory Perturbation theory.

* Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Santa Fe de Bogotá.

† Grupo de Química Teórica, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Santa Fe de Bogotá.

Introducción

Los términos espectroscópicos de las moléculas pueden ser clasificados por ordenes de magnitud (de mayor a menor). El orden de magnitud mayor lo tienen los movimientos electrónicos, luego están las componentes de vibración nuclear y por último las de rotación nuclear, esta comparación se fundamenta en la relación entre la masa de los electrones y la masa de los núcleos.

En un trabajo de Born y Heisenberg¹ sobre este asunto, basado en la teoría cuántica vieja, se propone que las componentes de la energía aumentan en función creciente de $\sqrt{m/M}$, donde m es la masa del electrón y M es la masa promedio de los núcleos, así aparecen las componentes vibracional y rotacional en la ecuación de segundo orden. Sin embargo, esto contradice lo que se había encontrado experimentalmente (al menos para números cuánticos de rotación pequeños).

En este trabajo tratamos el problema, de nuevo en el marco de la teoría cuántica². Así se encuentra que los desarrollos no deben hacerse con base en $\sqrt[2]{m/M}$, sino en $\sqrt[4]{m/M}$. A diferencia del caso anterior, en la serie de la energía, podemos distinguir las vibraciones nucleares en los miembros de segundo orden y las rotaciones en los términos de cuarto orden. Los términos de órdenes primero y tercero desaparecen; la razón de esto en el caso del primer orden depende de la existencia de una posición de equilibrio para los núcleos, donde la energía electrónica para el sistema con los núcleos fijos toma un valor mínimo.

Los términos de cuarto orden para los movimientos rotacionales constituyen una generalización de la hipótesis de Kramers y Pauli³, quienes han reproducido el comportamiento de una molécula usando el modelo de un trompo con momentum angular intrínseco.

Para determinar las funciones propias y, con ellas, las probabilidades de transición, sólo en una aproximación de orden cero se debe llevar a cabo el cálculo de la energía hasta el cuarto orden. También se obtienen así, valores de las probabilidades de saltos simultáneos en los números cuánticos electrónicos, de vibración y de rotación que son

una expresión precisa de los propuestos por Franck⁴ y generalizados por Condon⁵.

En este trabajo no se tratan las aproximaciones de órdenes superiores al cuarto. Tales casos corresponderían a acoplamientos entre los tres tipos básicos de movimiento ya mencionados. Un cálculo de estos efectos sólo tendría sentido si se tuvieran en cuenta, al mismo tiempo, todas las degeneraciones de los movimientos electrónicos para núcleos fijos, sobre todo las degeneraciones resonantes de Heisenberg debidas a la indistinguibilidad de los electrones (y también, dado el caso, de algunos núcleos) y, para las moléculas diatómicas la degeneración de las rotaciones propias alrededor del eje internuclear; nosotros haremos aquí caso omiso de estas situaciones complicadas.

Como ejemplo, consideraremos con detalle las moléculas diatómicas, no sólo con el método general sino también con otro en el cual se tendrán en cuenta las rotaciones mediante separación de variables incluso en una aproximación de orden cero, de modo semejante a como lo hicieron Born y Hückel⁶ en la teoría cuántica vieja.

1. Nomenclatura y definiciones

Simbolizamos las masas y las coordenadas rectangulares de los electrones mediante

$$m, x_k, y_k, z_k,$$

y las de los núcleos por

$$M_1, X_1, Y_1, Z_1.$$

Si M representa el promedio de los valores M_1 de las masas de los núcleos, entonces podemos definir

$$\kappa = \sqrt[4]{m/M} \quad (1)$$

y

$$M_1 = M \frac{1}{\mu_1} = \frac{m}{\kappa^4 \mu_1}; \quad (2)$$

donde los μ_1 son números puros de orden de magnitud 1.

La energía potencial del sistema será

$$U(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots; X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, \dots) = U(x, X); \quad (3)$$

¹ M. Born y W. Heisenberg, *Ann. der Phys.* **74**:1 (1924).

² Para la discusión de los fundamentos de este trabajo tuvimos apoyo, entre otros, del Dr. P. Jordan, a quien deseamos dar nuestros agradecimientos por sus valiosos aportes.

³ H.A. Kramers *Zeitschr. f. Phys.* **13**:343 (1923); H.A. Kramers y W. Pauli **13**:351 (1923).

⁴ J. Franck, *Trans. Faraday Soc.* (1925).

⁵ E. Condon, *Phys. Rev.* **28**:1182 (1926); *Proc. Nat. Acad.* **13**:462 (1927).

⁶ M. Born y E. Hückel, *Phys. Ztschr.* **24**:1 (1923)

Aquí, como en todo lo que sigue, vamos a representar la totalidad de las coordenadas electrónicas con la letra x y las de los núcleos con la letra X . La función U depende solamente de la posición relativa de las partículas. Sin embargo, no utilizaremos sus formas explícitas (como la ley de Coulomb). A la energía cinética de los electrones del sistema le corresponde el operador

$$T_E = -\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \sum_x \sum_k \frac{\partial^2}{\partial x_k^2}, \quad (4)$$

en el cual \sum_x representa la suma de los miembros que aparecen, reemplazando cíclicamente x , por y , por z .

La energía cinética de los núcleos es

$$T_K = -\kappa^4 \frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \sum_x \sum_1 \mu_1 \frac{\partial^2}{\partial X_1^2}, \quad (5)$$

La energía total corresponde al operador

$$H = H_0 + \kappa^4 H_1, \quad (6)$$

donde se ha puesto

$$\begin{cases} T_E + U = H_0 \left(x, \frac{\partial}{\partial x}; X \right), \\ T_K = \kappa^4 H_1 \left(\frac{\partial}{\partial X} \right) \end{cases} \quad (7)$$

Ahora, en lugar de trabajar con las coordenadas rectangulares de los núcleos, vamos a usar $3N-6$ funciones nuevas, es decir

$$\xi_i = \xi_i(X), \quad (8)$$

que fijan la posición relativa de los núcleos entre sí, y 6 funciones

$$\vartheta_i = \vartheta_i(X) \quad (9)$$

que determinan las posiciones de las configuraciones nucleares en el espacio. Esto se puede hacer de manera simétrica introduciendo las coordenadas rectangulares r_1, n_1, λ_1 de los núcleos, que están relacionadas con las posiciones instantáneas de los ejes principales del momento de inercia; entre éstas se establecen las seis ecuaciones

$$\sum_1 M_1 r_1 = 0, \dots \quad \sum_1 M_1 n_1 \lambda_1 = 0, \dots$$

Se puede entonces expresar las r_1, \dots en función de los $3N-6$ parámetros independientes ξ_1, ξ_2, \dots

$$r_1 = r_1(\xi), \dots$$

por lo tanto, entre las coordenadas nucleares antiguas y las nuevas existen las ecuaciones de transformación

$$X_1 = X_0 + \sum_y \alpha_{xy}(\vartheta, \varphi, \psi) n_1(\xi); \quad (10)$$

X_0, Y_0, Z_0 son las coordenadas de los centros de masa y α_{xy} los coeficientes de la matriz ortogonal de rotación, que son funciones conocidas de los ángulos de Euler ϑ, φ, ψ . Los valores $X_0, Y_0, Z_0, \vartheta, \varphi, \psi$ son los señalados con ϑ_i en la ecuación (9). Las X_1 se determinan mediante (10) como funciones de las ϑ_i, ξ_i ; mediante resolución se obtienen las expresiones de (8) y (9)⁷.

Mediante esta transformación la energía H no se separa naturalmente en partes de translación, rotación y movimiento relativo de los núcleos. Sin embargo, H_1 se puede separar en tres partes que se comportan de un modo diferente, que es característico, como sigue

$$H_1 = H_{\xi\xi} + H_{\xi\vartheta} + H_{\vartheta\vartheta}, \quad (11)$$

$H_{\xi\xi}$ es lineal y homogénea en $\frac{\partial^2}{\partial \xi_i \partial \xi_j}$; $H_{\xi\vartheta}$ contiene a

$\frac{\partial}{\partial \xi_i}$; $H_{\vartheta\vartheta}$ es independiente de todas las derivadas con

respecto a ξ_i . Sobre estos operadores todavía se pueden dar conclusiones generales. Si se hace actuar el operador completo H_1 sobre cualquier función $f(\xi)$ de las coordenadas nucleares relativas ξ_i , entonces el valor resultante $H_1 f(\xi)$ de las posiciones en el espacio debe ser independiente de los ϑ_i . Especialmente en $H_{\xi\xi}$, los

coeficientes de $\frac{\partial^2}{\partial \xi_i \partial \xi_j}$ no dependen de ϑ_i . Por el

contrario, en $H_{\xi\vartheta}$ aparecen las derivadas $\frac{\partial}{\partial \xi_i}$ junto con

⁷ El que esta solución conduzca, en general, a funciones ambiguas no juega aquí ningún papel, pero sí tiene importancia física. Compárese con F. Hund, Ztschr. f. Phys. 43:805 (1927).

las ξ_i , las ϑ_i junto con las $\frac{\partial}{\partial \vartheta_i}$ y en H_{99} aparecen las

$$\frac{\partial^2}{\partial \vartheta_i \partial \vartheta_j} \text{ con las } \frac{\partial}{\partial \vartheta_j}, \text{ las } \xi_i \text{ y las } \vartheta_i.$$

Vamos a dar estas funciones de operadores explícitamente para moléculas diatómicas. El problema mecánico que se debe resolver es

$$(H_0 + \kappa^4 H_1 - W)\psi = 0. \quad (12)$$

Mostraremos que la solución, que corresponde a una unión de los núcleos y los electrones en una molécula estable, puede ser obtenida en forma de una serie de potencias de κ .

2. Movimientos electrónicos para núcleos fijos

Si se toma en (12) $\kappa = 0$ se obtiene una ecuación diferencial para los x_k únicamente en la que X_1 figura como parámetro:

$$\left\{ H_0 \left(x, \frac{\partial}{\partial x}; X \right) - W \right\} \psi = 0. \quad (13)$$

claramente ésta corresponde al movimiento de los electrones con los núcleos fijos. Aceptemos que este problema de valores propios está resuelto. Los valores propios sólo dependen de las funciones ξ_i de X_1 .

Entonces se puede hacer coincidir el sistema de coordenadas con el sistema de los ejes principales de inercia, obteniéndose que $X_1 = r_1(\xi)$. En este sistema de ejes, las funciones propias también dependen de los ξ_i , además de depender de los x_k . Pero si se hace la transformación inversa sobre ejes fijos y arbitrarios en el espacio, entonces aparecen también las variables ϑ_i .

Daremos los siguientes nombres al valor propio n -ésimo y a su función propia normalizada correspondiente

$$W = V_n(\xi), \quad \psi = \varphi_n(x; \xi, \vartheta), \quad (14)$$

de tal manera que se cumpla

$$\left\{ H_0 \left(x, \frac{\partial}{\partial x}; \xi, \vartheta \right) - V_n(\xi) \right\} \varphi_n(x; \xi, \vartheta) = 0 \quad (15)$$

Aquí aceptamos que V_n es un valor propio simple. En realidad esto casi nunca es el caso, puesto que, por la indistinguibilidad de los electrones, asociada a la degeneración resonante descubierta por Heisenberg y Dirac, aparece degeneración en el momentum angular alrededor del eje de las moléculas diatómicas. Pero aquí estamos interesados sólo en sistematizar el proceso de aproximación, entonces ignoraremos esa degeneración. El tenerla en cuenta, llevaría a ecuaciones seculares como las de las aproximaciones de órdenes superiores.

La meta más importante de nuestra investigación es comprobar que la función $V_n(\xi)$ juega el papel de energía potencial para los movimientos de los núcleos. Para esto son necesarias algunas fórmulas auxiliares que vamos a deducir. De lo que se trata es de mostrar que la matriz correspondiente al desarrollo del operador

$$H_0 \left(x, \frac{\partial}{\partial x}; \xi, \vartheta \right) \text{ en términos de } \xi_i$$

(por tanto, con $x, \frac{\partial}{\partial x}$ fijos) se puede deducir

desarrollando la función $V_n(\xi)$.

En lugar de construir directamente los desarrollos en ξ_i , reemplazaremos ξ_i por $\xi_i + \kappa \zeta_i$ y diferenciaremos con respecto a κ . El coeficiente de una potencia de κ es entonces un polinomio homogéneo en ζ_i cuyos coeficientes son los desarrollos en ξ_i . Entonces escribimos

$$V_n(\xi + \kappa \zeta) = V_n^0 + \kappa V_n^{(1)} + \kappa^2 V_n^{(2)} + \dots, \quad (16)$$

donde

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } V_n^{(0)} = V_n(\xi), \\ \text{b) } V_n^{(1)} = \sum_i \zeta_i \frac{\partial V_n}{\partial \xi_i}, \\ \text{c) } V_n^{(2)} = \frac{1}{2} \sum_{ij} \zeta_i \zeta_j \frac{\partial^2 V_n}{\partial \xi_i \partial \xi_j}, \\ \dots \end{array} \right. \quad (17)$$

y correspondientemente

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0 = H_0^0 + \kappa H_0^{(1)} + \kappa^2 H_0^{(2)} + \dots, \\ \varphi_n = \varphi_n^{(0)} + \kappa \varphi_n^{(1)} + \kappa^2 \varphi_n^{(2)} + \dots \end{array} \right. \quad (18)$$

Ahora se pueden desarrollar las $\varphi_n^{(1)}$, $\varphi_n^{(2)}$ en términos de las funciones propias $\varphi_n^0(x; \xi, \vartheta)$. Escribimos

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } \varphi_n^{(1)} = \sum_{n'} u_{nn'}^{(1)} \varphi_{n'}^0, \\ \text{b) } \varphi_n^{(2)} = \sum_{n'} u_{nn'}^{(2)} \varphi_{n'}^0, \\ \dots \end{array} \right. \quad (19)$$

Aquí cada $u_{nn'}^{(r)}$ es un polinomio homogéneo de grado r en ζ_i , por ejemplo⁸

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{nn'}^{(1)} = \sum_i \zeta_i \int \overline{\varphi_{n'}^0} \frac{\partial \varphi_n^0}{\partial \xi_i} dx, \\ u_{nn'}^{(2)} = \frac{1}{2} \sum_{ij} \zeta_i \zeta_j \int \overline{\varphi_{n'}^0} \frac{\partial^2 \varphi_n^0}{\partial \xi_i \partial \xi_j} dx. \end{array} \right. \quad (20)$$

Las integrales que aquí aparecen, en las cuales dx representa el elemento de volumen en el espacio de configuraciones de los electrones, son independientes de la orientación del sistema nuclear en el espacio, es decir, de ϑ_i . Estas se pueden calcular en el sistema de los ejes principales del momento de inercia.

Ahora, si F es algún operador dependiente de las x_i , entonces tendremos

$$\int \overline{\varphi_{n'}^0} F \varphi_n^{(r)} dx = F_{nn'}^{(r)} \quad (21)$$

para el elemento matricial de orden r de F . Para $r = 0$ éste se transforma en el elemento matricial acostumbrado

$$F_{nn'}^0 = F_{nn'} = \int \overline{\varphi_{n'}^0} F \varphi_n^0 dx \quad (22)$$

El caso general, de acuerdo con (19) es

$$F_{nn'}^{(r)} = \sum_{n''} u_{nn''}^{(r)} F_{n''n'} \quad (23)$$

Ahora, según (15), cuando $\kappa = 0$

$$(H_0^0 - V_n^0)_{nn'}^{(r)} = u_{nn'}^{(r)} (V_{n'}^0 - V_n^0) \quad (24)$$

Además, sustituyendo (16) y (18) en (15) aparecen las

identidades

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } (H_0^0 - V_n^0) \varphi_n^{(1)} + (H_0^{(1)} - V_n^{(1)}) \varphi_n^0 = 0, \\ \text{b) } (H_0^0 - V_n^0) \varphi_n^{(2)} + (H_0^{(1)} - V_n^{(1)}) \varphi_n^{(1)} + (H_0^{(2)} - V_n^{(2)}) \varphi_n^0 = 0, \\ \dots \end{array} \right. \quad (25)$$

si éstas se multiplican por $\overline{\varphi_n^0}$ y se integran sobre las x_i , entonces se obtiene, teniendo en cuenta (24):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } u_{nn'}^{(1)} (V_{n'}^0 - V_n^0) + (H_0^{(1)})_{nn'} - V_n^{(1)} \delta_{nn'} = 0, \\ \text{b) } u_{nn'}^{(2)} (V_{n'}^0 - V_n^0) + (H_0^{(1)} - V_n^{(1)})_{nn'} + (H_0^{(2)})_{nn'} - V_n^{(2)} \delta_{nn'} = 0, \\ \dots \end{array} \right. \quad (26)$$

de aquí se pueden calcular las expresiones correspondientes a $(H_0^{(1)})_{nn'}$, $(H_0^{(2)})_{nn'}$, ..., es decir, los elementos

$$\text{matriciales } \left(\frac{\partial H_0}{\partial \xi_i} \right)_{nn'}, \left(\frac{\partial^2 H_0}{\partial \xi_i \partial \xi_j} \right)_{nn'}, \dots$$

De estas fórmulas haremos uso luego⁹.

§ 3. Construcción de las ecuaciones de aproximación

Naturalmente, con un procedimiento general de aproximación no se puede tratar cualquier configuración de electrones y núcleos. Aquí trataremos sólo los estados que correspondan a una molécula estable. Por lo tanto, hacemos la siguiente pregunta: ¿Existe un sistema de valores de las coordenadas nucleares relativas ξ_i de tal tipo que las funciones propias ψ_n de los operadores de energía (6), en cuanto a su dependencia de los ξ_i , tomen valores apreciablemente diferentes de cero sólo en una vecindad pequeña de ese sistema de valores?

Este requerimiento de la mecánica ondulatoria corresponde a la condición clásica de que los núcleos sólo llevan a cabo pequeñas vibraciones alrededor del punto de equilibrio; pues $|\psi_n|^2$ es la probabilidad de que, para una energía dada, se tenga una configuración determinada.

⁹ El análogo clásico para las conclusiones más sencillas de estas fórmulas, según las cuales, de (26a) para $n = n'$ se tiene la identidad $(H_0^{(1)})_{nn} = V_n^{(1)}$ se encuentra en W. Pauli, Ann. d. Phys. 68:177 (1922). Compárese especialmente con § 4, fórmula (11).

⁸ \bar{z} es el complejo conjugado de z .

Como sistema no perturbado, tomamos entonces el movimiento de los electrones para una primera configuración cualquiera de los núcleos que no se cambiará después de seleccionada y que denominaremos ξ_i .

Entonces desarrollamos todas las cantidades en términos de pequeñas desviaciones de ξ_i , que denominaremos $\kappa\zeta_i$; así estamos aceptando de antemano que el "rango de vibración" tiende a cero con κ . Suposición que sólo será validada por el éxito

Entonces tendremos como en § 2, (18) el desarrollo

$$H_0\left(x, \frac{\partial}{\partial x}; \xi + \kappa\zeta, \vartheta\right) = H_0^0 + \kappa H_0^{(1)} + \kappa^2 H_0^{(2)} + \dots, \quad (27)$$

donde

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } H_0^0 = H_0\left(x, \frac{\partial}{\partial x}; \xi\right), \\ \text{b) } H_0^{(1)} = \sum_i \zeta_i \frac{\partial H_0}{\partial \xi_i}, \\ \text{c) } H_0^{(2)} = \frac{1}{2} \sum_{ij} \zeta_i \zeta_j \frac{\partial^2 H_0}{\partial \xi_i \partial \xi_j}, \\ \dots \end{array} \right. \quad (28)$$

y según (11), ya que $\frac{\partial}{\partial \xi} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial}{\partial \zeta}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \kappa^4 H_1\left(X, \frac{\partial}{\partial X}\right) = \kappa^4 \left(\frac{1}{\kappa^2} H_{\zeta\zeta} + \frac{1}{\kappa} H_{\zeta\vartheta} + H_{\vartheta\vartheta} \right) \\ = \kappa^2 H_{\zeta\zeta}^0 + \kappa^3 (H_{\zeta\vartheta}^0 + H_{\zeta\zeta}^{(1)}) + \kappa^4 (H_{\vartheta\vartheta}^0 + H_{\zeta\vartheta}^{(1)} + H_{\zeta\zeta}^{(2)}) + \dots \end{array} \right. \quad (29)$$

donde

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } H_{\zeta\zeta}^0 = H_{\zeta\zeta}^0\left(\xi, \frac{\partial^2}{\partial \xi_i \partial \xi_j}\right), \\ \text{b) } H_{\zeta\zeta}^{(1)} = \sum_i \zeta_i \frac{\partial H_{\zeta\zeta}^0}{\partial \xi_i}, \\ \dots \end{array} \right. \quad (30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } H_{\zeta\vartheta}^0 = H_{\zeta\vartheta}^0\left(\xi, \vartheta, \frac{\partial}{\partial \zeta}, \frac{\partial}{\partial \vartheta}\right), \\ \text{b) } H_{\zeta\vartheta}^{(1)} = \sum_i \zeta_i \frac{\partial H_{\zeta\vartheta}^0}{\partial \xi_i}, \\ \dots \end{array} \right. \quad (31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } H_{\vartheta\vartheta}^0 = H_{\vartheta\vartheta}^0\left(\xi, \vartheta, \frac{\partial^2}{\partial \vartheta_i \partial \vartheta_j}\right), \\ \text{b) } H_{\vartheta\vartheta}^{(1)} = \sum_i \zeta_i \frac{\partial^2 H_{\vartheta\vartheta}^0}{\partial \xi_i^2}, \\ \dots \end{array} \right. \quad (32)$$

de aquí en adelante tomaremos los argumentos ξ_i como constantes.

El operador de energía total es, por lo tanto:

$$\left\{ \begin{array}{l} H = H_0^0 + \kappa H_0^{(1)} + \kappa^2 (H_0^{(2)} + H_{\zeta\zeta}^0) \\ \quad + \kappa^3 (H_0^{(3)} + H_{\zeta\vartheta}^0 + H_{\zeta\zeta}^{(1)}) \\ \quad + \kappa^4 (H_0^{(4)} + H_{\vartheta\vartheta}^0 + H_{\zeta\vartheta}^{(1)} + H_{\zeta\zeta}^{(2)}) + \dots \end{array} \right. \quad (33)$$

Los siguientes miembros tienen la misma forma y se generan del miembro con κ^4 aumentando el superíndice en 1.

Ahora desarrollamos la función propia buscada y el parámetro energético en series de potencias de κ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi = \psi^0 + \kappa\psi^{(1)} + \kappa^2\psi^{(2)} + \dots, \\ W = W^0 + \kappa W^{(1)} + \kappa^2 W^{(2)} + \dots \end{array} \right. \quad (34)$$

Después obtenemos las siguientes ecuaciones aproximadas:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } (H_0^0 - W^0)\psi^0 = 0, \\ \text{b) } (H_0^0 - W^0)\psi^{(1)} = (W^{(1)} - H_0^{(1)})\psi^0, \\ \text{c) } (H_0^0 - W^0)\psi^{(2)} = (W^{(2)} - H_0^{(2)} - H_{\zeta\zeta}^0)\psi^0 + (W^{(1)} - H_0^{(1)})\psi^{(1)}, \\ \text{d) } (H_0^0 - W^0)\psi^{(3)} = (W^{(3)} - H_0^{(3)} - H_{\zeta\vartheta}^0 - H_{\zeta\zeta}^{(1)})\psi^0 \\ \quad + (W^{(2)} - H_0^{(2)} - H_{\zeta\zeta}^0)\psi^{(1)} + (W^{(1)} - H_0^{(1)})\psi^{(2)}, \\ \text{e) } (H_0^0 - W^0)\psi^{(4)} = (W^{(4)} - H_0^{(4)} - H_{\vartheta\vartheta}^0 - H_{\zeta\vartheta}^{(1)} - H_{\zeta\zeta}^{(2)})\psi^0 \\ \quad + (W^{(3)} - H_0^{(3)} - H_{\zeta\vartheta}^0 - H_{\zeta\zeta}^{(1)})\psi^{(1)} + (W^{(2)} - H_0^{(2)} - H_{\zeta\zeta}^0)\psi^{(2)} + (W^{(1)} - H_0^{(1)})\psi^{(3)} \end{array} \right. \quad (35)$$

4. Solución de las ecuaciones para las aproximaciones de orden cero y de primer orden

La ecuación de orden cero (35a) representa el movimiento electrónico para los núcleos fijos mencionado en § 2. A partir de la solución que se introdujo en § 2, es decir, la función propia normalizada $\varphi_n^0(x; \xi, \vartheta)$ perteneciente al valor propio $V_n^{(0)} = V_n(\xi)$, se obtiene una solución general de la forma

$$\psi_n^0 = \chi_n^0(\zeta, \vartheta) \varphi_n^0(x; \xi, \vartheta), \quad (36)$$

donde χ_n^0 es, ante todo, una función arbitraria de los argumentos ζ_i, ϑ_j ; ésta debe definirse para obtener la solución de las ecuaciones de aproximación posteriores.

La ecuación de aproximación siguiente (35b)

$$(H_0^0 - W_n^0) \psi_n^{(1)} = (W_n^{(1)} - H_0^{(1)}) \psi_n^0 \quad (37)$$

solo es soluble cuando el lado derecho es ortogonal a ψ_n^0 (con referencia a las coordenadas electrónicas x_i)¹⁰. Esto da la condición

$$\{(H_0^{(1)})_{nn} - W^{(1)}\} \chi_n^0(\zeta, \vartheta) = 0, \quad (38)$$

donde $(H_0^{(1)})_{nn}$ es el elemento diagonal del operador $H_0^{(1)}$, referido a las coordenadas x_i , que de acuerdo con la ecuación (28b) es una función lineal homogénea de los ζ_i . Esta según (38) debe ser constante, puesto que $\chi_n^0(\zeta, \vartheta)$ no puede ser idénticamente cero sin que lo mismo valga para ψ_n^0 . De esto se concluye que

$$W^{(1)} = 0, \quad (H_0^{(1)})_{nn} = 0. \quad (39)$$

Sin embargo, según (26a) y (17)

$$(H_0^{(1)})_{nn} = V_n^{(1)} = \sum_i \zeta_i \frac{\partial V_n}{\partial \xi_i}$$

por lo que también se obtiene

$$\frac{\partial V_n}{\partial \xi_i} = 0. \quad (40)$$

La posibilidad de llevar adelante nuestro procedimiento de aproximación requiere, por consiguiente, que la selección de las coordenadas nucleares relativas ξ_i no sea al azar, sino que se haga de tal modo que éstas correspondan a un valor extremo de la energía electrónica $V_n(\xi)$. La existencia de tal extremo es una condición para la posibilidad de existencia de la molécula, postulado que generalmente se da por cierto. Vamos a mostrar que tal valor extremo debe ser necesariamente un mínimo.

La función $\chi_n^0(\zeta, \vartheta)$ permanece por lo pronto indeterminada, pero si se coloca en (37) $W_n^0 = V_n(\xi) = V_n^0, W_n^{(1)} = 0$ y $\psi_n^0 = \chi_n^0 \varphi_n^0$, entonces se obtiene para $\psi_n^{(1)}$ la ecuación aproximada

$$(H_0^0 - V_n^0) \psi_n^{(1)} = -H_0^{(1)} \varphi_n^0 \chi_n^0. \quad (41)$$

Una solución de ésta, según (25a) es

$$\psi_n^{(1)} = \chi_n^0 \varphi_n^{(1)},$$

donde $\varphi_n^{(1)}$ es la función (19a), definida a partir de (18). La solución general se obtiene adicionando la solución φ_n^0 de la ecuación homogénea por el factor indeterminado por el momento $\chi_n^{(1)}(\xi, \vartheta)$:

$$\psi_n^{(1)} = \chi_n^0 \varphi_n^{(1)} + \chi_n^{(1)} \varphi_n^0. \quad (42)$$

§ 5. Solución de las ecuaciones de segundo y tercer orden: vibraciones nucleares

Pasamos ahora a la ecuación aproximada (35c), la cual, después de sustituir las soluciones ya encontradas, queda:

$$(H_0^0 - V_n^0) \psi_n^{(2)} = (W_n^{(2)} - H_0^{(2)} - H_{\zeta\zeta}^0) \chi_n^0 \varphi_n^0 -$$

$$H_0^{(1)} (\chi_n^0 \varphi_n^{(1)} + \chi_n^{(1)} \varphi_n^0) \quad (43)$$

¹⁰ Definimos la ortogonalidad entre dos funciones $f(x)$ y $g(x)$ mediante la expresión $\int \overline{f(x)}g(x)dx = 0$

Para que (43) sea soluble, de nuevo, la parte derecha debe ser ortogonal a φ_n^0 , de acuerdo con lo mencionado en § 2 y debido a (39), esto lleva a

$$\{(H_0^{(2)} + H_{\zeta\zeta}^0)_{nn} + (H_0^{(1)})_{nn}^{(1)} - W_n^{(2)}\} \chi_n^0 = 0.$$

Pero según (26b), para $V_n^{(1)} = 0$ se produce

$$(H_0^{(2)})_{nn} + (H_0^{(1)})_{nn}^{(1)} = V_n^{(2)} \quad (44)$$

Puesto que $H_{\zeta\zeta}^0$, de acuerdo con (30a) no es dependiente de las X_k tendremos

$$\{H_{\zeta\zeta}^0 + V_n^{(2)} - W_n^{(2)}\} \chi_n^0 = 0. \quad (45)$$

Si se tiene en cuenta el significado dado por (17c) y (30a) a $H_{\zeta\zeta}^0$ y $V_n^{(2)}$, se observa que la ecuación (45) representa las vibraciones nucleares armónicas:

$$\left\{ H_{\zeta\zeta}^0 \left(\xi, \frac{\partial^2}{\partial \zeta_i \partial \zeta_j} \right) + \frac{1}{2} \sum_{ij} \zeta_i \zeta_j \frac{\partial^2 V_n}{\partial \zeta_i \partial \zeta_j} - W_n^{(2)} \right\} \chi_n = 0 \quad (46)$$

Esta ecuación muestra que la función $V_n(\xi)$ juega el papel de energía potencial para los núcleos hasta los miembros de segundo orden. Para establecer la existencia de una molécula estable se requiere de la condición adicional de que el valor extremo determinado mediante (40) debe ser un mínimo de $V_n(\xi)$; pues la forma cuadrática $V_n^{(2)}$ debe ser definida positiva, con lo cual es posible que todos los grados de libertad ζ_i sean estables y sean vibraciones alrededor de la posición de equilibrio. Se sabe que mediante una transformación lineal de las ζ_i de la ecuación (46) en "coordenadas normales" η_i ésta se hace separable. Si $\sigma_{ns}^0(\zeta)$ es la función propia normalizada de (46) correspondiente al valor propio $W_{ns}^{(2)}$, entonces la solución general es

$$\begin{cases} \text{a) } W^{(2)} = W_{ns}^{(2)}, \chi_n^0 = \chi_{ns}^0, \text{ donde} \\ \text{b) } \chi_{ns}^0 = \rho_{ns}^0(\vartheta) \sigma_{ns}^0(\zeta). \end{cases} \quad (47)$$

El índice s debe recorrer los números cuánticos de las vibraciones nucleares. $\rho_{ns}^0(\vartheta)$ es una función indeterminada por el momento de los ϑ_i , que es necesario introducir para seguir adelante con el procedimiento.

Se sabe que $\sigma_{ns}^0(\zeta)$ es combinación lineal de productos de funciones ortogonales de Hermite, de las coordenadas normales separadas η_i ; estas funciones tienen la propiedad de tender a cero muy rápidamente (exponencialmente) fuera de los límites permitidos por la mecánica clásica. Con esto se muestra que nuestro término $(\xi + \kappa\zeta)$ conduce a soluciones que en relación con las oscilaciones de ξ permanecen dentro de los límites que tienden a cero con κ . Usamos también la propiedad de las funciones de Hermite de ser, o bien funciones pares o bien impares de sus argumentos. Si Φ es cualquier operador expresado en términos de las variables ζ_i entonces podemos definir la matriz

$$\Phi_{nn'} = \int \overline{\sigma_{n's}^0} \Phi \sigma_{ns}^0 d\zeta \quad (48)$$

donde $d\zeta$ es el elemento de volumen en el espacio de las coordenadas ζ_i .

Para resolver (43), de acuerdo con (45), colocamos en la parte derecha

$$(W_{ns}^{(2)} - H_{\zeta\zeta}^0) \chi_{ns}^0 = V_n^{(2)} \chi_{ns}^0$$

entonces, (43) queda

$$\{(H_0^0 - V_n^0) \psi_n^{(2)} = \quad (49)$$

$$(V_n^{(2)} - H_0^{(2)}) \chi_{ns}^0 \varphi_n^0 - H_0^{(1)} (\chi_{ns}^0 \varphi_n^{(1)} + \chi_{ns}^{(1)} \varphi_n^0)$$

cuya solución general es

$$\psi_n^{(2)} = \chi_{ns}^0 \varphi_n^{(2)} + \chi_{ns}^{(1)} \varphi_n^{(1)} + \chi_{ns}^{(2)} \varphi_n^0 \quad (50)$$

donde $\chi_{ns}^{(2)}$ es una nueva función indeterminada de ζ_i, ϑ_j , lo cual es fácil de ver con base en las identidades (25).

Ahora examinaremos la ecuación aproximada de tercer orden (35d), la cual, después de sustituir los valores ya determinados, queda

$$\left\{ \begin{aligned} (H_0^0 - V_n^0) \psi_n^{(3)} &= (W^{(3)} - H_0^{(3)} - H_{\zeta\vartheta}^0 - H_{\zeta\zeta}^{(1)}) \chi_{ns}^0 \phi_n^0 \\ &+ (W_{ns}^{(2)} - H_0^{(2)} - H_{\zeta\zeta}^0) (\chi_{ns}^0 \phi_n^{(1)} + \chi_{ns}^{(1)} \phi_n^0) \\ &- H_0^{(1)} (\chi_{ns}^0 \phi_n^{(1)} + \chi_{ns}^{(1)} \phi_n^{(1)} + \chi_{ns}^{(2)} \phi_n^0). \end{aligned} \right. \quad (51)$$

Podemos pensar en desarrollar la parte derecha en términos de las ϕ_n^0 . Para ello, escribimos

$$(H_0^0 - V_n^0) \psi_n^{(3)} = W^{(3)} \chi_{ns}^0 \phi_n^0 - \sum_{n'} F_{nn'}^{(3)} \phi_{n'}^0, \quad (52)$$

donde

$$F_{nn'}^{(3)} = F_{nn'}^{(3,1)} \chi_{ns}^{(2)} + F_{nn'}^{(3,2)} \chi_{ns}^{(1)} + F_{nn'}^{(3,3)} \chi_{ns}^0; \quad (53)$$

Aquí los operadores F, expresados en términos de ζ y ϑ son, en efecto

$$\left\{ \begin{aligned} \text{a)} \quad F_{nn'}^{(3,1)} &= (H_0^{(1)})_{nn'} \\ \text{b)} \quad F_{nn'}^{(3,2)} &= (H_{\zeta\zeta}^0 - H_0^{(2)} - W_{ns}^{(2)})_{nn'} + (H_0^{(1)})_{nn'}^{(1)}, \end{aligned} \right. \quad (54)$$

por ahora sólo podemos decir que $F_{nn'}^{(3,3)}$ es una función homogénea de tercer grado en ζ_i y en $\frac{\partial}{\partial \zeta_i}$. Para que (52)

sea soluble se debe cumplir

$$W^{(3)} \chi_{ns}^0 - F_{nn}^{(3)} = 0$$

esto significa, según (53) y (54a)

$$F_{nn}^{(3,2)} \chi_{ns}^{(1)} = (W^{(3)} - F_{nn}^{(3,3)}) \chi_{ns}^0, \quad (55)$$

donde, de acuerdo con (54b) y (44)

$$F_{nn}^{(3,2)} = H_{\zeta\zeta}^0 - V_n^{(2)} - W_{ns}^{(2)}$$

entonces, (55) es la ecuación inhomogénea que corresponde a la ecuación de vibración (45); ya que (45) tiene por solución la función normalizada σ_{ns}^0 para el valor propio

$W_{ns}^{(2)}$, (55) sólo es soluble cuando la parte derecha, multiplicada por $\overline{\sigma_{ns}^0}$ tiene una integral nula en el espacio de coordenadas ζ . Debido a (47b), esto da la siguiente ecuación diferencial para $\rho_{ns}^0(\vartheta)$:

$$\left(F_{nn}^{(3,3)} - W^{(3)} \right) \rho_{ns}^0 = 0.$$

Pero como nosotros ya vimos, $F_{nn}^{(3,3)}$ es función impar de ζ_i y $\frac{\partial}{\partial \zeta_i}$, entonces el elemento diagonal de la matriz ζ correspondiente debe anularse. Si se hace la transformación a las coordenadas normales η_i , entonces σ_{ns}^0 se convierte en una suma de productos de polinomios ortonormales de Hermite, $F_{nn}^{(3,3)}$ es un polinomio de orden impar en η_i y en $\frac{\partial}{\partial \eta_i}$, de tal manera que cada miembro contiene al

menos una de las η_i o de las derivadas $\frac{\partial}{\partial \eta_i}$ en potencia

impar; por lo tanto, al formar la matriz ζ desaparece cada miembro independiente. Por lo tanto, se obtiene

$$W^{(3)} = 0, \quad (56)$$

y ρ_{ns}^0 sigue permaneciendo indeterminada.

Ahora podemos resolver (55)

$$\chi_{ns}^{(1)} = S_{ns}^{(1)} \rho_{ns}^0, \quad (57)$$

donde $S_{ns}^{(1)}$ corresponde al siguiente operador en relación con ϑ_i :

$$S_{ns}^{(1)} = \sum_{s'}' \frac{F_{nn}^{(3,3)} \sigma_{ns'}^0}{W_{ns}^{(2)} - W_{ns'}^{(2)}}. \quad (58)$$

Finalmente, la solución de (52) será

$$\psi_n^{(3)} = \sum_{n'}' \frac{F_{nn'}^{(3,3)} \phi_{n'}^0}{V_n^0 - V_{n'}^0}, \quad (59)$$

que de acuerdo con (53), tiene la forma

$$\Psi_n^{(3)} = \sum_{n'} (G_{nn'}^{(3,1)} \chi_{ns}^{(2)} \varphi_{n'}^0 + G_{nn'}^{(3,2)} \chi_{ns}^{(1)} \varphi_{n'}^0 + G_{nn'}^{(3,3)} \chi_{ns}^0 \varphi_{n'}^0) \quad (60)$$

donde se ha puesto

$$G_{nn'}^{(3,2)} = \frac{F_{nn'}^{(3,2)}}{V_n^0 - V_{n'}^0} \quad (61)$$

De acuerdo con (54), $G_{nn'}^{(3,1)}$ es un número, $G_{nn'}^{(3,2)}$ un operador diferencial relacionado con ζ_i , $G_{nn'}^{(3,3)}$ un operador relacionado con ζ_i y ϑ_j .

Según § 2, (26a) es

$$\sum_{n'} G_{nn'}^{(3,1)} \chi_{ns}^{(2)} \varphi_{n'}^0 = \sum_{n'} \frac{(H_0^{(1)})_{nn'} \varphi_{n'}^0}{V_n^0 - V_{n'}^0} \chi_{ns}^{(2)} =$$

$$\sum_{n'} u_{nn'}^{(1)} \varphi_{n'}^0 \chi_{ns}^{(2)} = \varphi_n^{(1)} \chi_{ns}^{(2)}$$

por lo que también se hará

$$\Psi_n^{(3)} = \varphi_n^{(1)} \chi_{ns}^{(2)} + \sum_{n'} (G_{nn'}^{(3,2)} \chi_{ns}^{(1)} \varphi_{n'}^0 + G_{nn'}^{(3,3)} \chi_{ns}^0 \varphi_{n'}^0) \quad (62)$$

6. Soluciones de las ecuaciones de cuarto orden de aproximación y órdenes superiores: rotaciones y efectos de acoplamiento.

Después de sustituir los resultados ya obtenidos en (35e), la ecuación aproximada de cuarto orden (35e) queda:

$$\left\{ \begin{aligned} (H_0^0 - V_n^0) \Psi_n^{(4)} &= (W^{(4)} - H_0^{(4)} - H_{ss}^0 - H_{\zeta\zeta}^{(2)} - H_{\zeta\zeta}^{(2)}) \chi_{ns}^0 \varphi_n^0 \\ &\quad - (H_0^{(3)} + H_{\zeta\theta}^0 + H_{\zeta\zeta}^{(1)}) (\chi_{ns}^{(0)} \varphi_n^0 + \chi_{ns}^0 \varphi_n^{(1)}) \\ &\quad + (W_{ns}^{(2)} - H_0^{(2)} + H_{\zeta\zeta}^0) (\chi_{ns}^{(2)} \varphi_n^0 + \chi_{ns}^{(1)} \varphi_n^{(1)} + \chi_{ns}^0 \varphi_n^{(2)}) \\ &\quad - H_0^{(1)} \{ \varphi_n^{(1)} \chi_{ns}^{(2)} + \sum_{n'} (G_{nn'}^{(3,2)} \chi_{ns}^{(1)} \varphi_{n'}^0 + G_{nn'}^{(3,3)} \chi_{ns}^0 \varphi_{n'}^0) \} \end{aligned} \right. \quad (63)$$

Una vez más, desarrollamos la parte derecha de acuerdo con φ_n^0 :

$$(H_0^0 - V_n^0) \Psi_n^{(4)} = W^{(4)} \chi_{ns}^0 \varphi_n^0 - \sum_{n'} F_{nn'}^{(4)} \varphi_{n'}^0, \quad (64)$$

donde

$$F_{nn'}^{(4)} = F_{nn'}^{(4,2)} \chi_{ns}^{(2)} + F_{nn'}^{(4,3)} \chi_{ns}^{(1)} + F_{nn'}^{(4,4)} \chi_{ns}^0; \quad (65)$$

aquí

$$F_{nn'}^{(4,2)} = (H_{\zeta\zeta}^{(0)} - H_0^{(2)} - W_{ns}^{(2)})_{nn'} + (H_0^{(1)})_{nn'}^{(1)} \quad (66)$$

y esta es idéntica a $F_{nn'}^{(3,2)}$ en (54b), mientras que $F_{nn'}^{(4,3)}$ es de orden impar en ζ_i , $\frac{\partial}{\partial \zeta_i}$; $F_{nn'}^{(4,4)}$ es de orden par. La

condición de integrabilidad de (64) es

$$W^{(4)} \chi_{ns}^0 - F_{nn}^{(4)} = 0;$$

esto significa, de acuerdo con (65):

$$F_{nn}^{(4,2)} \chi_{ns}^{(2)} = (W^{(4)} - F_{nn}^{(4,4)}) \chi_{ns}^0 - F_{nn}^{(4,3)} \chi_{ns}^{(1)}. \quad (67)$$

La parte izquierda, debido a (66), está totalmente de acuerdo con la ecuación de vibración (45). La parte derecha, por lo tanto, debe ser normal a σ_{ns}^0 . Si sustituimos los valores de $\chi_{ns}^{(1)}$ y $\chi_{ns}^{(2)}$ de (47b) y (57) y usamos el símbolo

$$\left\{ \begin{aligned} (\Phi)_{ss'}^{(1)} &= \int \overline{\sigma_{ns}^0} \Phi S_{ns}^{(1)} d\zeta \\ &= \sum_{s''} \frac{(\Phi F_{nn}^{(3,3)})_{ss''}}{W_{ns}^{(2)} - W_{ns''}^{(2)}} \end{aligned} \right. \quad (68)$$

entonces se obtiene

$$\left\{ F_{nn}^{(4,4)} + (F_{nn}^{(4,3)})_{ss}^{(1)} - W^{(4)} \right\} \rho_{ns}^0 = 0. \quad (69)$$

esta ecuación es la que finalmente determina $\rho_{ns}^0(\vartheta)$, es decir, el movimiento del sistema de los ejes principales de inercia en el espacio, las translaciones y rotaciones. El término principal del operador en (69) es aquel que contiene la segunda derivada con respecto a ϑ_i ; una mirada a (63) muestra que surge de $H_{99}^0 \chi_{ns}^0 \varphi_n^0$, a él corresponde, por lo tanto, en $F_{nn}^{(4,4)}$ el término,

$$\overline{(H_{99}^0)}_n = \int \overline{\varphi_n^0 H_{99}^0 (\varphi_n^0 \dots)} dx, \quad (70)$$

donde, en el lugar de los puntos se debe colocar la función sobre la cual actúa el operador. Puesto que el operador (70) es independiente de los ζ_i , entonces los miembros de la diagonal de la matriz correspondiente son idénticamente iguales a él. El hecho de que, en lugar del operador sencillo H_{99}^0 intervenga el complicado $\overline{(H_{99}^0)}_n$ significa físicamente que hay un acoplamiento del movimiento de rotación de los núcleos con el movimiento de los electrones. De lo que se trata, como veremos luego en el ejemplo de las moléculas diatómicas, es del efecto que habían intentado representar Kramers y Pauli¹¹ mediante el modelo de un trompo impulsado que gira. Dado que, en (69) hay términos que se obtienen del operador $H_{\zeta 9}$, ellos corresponden a un acoplamiento del movimiento del trompo con momentum angular, que se obtiene debido a las vibraciones de los núcleos. Finalmente, hay miembros que, puesto que no dependen de ϑ_i , dan una contribución adicional de orden κ^4 a la energía de vibración.

Puesto que las translaciones siempre se dejan separar trivialmente, nos ocuparemos de las rotaciones. Si r es el número cuántico correspondiente, entonces para la solución de (70) se debe escribir:

$$W^{(4)} = W_{nsr}^{(4)}; \quad \rho_{ns}^0 = \rho_{nsr}^0(\vartheta) \quad (71)$$

así se puede resolver (67) y finalmente (64). Sin embargo, no tiene sentido escribir las fórmulas explícitamente.

Queda claro que el procedimiento se puede continuar sin que en ello aparezca, en principio, algo nuevo. Las aproximaciones de orden superior describen los acoplamientos entre rotaciones, vibraciones y movimientos electrónicos. No vuelven a aparecer números cuánticos nuevos aparte de los ya introducidos.

Ahora haremos un resumen de los aspectos característicos de la solución encontrada. El resultado más evidente es que para la determinación completa, así sea sólo en orden cero, de las funciones propias, es necesario resolver las ecuaciones diferenciales hasta el cuarto orden, pues se tiene

$$\Psi_{nsr}(x, \zeta, \vartheta) = \varphi_n^0(x, \zeta, \vartheta) \sigma_{ns}^0(\zeta) \rho_{nsr}^0(\vartheta) + \dots, \quad (72)$$

donde φ_n^0 es la función propia del movimiento electrónico para núcleos fijos, σ_{ns}^0 es la función propia de las vibraciones nucleares y ρ_{nsr}^0 la de las rotaciones. Aquí se deben tener en cuenta las coordenadas de vibración ζ_i desde una posición de equilibrio ξ_i , que está determinada por la condición de que, en ella, la energía del movimiento electrónico $V_n(\xi)$ es un mínimo. La determinación de las tres funciones φ_n^0 , σ_{ns}^0 y ρ_{nsr}^0 produce al mismo tiempo la energía hasta el cuarto orden, es decir:

$$W_{nsr} = V_n^0 + \kappa^2 W_{ns}^{(2)} + \kappa^4 W_{nsr}^{(4)} + \dots; \quad (73)$$

en la que V_n^0 es el valor mínimo de la energía electrónica que corresponde a la molécula rígida en observación, $W_{ns}^{(2)}$ es la energía de las vibraciones nucleares y $W_{nsr}^{(4)}$ es la energía de las rotaciones (junto con algunos términos adicionales de la energía de vibración). En esta aproximación (hasta κ^4) aparecen "separados" los tres tipos básicos de movimiento; si se quiere averiguar los acoplamientos deben tenerse en cuenta potencias más altas de κ .

Con base en (72) se pueden sacar conclusiones sobre las probabilidades de transición (intensidades de las líneas de banda).

El momento dipolar de la molécula \mathfrak{M} se deja descomponer en una parte de los núcleos \mathfrak{N} y otra de los electrones \mathfrak{p} , siendo una componente

¹¹ H.A Kramers y W. Pauli, Ztschr. f. Phys. 13:343, 351 (1923).

$$\mathfrak{M}_x = \mathfrak{M}_x + \mathfrak{p}_x, \begin{cases} \mathfrak{M}_x = \sum_1 e_1 X_1, \\ \mathfrak{p}_x = e \sum_k X_k. \end{cases} \quad (74)$$

De aquí se construye la serie dependiente de los elementos matriciales relativos a $X_k, \zeta_i, \vartheta_j$; en primer lugar

$$(\mathfrak{p}_x)_{n'}^n = \int \mathfrak{p}_x \varphi_n^0 \overline{\varphi_{n'}^0} dx \quad (75)$$

es una función de ζ_i, ϑ_j , luego

$$(\mathfrak{p}_x)_{n's'}^{ns} = \int (\mathfrak{p}_x)_n \sigma_{ns}^0 \overline{\sigma_{n's'}^0} d\zeta, \quad (\mathfrak{M}_x)_{n's'}^{ns} =$$

$$\int \mathfrak{M}_x \sigma_{ns}^0 \overline{\sigma_{n's'}^0} d\zeta \quad (76)$$

son sólo funciones de ϑ_j , finalmente

$$\begin{cases} (\mathfrak{p}_x)_{n's'r'}^{nsr} = \int (\mathfrak{p}_x)_{n's'} \rho_{nsr}^0 \overline{\rho_{n's'r'}^0} d\vartheta, \\ (\mathfrak{M}_x)_{n's'r'}^{nsr} = \int (\mathfrak{M}_x)_{n's'} \rho_{nsr}^0 \overline{\rho_{n's'r'}^0} d\vartheta \end{cases} \quad (77)$$

son constantes numéricas que determinan la intensidad de la transición $nsr \rightarrow n's'r'$. Esta construcción paso a paso puede interpretarse como si a cada salto del electrón $n \rightarrow n'$ perteneciera un oscilador virtual con momento $(\mathfrak{p}_x)_n$, a éste se superpone la matriz $(\mathfrak{p}_x)_{n's'}$, que

corresponde a un sistema de bandas vibracionales (transiciones $s \rightarrow s'$) de acuerdo con una regla que se aparta algo de lo usual, según la cual se utiliza una función propia del nivel electrónico bajo y otra del nivel electrónico alto [Fórmula (76)]. Lo correspondiente se repite para las líneas de una banda (transiciones $r \rightarrow r'$).

Aquí están contenidas las estimaciones hechas primeramente por Franck¹², ampliadas luego por Condon¹³, sobre la intensidad de las bandas de vibración.

De manera precisa, la estimación de estas intensidades depende sólo del comportamiento de las funciones $V_n(\xi)$ y $V_{n'}(\xi)$. Sólo en la vecindad de sus mínimos las funciones propias correspondientes a $\sigma_{ns}^0, \sigma_{n's'}^0$ difieren apreciablemente de cero y por lo tanto su producto sólo difiere de cero cuando ellas se superponen. Cuando la función $V_n(\xi)$ cambia sólo un poco en su forma por un salto electrónico $n \rightarrow n'$, entonces las bandas debidas a pequeños cambios de s son intensas, pero si $V_n(\xi)$ cambia fuertemente debido a la transición $n \rightarrow n'$, entonces sólo es posible una superposición del intervalo en el cual las $\sigma_{ns}^0, \sigma_{n's'}^0$ no cambian, para diferencias muy grandes $s - s'$. Estos comportamientos fueron discutidos cuantitativamente por Condon. Apreciaciones similares deben poder desarrollarse, *mutatis mutandis*, también para las rotaciones.

7. Caso especial de las moléculas diatómicas

Como ejemplo, trataremos de modo abreviado las moléculas diatómicas. Para éstas se tiene además de la degeneración de resonancia debida a la indistinguibilidad de los electrones, otra degeneración adicional, en la cual a cada valor de energía corresponden dos movimientos con momentos angulares iguales alrededor de la línea de unión de los núcleos pero con sentido contrario, pero como aquí no haremos una discusión sobre la estructura fina de las bandas, dejaremos de lado esa degeneración. Por lo tanto, delimitaremos nuestras observaciones a aquellos casos donde el momentum angular alrededor del eje se anula y donde la energía del movimiento electrónico no depende del mismo o depende muy poco.

Para dos núcleos tenemos sólo una coordenada ξ , la distancia nuclear ξ , y cinco coordenadas ϑ , es decir, las coordenadas del centro de masa X_0, Y_0, Z_0 y las coordenadas polares ϑ, ω del eje de unión de los núcleos.

La energía cinética de los núcleos será:

¹² J. Franck, Trans. Faraday Soc. (1925).

¹³ E. Condon, Phys. Rev. 28:1182 (1926); Proc. Nat. Acad. 13:462 (1927).

$$T_K = -\kappa^4 \frac{h^2}{8\pi^2 m} \left\{ \Delta_0 + \frac{\mu}{\xi^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \right) + \frac{\mu}{\xi^2} \Delta_9 \right\}, \quad (78)$$

donde se ha puesto

$$\kappa = \sqrt[4]{\frac{m}{M_1 + M_2}}, \quad \mu = \frac{(M_1 + M_2)^2}{M_1 M_2} \quad (79)$$

y

$$\begin{cases} \Delta_0 = \frac{\partial^2}{\partial X_0^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y_0^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z_0^2}, \\ \Delta_9 = \frac{1}{\sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2}{\partial \omega^2} + \frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial}{\partial \vartheta} \right). \end{cases} \quad (80)$$

Por lo tanto tenemos

$$\begin{cases} H_{\xi\xi} = -\frac{h^2}{8\pi^2 m} \mu \frac{\partial^2}{\partial \xi^2}, \\ H_{\xi\vartheta} = -\frac{h^2}{8\pi^2 m} \frac{2\mu}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi}, \\ H_{\xi\xi} = -\frac{h^2}{8\pi^2 m} \left(\Delta_0 + \frac{\mu}{\xi^2} \Delta_9 \right). \end{cases} \quad (81)$$

si se reemplaza ξ por $\xi + \kappa\zeta$ y se construye el desarrollo en κ , entonces se obtiene

$$\begin{cases} H_{\zeta\zeta}^0 = -\frac{h^2}{8\pi^2 m} \mu \frac{\partial^2}{\partial \zeta^2}, \\ H_{\zeta\zeta}^{(p)} = 0, \quad p = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (82)$$

$$\begin{cases} H_{\zeta\vartheta}^0 = -\frac{h^2}{8\pi^2 m} \frac{2\mu}{\xi} \frac{\partial}{\partial \zeta}, \\ H_{\zeta\vartheta}^{(1)} = \frac{h^2}{8\pi^2 m} \frac{2\mu}{\xi^2} \zeta \frac{\partial}{\partial \zeta}, \\ \dots \end{cases} \quad (83)$$

$$\begin{cases} H_{99}^0 = -\frac{h^2}{8\pi^2 m} \left(\Delta_0 + \frac{\mu}{\xi^2} \Delta_9 \right), \\ H_{99}^{(1)} = \frac{h^2}{8\pi^2 m} \frac{2\mu}{\xi^2} \zeta \Delta_9, \\ \dots \end{cases} \quad (84)$$

La distancia nuclear ξ se determina mediante las ecuaciones

$$V'_n = \frac{dV_n}{d\xi} = 0. \quad (85)$$

La ecuación (45) de las vibraciones nucleares se escribe aquí:

$$\left\{ -\frac{h^2}{8\pi^2 m} \mu \frac{d^2}{d\zeta^2} + \frac{1}{2} \zeta^2 V''_n(\xi) W_n^{(2)} \right\} \chi_n^0 = 0. \quad (86)$$

Si se coloca ahora

$$\begin{cases} a = \frac{8\pi^2 m}{h^2} \mu W_n^{(2)}, & b = \frac{8\pi^2 m}{h^2} \frac{1}{2\mu} V''_n, \\ \eta = \zeta^4 \sqrt{b}, \end{cases} \quad (87)$$

entonces se tiene¹⁴

$$\left\{ \frac{d^2}{d\eta^2} + \left(\frac{a}{\sqrt{b}} - \eta^2 \right) \right\} \chi_n^0 = 0.$$

Los valores propios son

$$\frac{a}{\sqrt{b}} = 2s + 1 \quad (s = 0, 1, 2, \dots)$$

¹⁴ E. Schrödinger, Ann. d. Phys. 79: 361, §3 (1926).

y las funciones propias

$$\sigma_{ns}^0 = e^{-\frac{\eta^2}{2}} H_s(\eta)$$

donde H_s es el s -ésimo polinomio de Hermite.

La energía de vibración es, por lo tanto

$$\kappa^2 W_{ns}^{(2)} = a \frac{h^2 \kappa^2 \mu}{8\pi^2 m} = (2s+1)\sqrt{b} \frac{h^2 \kappa^2 \mu}{8\pi^2 m} = (s+\frac{1}{2})h \cdot \frac{1}{4\pi} \sqrt{\kappa^4 \frac{\mu}{m}} V_n''$$

o

$$\kappa^2 W_{ns}^{(2)} = (s+\frac{1}{2})h\nu_0; \quad (88)$$

en donde

$$\frac{1}{4\pi} \sqrt{\kappa^4 \frac{\mu}{m}} V_n'' = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}\right) V_n''} = \nu_0 \quad (89)$$

es la frecuencia del oscilador.

Ahora colocamos la ecuación (69) para las rotaciones pero dejamos de lado el tratamiento detallado de las correcciones de la energía de vibración. Puesto que $H_{s\vartheta}$, de acuerdo con (81) no contiene las derivadas con respecto a ϑ_j , entonces en (69) sólo debemos tomar en cuenta el término $(H_{s\vartheta}^0)_n$; todos los demás miembros los encerramos en la constante C_{ns} . Entonces la ecuación de rotación (69) queda:

$$\left\{ (H_{s\vartheta}^0)_n + C_{ns} - W^{(4)} \right\} \rho_{ns}^0 = 0. \quad (90)$$

donde hemos dejado de lado la parte de las translaciones en $H_{s\vartheta}^0$. Entonces, según (70) y (84) tendremos que para una función cualquiera $f(\vartheta)$:

$$\overline{(H_{s\vartheta}^0)_n f(\vartheta)} = -\frac{h^2 \mu}{8\pi^2 m \xi^2} \int \overline{\varphi_n^0 \Delta_s (\varphi_n^0 f)} dx$$

y según (80)

$$\Delta_s (\varphi_n^0 f) = \varphi_n^0 \Delta_s f + f \Delta_s \varphi_n^0 + 2 \left(\frac{1}{\text{sen}^2 \vartheta} \frac{\partial \varphi_n^0}{\partial \omega} \frac{\partial f}{\partial \omega} + \frac{\partial \varphi_n^0}{\partial \vartheta} \frac{\partial f}{\partial \vartheta} \right).$$

De aquí, entonces

$$\overline{(H_{s\vartheta}^0)_n f} = -\frac{h^2 \mu}{8\pi^2 m \xi^2} \left\{ \Delta_s f + f \cdot \int \overline{\varphi_n^0 \Delta_s \varphi_n^0} dx + 2 \frac{1}{\text{sen}^2 \vartheta} \frac{\partial f}{\partial \omega} \int \overline{\varphi_n^0} \frac{\partial \varphi_n^0}{\partial \omega} dx + 2 \frac{\partial f}{\partial \vartheta} \int \overline{\varphi_n^0} \frac{\partial \varphi_n^0}{\partial \vartheta} dx \right\}$$

donde escribimos Δ_s en la forma

$$\Delta_s = \frac{\partial^2}{\partial \vartheta^2} + c \text{tg } \vartheta \frac{\partial}{\partial \vartheta} + \frac{1}{\text{sen}^2 \vartheta} \frac{\partial^2}{\partial \omega^2}$$

y vemos que es conveniente introducir las siguientes abreviaturas

$$\begin{cases} \overline{\Theta}_n = \int \overline{\varphi_n^0} \frac{\partial \varphi_n^0}{\partial \vartheta} dx, & \overline{\Omega}_n = \int \overline{\varphi_n^0} \frac{\partial \varphi_n^0}{\partial \omega} dx, \\ \overline{\Theta}_n^2 = \int \overline{\varphi_n^0} \frac{\partial^2 \varphi_n^0}{\partial \vartheta^2} dx, & \overline{\Omega}_n^2 = \int \overline{\varphi_n^0} \frac{\partial^2 \varphi_n^0}{\partial \omega^2} dx. \end{cases} \quad (91)$$

Estos valores son los elementos diagonales de las matrices $\rho_{\vartheta}, \rho_{\omega}$ y también de $\rho_{\vartheta}^2, \rho_{\omega}^2$ (abstracción hecha del

factor $\frac{h}{2\pi^2}$ o, respectivamente de $-\frac{h^2}{4\pi^2}$) indican por lo

tanto los valores promedio de los momentos angulares en los movimientos electrónicos perteneciente al ángulo de Euler ϑ , respectivamente, a los valores promedio de sus cuadrados. Entonces, la ecuación (90) queda de una manera completa así:

$$\left\{ \left(\frac{\partial^2}{\partial \vartheta^2} + 2\overline{\Theta}_n \frac{\partial}{\partial \vartheta} + \overline{\Theta}_n^2 \right) + c \text{tg } \vartheta \left(\frac{\partial}{\partial \vartheta} + \overline{\Theta}_n \right) + \frac{1}{\text{sen}^2 \vartheta} \left(\frac{\partial^2}{\partial \omega^2} + 2\overline{\Omega}_n \frac{\partial}{\partial \omega} + \overline{\Omega}_n^2 \right) + \frac{8\pi^2 m \xi^2}{h^2 \mu} (W^{(4)} - C_{ns}) \right\} \rho_{ns}^0 = 0. \quad (92)$$

Esta ecuación es muy parecida a la obtenida por Kramers y Pauli para el rotor con un grado de inercia intrínseco. La diferencia consiste esencialmente en que para esos autores, en lugar de los promedios cuadráticos $\overline{\Theta}_n^2, \overline{\Omega}_n^2$ aparecen los cuadrados de los promedios $\overline{\Theta}_n, \overline{\Omega}_n$.

Además se puede determinar la dependencia de los valores de (91) con respecto a los ángulos ϑ, ω mediante algunos análisis elementales, cuando se acepta que, para este objetivo, los elementos diagonales de las matrices mecánico cuánticas se pueden reemplazar por los promedios clásicos correspondientes. El movimiento del vector momentum angular del movimiento electrónico puede descomponerse en una oscilación irregular sin rotación promedio y una rotación regular superpuesta alrededor del eje molecular. Reemplazamos la oscilación en promedio por un vector fijo, de modo que este rote de modo uniforme alrededor del eje. Se tiene entonces un comportamiento similar al de un trompo simétrico cuyo momento angular proviene de un sistema de referencia ligado al trompo, que tuviera componentes L, M, N. En función de éstos se pueden expresar las componentes del momento angular correspondientes a los ángulos ϑ, ω , así¹⁵

$$\Theta = L \cos \gamma - M \sin \gamma,$$

$$\Omega = L \sin \vartheta \sin \gamma + M \sin \vartheta \cos \gamma + N \cos \vartheta$$

aquí γ es el ángulo de la rotación propia alrededor del eje.

Dividiendo por γ se obtiene:

$$\overline{\Theta} = 0, \quad \overline{\Omega} = N \cos \vartheta,$$

$$\overline{\Theta^2} = \frac{1}{2}(L^2 + M^2), \quad \overline{\Omega^2} = \frac{1}{2}(L^2 + M^2) \sin^2 \vartheta + N^2 \cos^2 \vartheta.$$

Aquí hay que identificar a N con el número cuántico p que da el momentum angular alrededor del eje y $\frac{1}{2}(L^2 + M^2)$, $\frac{1}{2}N^2$ con los promedios cuadráticos $\overline{p_{\perp}^2}$, $\overline{p_{\parallel}^2}$, del momento angular total de los electrones perpendicular y paralelo al eje; puesto que N es constante se tiene que $\overline{p_{\parallel}^2} = p^2$. Entonces se obtiene

$$\begin{cases} \overline{\Theta_n} = 0, & \overline{\Omega_n} = p \cos \vartheta, \\ \overline{\Theta_n^2} = \overline{p_{\perp}^2}, & \overline{\Omega_n^2} = \overline{p_{\perp}^2} \sin^2 \vartheta + p^2 \cos^2 \vartheta \end{cases} \quad (93)$$

Este resultado requiere, como es lógico, una comprobación mecanocuántica rigurosa, probablemente p^2 se puede reemplazar por $p(p+1)$. Mediante el problema de valor es el momento de inercia de los núcleos en equilibrio.

propio (92), el valor $\frac{8\pi^2 m \xi^2}{h^2 \mu} W^{(4)}$ resulta igual a una

función numérica del número rotacional r, casi igual a $g_{ns}(r)$; entonces para la energía de rotación se obtiene

$$\kappa^4 W_{nsr}^{(4)} = \frac{h^2 \mu \kappa^4}{8\pi^2 m \xi^2} g_{ns}(r) = \frac{h^2}{8\pi^2 J} g_{ns}(r), \quad (94)$$

donde

$$J = \frac{m}{\mu \kappa^4} \xi^2 = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \xi^2 \quad (95)$$

Una discusión de las aproximaciones de orden superior sin tener en cuenta las degeneraciones no tiene ningún sentido y, por lo tanto, no la haremos aquí.

Por el contrario, vamos a mostrar de una manera rápida que las moléculas diatómicas pueden tratarse por otro procedimiento de perturbaciones muy diferente cuyo análogo clásico fue desarrollado por Born y Hückel¹⁶. En tal caso no se toma como aproximación de orden cero al sistema electrónico para núcleos fijos, sino el sistema electrónico para rotaciones regulares de los núcleos.

8. Tratamiento independiente para las moléculas diatómicas

Recordemos la ecuación (12), que escribiremos reemplazando (11):

$$\left\{ H_0 + \kappa^4 (H_{\xi\xi} + H_{\xi\vartheta} + H_{\vartheta\vartheta}) - W \right\} \psi = 0.$$

Para las moléculas diatómicas es notable el hecho de que $H_{\xi\vartheta}$ no depende de ϑ ; en este caso el método conduce al objetivo de separar las translaciones y las rotaciones al mismo tiempo. Según (81) se obtiene (dejando de lado los miembros de translación):

$$\left\{ H_0 - \frac{h^2 \mu}{8\pi^2 m} \kappa^4 \left(\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \frac{2}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{1}{\xi^2} \Delta_{\vartheta} \right) - W \right\} \psi = 0. \quad (96)$$

¹⁵ Compárese por ejemplo con: F. Klein y A. Sommerfeld, *Theorie des Kreisels* 1, p.108.

¹⁶ M. Born y E. Hückel, *Phys. Ztschr.* 24:1 (1923).

Si se toma

$$\psi = Y_r(\vartheta, \omega) \Psi_r(x; \xi), \quad (97)$$

donde Y_r es la función esférica de orden r -ésimo. Entonces la ecuación

$$\Delta_{\vartheta} Y_r + r(r+1)Y_r = 0$$

es suficiente para que se mantenga la condición para Ψ_r

$$\left\{ H_0 - \frac{\hbar^2 \mu}{8\pi^2 m} \kappa^4 \left(\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \frac{2}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} - \frac{r(r+1)}{\xi^2} \right) - W \right\} \Psi_r = 0 \quad (98)$$

Ahora reemplazamos de nuevo ξ por $\xi + \kappa \zeta$ y buscamos las vibraciones alrededor del estado de rotación regular. Describimos la energía de este estado por

$$R = \frac{\hbar^2 \mu \kappa^2}{8\pi^2 m} \frac{r(r+1)}{\xi^2} = \frac{\hbar^2}{8\pi^2 J} r(r+1) \quad (99)$$

y si reemplazamos

$$W = E + R, \quad (100)$$

entonces la ecuación (98) se convierte en

$$(H^0 + \kappa H^{(1)} + \kappa^2 H^{(2)} + \dots - E) \Psi_r = 0, \quad (101)$$

donde

$$\left\{ \begin{array}{l} H^0 = H_0^0, \\ H^{(1)} = H_0^{(1)} + \zeta R', \\ H^{(2)} = H_0^{(2)} + \frac{1}{2} \zeta^2 R'' - \frac{\hbar^2 \mu}{8\pi^2 m} \frac{\partial^2}{\partial \zeta^2}, \\ H^{(3)} = H_0^{(3)} + \frac{1}{6} \zeta^3 R''' - \frac{\hbar^2 \mu}{8\pi^2 m} \frac{2}{\zeta} \frac{\partial}{\partial \zeta}, \\ \dots \end{array} \right. \quad (102)$$

$H_0^0, H_0^{(1)}, \dots$ representan los operadores señalados de esta manera en las secciones anteriores. Todas las fórmulas del § 2 valen sin cambio alguno. Las ecuaciones de aproximación son

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } (H^0 - E^0) \Psi_r^0 = 0, \\ \text{b) } (H^0 - E^0) \Psi_r^{(1)} = (E^{(1)} - H^{(1)}) \Psi_r^0, \\ \text{c) } (H^0 - E^0) \Psi_r^{(2)} = (E^{(2)} - H^{(2)}) \Psi_r^0 + \\ \quad \quad \quad (E^{(1)} - H^{(1)}) \Psi_r^{(1)}, \end{array} \right. \quad (103)$$

La primera tiene por solución

$$E^0 = V_n(\xi), \quad \Psi_r^0 = \Psi_m^0 = \sigma_m^0(\zeta) \varphi_n^0(x; \xi). \quad (104)$$

donde el potencial $V_n(\xi)$ y las funciones $\varphi_n^0(x; \xi)$ son las que se introdujeron en las secciones anteriores, y $\sigma_m^0(\zeta)$ es arbitrario. La condición de integrabilidad para (103b) dice:

$$(E^{(1)} - H_{nn}^{(1)}) \sigma_m^0(\zeta) = 0.$$

Ahora, según § 2 (26a) es

$$H_{nn}^{(1)} = (H_0^{(1)})_{nn} + \zeta R' = V_n^{(1)} + \zeta R' = \zeta \frac{d}{d\xi} (V_n + R).$$

De aquí se deduce como antes (§ 4) que

$$E^{(1)} = 0, \quad \frac{d}{d\xi} (V_n + R) = 0 \quad (105)$$

Esta condición indica claramente que para que prevalezca la rotación no perturbada debe existir un equilibrio entre la fuerza centrífuga y la fuerza cuasielástica, que se opone al retroceso del núcleo debido al movimiento de los electrones

La fuerza centrífuga es explícitamente

$$-\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \frac{p_r^2}{\xi^3} = -\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \frac{\hbar^2}{4\pi^2} \frac{r(r+1)}{\xi^3},$$

en donde se introduce el valor mecanocuántico $\frac{\hbar}{2\pi} \sqrt{r(r+1)}$ para el momento angular p_r y esto concuerda con R' , según (99) y (95).

De la relación (105) se puede calcular la distancia de equilibrio ξ_r que es dependiente del número cuántico de rotación r . Para valores pequeños de la energía de rotación R se puede desarrollar ξ_r en potencias de

$$\beta = \kappa^4 \frac{\mu}{m} \frac{h^2}{4\pi^2} r(r+1) = \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \frac{h^2}{4\pi^2} r(r+1) \quad (106)$$

y se obtiene¹⁷

$$\xi_r = \xi + \frac{1}{\xi^3 V_n''} \beta - \frac{3}{\xi^7 V_n''^2} \left(1 + \frac{\xi V_n'''}{6 V_n''} \right) \beta^2 + \dots \quad (107)$$

Puesto que β es del orden de κ^4 , para un tratamiento sistemático se necesitarán en esta serie tantos miembros como corresponda al grado de aproximación del método de perturbación. Como vamos a referirnos de nuevo a este lo haremos de forma resumida, ya que el método es el mismo de antes, sólo que simplificado al dejar de lado las rotaciones. La solución de (103b) correspondiente a (42) dice

$$\Psi_m^{(1)} = \sigma_m^0 \varphi_n^{(1)} + \sigma_m^{(1)} \varphi_n^0 \quad (108)$$

y la condición de integrabilidad de (102c) produce

$$\left\{ H_{mn}^{(2)} + (H^{(1)})_{mn}^{(1)} - E_n^{(2)} \right\} \sigma_m^0 = 0$$

Esta es, sin embargo, la ecuación de vibración

$$\left\{ -\frac{h^2 \mu}{8\pi^2 m} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \frac{1}{2} \zeta^2 (V_n'' + R'') - E_n^{(2)} \right\} \sigma_m^0 = 0. \quad (109)$$

que se convierte, como en § 7 en

$$\kappa^2 E_{ms}^{(2)} = \left(s + \frac{1}{2} \right) h\nu_r, \quad (110)$$

donde la frecuencia

$$\nu_r = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) (V_n'' + R'')} \quad (111)$$

depende aún del número cuántico rotacional r que aparece en R .

Además, como en § 7

$$\sigma_{ms}^0 = e^{-\frac{\eta^2}{2}} H_s(\eta) \quad (112)$$

con

$$\eta = \zeta^4 \sqrt{b}, \quad b = \frac{8\pi^2}{h^2} \frac{m}{2\mu} (V_n'' + R'') \quad (112a)$$

el método se deja desarrollar en la forma conocida.

Se encuentra que $E^{(3)} = 0$, mientras que $E^{(4)}$ contiene, además de las desviaciones de la ley de vibración armónica, un acoplamiento con el movimiento electrónico. Sin embargo, dentro del marco de este tratamiento, las fórmulas dadas de una manera detallada podrían fallar si sólo se tuviese en cuenta el fundamento del desarrollo; por otro lado, los cálculos de las aproximaciones superiores sólo tienen sentido cuando, al mismo tiempo, se tienen en cuenta las degeneraciones.

(Sometido el 25 de agosto de 1927)

Referencias

1. **Fukui, K.** (1970): "A formulation of the reaction coordinate", *J.Phys.Chem.* 74:4161.
2. **Combes, J.M., Duclos, P. y Sellaier P.** (1980): "The Born-Oppenheimer approximation"; en *Rigorous Atomic and Molecular Physics*, eds. G. Velo y A.S. Wightman, NATO serie B vol 74.
3. **Moyano, G. Villaveces, J.L.** "Approximation to Wave Functions, Energies, and Energy Derivatives for Molecular Systems Based on Distribution Theory" *Int. J. Chem. In. Press.* 1998.
4. **Sutcliffe, B.T.** (1992): *The chemical bond and molecular structure*, *J. Mol.Struct. (Theochem)*, 259:29.
5. **Sutcliffe, B.T.** (1993): *The coupling of nuclear and electronic motions in molecules*; *J.Chem.Soc.Faraday Trans.*, 89:2321.
6. **Woolley, R.G.** (1991): *Quantum chemistry beyond the Born-Oppenheimer approximation*, *J. Mol.Struct. (Theochem)*, 230:17.

¹⁷ Estas fórmulas se puede extraer sencillamente del trabajo ya citado de Born y Hückel.

EL POSTULADO DE LAS PARALELAS

por

Luis Moreno-Armella*

Resumen

Moreno-Armella, L.: El postulado de las paralelas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **22** (83): 393-405, 1998. ISSN 0370-3908.

Se describe el camino seguido desde Euclides hasta Hilbert en la construcción de la geometría como una ciencia teórica. Se indica la intención filosófica, que se encuentra ya clara en Aristóteles, de construir *ciencias demostrativas*, lo cual condujo necesariamente a la exploración de las proposiciones como elementos constitutivos de un sistema axiomático para la geometría, pasando de lo ontológico a lo lógico. En este proceso tuvieron profunda importancia los intentos de demostración del postulado de las paralelas, que muestran cómo se pasó de la “verdad euclídea” a la “consistencia hilbertiana”.

Palabras claves: Matemáticas, historia, filosofía, geometrías no euclídeas, epistemología.

Abstract

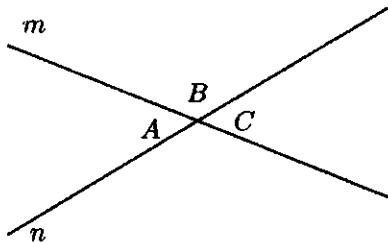
The path followed to construct a theoretical science, from Euclid to Hilbert, is described. The Aristotelian philosophical intentions to build *demonstrative sciences*, lead necessarily to the exploration of propositions as building blocks of an axiomatic system for geometry, which in turn allowed mathematicians pass from ontological aspects to logical ones. In this process, the attempts to prove the Fifth Postulate of Euclidean geometry, had a crucial rôle since at the end they lead from “Euclidean truth” to “Hilbertian consistency”.

Key words: Mathematics, history, philosophy, non-Euclidean geometries, epistemology.

* Departamento de Matemática Educativa, CINVESTAV-IPN, Dakota 379, C.P. 03810 Col. Nápoles, México, D.F., tel: (5)5430770, fax: (5)5430713. El levantamiento de este texto se hizo usando el paquete TEX de la AMS.

§1. De Euclides a Hilbert

La matemática griega introdujo un elemento novedoso en la matemática: el método deductivo. Las culturas matemáticas anteriores hicieron de la verificación empírica (que sólo podía dar resultados aproximados), y la generalización por analogía, sus criterios para establecer los resultados de su matemática. Con el método deductivo de los griegos se pudo ir más lejos. Al comienzo, este novedoso instrumento de verificación se ejerció en el marco de las *organizaciones locales*. Por ejemplo, la geometría del triángulo, la geometría de la circunferencia, fueron desarrollándose como “pequeños universos” de conocimiento geométrico. TALES DE MILETO demostró que los ángulos opuestos por el vértice (entre dos rectas m y n que se intersecan) son iguales. Lo hizo de la siguiente manera: Se debe demostrar que $A = C$.



Ahora, como $A + B = 180^\circ$ y $C + B = 180^\circ$ entonces $A = C$. Un matemático babilónico quizá habría argumentado que el resultado era claro, pues bastaba *ver el dibujo*. Aquí está la diferencia fundamental con la cultura matemática griega: *la diferencia entre el dibujo y el objeto geométrico*.

La matemática griega sostiene la idea de que la geometría es una representación del espacio físico. Por ello, sus resultados, que iban siendo establecidos dentro de la geometría, se aplicaban a problemas del espacio físico. La geometría se desarrolla como una *representación y organización del conocimiento sobre el espacio físico*. Un ejemplo sobresaliente lo constituye el método ideado por Eratóstenes para estimar el radio de la tierra. Este tipo de ejemplos, en donde no es posible la verificación directa del resultado, fue importante para establecer el método deductivo como un criterio de validación. En efecto, ante la imposibilidad de una comprobación empírica (que necesariamente estaba ausente) el único recurso para validar los resultados obtenidos era el que tales resultados fueran obtenidos dentro de un proceso deductivo.

En la incorporación del método deductivo a la matemática también resultó central la *intención filosófica*

de construir una ciencia teórica cuya meta era el conocimiento de la verdad. El objetivo del método deductivo era explicar: *explicar era demostrar*. Para explicar, hay que partir, en una ciencia, de *primeros principios*. Esta organización, ya de carácter global, en la geometría, quedó plasmada en los *Elementos* de EUCLIDES -y refleja ampliamente las concepciones aristotélicas sobre la ciencia. Allí tenemos una organización que rebasa las organizaciones locales a las que ya hemos hecho referencia anteriormente. La intención filosófica de construir una ciencia desde sus primeros principios, la podemos hallar en ARISTÓTELES quien se propuso analizar lo que era una *ciencia demostrativa*. El tema central de su libro *Tópicos* es “la demostración y la facultad que la realiza”. Allí se encuentran los elementos que componen una ciencia demostrativa:

- (i) Las definiciones.
- (ii) Los primeros principios, que los hay de dos clases: los específicos de cada ciencia, llamados postulados y los comunes a todas, los axiomas.
- (iii) Finalmente, está el cuerpo deductivo, compuesto por las proposiciones demostradas a través de la inferencia.

A grandes rasgos, estos son los antecedentes de la organización axiomática de la geometría griega. Lo que siguió, es decir, *la exploración de las proposiciones como miembros constitutivos de un sistema axiomático de geometría*, fue cambiando, gradualmente, el significado de estas mismas proposiciones. Dejaron de ser vistas como representaciones de alguna propiedad del espacio (físico). Es decir, fueron perdiendo su *valor ontológico*, y fue enfatizado su aspecto lógico. Empero, esto no fue un proceso breve. Duró varios siglos y hubo profundas razones para ello.

La principal fue quizá, el desarrollo impulsado por los intentos de demostrar el quinto Postulado, pues ya desde tiempos de EUCLIDES fue visto como una proposición “muy complicada” para adjudicársele la categoría de postulado: carecía de la evidencia en sí que debía caracterizar las proposiciones dignas de tal nombre. Una comparación de los primeros cuatro postulados con el quinto aclarará este punto. Los primeros cuatro son:

1. *Dos puntos determinan una única recta*
2. *Todo segmento de recta puede extenderse continuamente.*
3. *Con cualquier centro y cualquier radio, puede trazarse una circunferencia.*
4. *Todos los ángulos rectos son iguales.*

Y el quinto:

5. *Dadas dos rectas y una transversal a ellas en un*

plano, si los ángulos internos de un mismo lado suman menos que dos rectos entonces, al prolongar estas rectas ellas deberán intersectarse del lado de estos ángulos.

Uno puede preguntarse por qué EUCLIDES no prefirió una formulación más sencilla, como por ejemplo: "Por un punto exterior a una recta pasa una única paralela a dicha recta (en el plano determinado por la recta y el punto exterior)". Basta recordar que tal formulación era imposible para EUCLIDES ya que ella supone postular el comportamiento de una recta "en el infinito", más allá de lo que la experiencia sensible puede hacer pasar como "evidente en sí mismo" que es el carácter que debe tener todo postulado. *La experiencia sensorial es siempre local.*

Debido a esta posición tan particular dentro del sistema euclídeo, desde muy pronto este postulado fue considerado como una proposición que debía ser demostrada, es decir, fue puesto en la categoría de teorema. La historia de los intentos de demostración del postulado de las paralelas cubre una parte sustancial de la historia de la geometría hasta el siglo XIX. Cubre, en particular, parte importante de la evolución de la idea de demostración. Al comienzo, fue claro para quienes buscaron tal prueba, que habría que hacerlo dentro del contexto euclídeo y ello comportaba una hipótesis de profundo valor epistemológico:

La geometría euclídea era una representación verdadera del mundo y además era única.

La demostración del postulado simplemente haría más ligero el sistema postulacional. No hubo, en general, duda alguna del *isomorfismo* entre el sistema geométrico y el espacio físico. Este estado de cosas se mantuvo casi inalterado hasta el siglo pasado, cuando cambió radicalmente. La geometría sufrió cambios profundos que se reflejaron a través de la obra *Fundamentos de geometría* (1899), de HILBERT (1862-1943). En los *Elementos*, los axiomas son "verdades evidentes" por lo cual no necesitan de una demostración que los justifique como tales. En consecuencia, lo que podamos deducir de ellos, tendrá también el carácter de verdad que tienen los axiomas. Es decir, son verdades necesarias sobre el espacio físico. En cambio, en el trabajo de HILBERT, no se tiene en cuenta el carácter de "verdad" de los axiomas; lo fundamental es que el conjunto de axiomas sea consistente. Es decir, que los axiomas no se contradigan entre sí. Por ejemplo, no debe haber, además del axioma de unicidad de la paralela por un punto exterior a una recta, otro axioma que afirme o del cual pudiera deducirse, la existencia de más de una paralela por un

punto exterior a una recta. Los resultados que se deduzcan de los axiomas, tendrán el carácter de teoremas, pero no un valor asociado de verdad.

El esquema siguiente sugiere la transformación que sufrió la axiomatización de EUCLIDES en manos de HILBERT:

LA VERDAD \implies LA CONSISTENCIA

Una extracción del significado de los términos y proposiciones de la geometría y su correspondiente sustitución por el criterio lógico de la consistencia. Este proceso de "desustanciación" de la geometría, en el que ya no importa la naturaleza de los objetos de los que se habla sino la coherencia del discurso, corresponde a un movimiento general en la matemática del siglo XIX.

§2. Geometría y desustanciación

La obra de HILBERT sobre los fundamentos de la geometría apareció como consecuencia de un movimiento general de la matemática: la búsqueda de fundamentos de naturaleza analítica para esta disciplina. Se partió de una idea expresada por HILBERT sobre los axiomas de una teoría: lo realmente importante no son los significados (interpretaciones) que podamos asociar a tales axiomas sino la coherencia que ellos mantengan entre sí. Los axiomas juegan el papel de "definiciones implícitas" de los términos de la teoría que vienen mencionados en estos axiomas. Entonces, según HILBERT, no importa lo que "son" los puntos, las líneas y los planos; *lo que importa son las relaciones entre ellos que vienen dadas por los axiomas.* El libro de COURANT & ROBBINS *¿Qué es la matemática?*, expresa este punto de vista de manera espléndida:

A través de los tiempos los matemáticos consideraron sus objetos —números, puntos, etc.— como cosas sustanciales en sí. Pero en vista de que aquellos desafiaban una descripción adecuada, los matemáticos del siglo pasado llegaron a la convicción de que el problema de la significación de dichos objetos como cosas sustanciales no tenía sentido dentro de la matemática. Las únicas proposiciones relativas a ellos que importan son las que expresan las relaciones mutuas entre objetos indefinidos: su estructura y relaciones...la percepción de la necesidad de la desustanciación de los objetos matemáticos ha sido uno de los resultados más fecundos del desarrollo axiomático moderno.

Hay un proceso que puede ser identificado como crucial para desencadenar el programa de desustanciación impulsado por HILBERT: la fundación de las geometrías

no-euclídeas. Con el advenimiento de esta geometría, quedó inaugurado un nuevo camino: la geometría como representación de un espacio posible. Para las matemáticas, en general, *este proceso marca el paso hacia la matemática de las estructuras.*

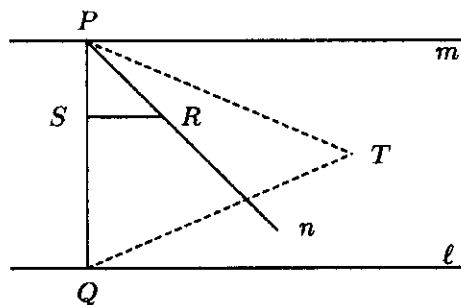
¿Qué hizo posible esta transformación? parte de la respuesta está en el desarrollo de la geometría no-euclídea.

§3. La demostración del quinto Postulado

Hemos visto los extremos de una historia. Digámoslo así: *todo comenzó con EUCLIDES y terminó con HILBERT.* De la verdad a la consistencia. La ciencia griega representa el resultado de una actividad cognitiva sobre lo empírico. *Está vinculada prioritariamente a la abstracción empírica.* La ciencia de HILBERT es resultado de una reflexión sobre una ciencia ya constituida, cada concepto es resultado de una reflexión sobre el contexto total del concepto. *Es resultado de una abstracción reflexiva, en el sentido de la epistemología piagetiana.*

La geometría griega trata de descubrir verdades ocultas mediante un *razonamiento deductivo íntimamente vinculado a la ontología.* Esta característica subsiste durante siglos y puede verse *cómo influye en la estructura de los razonamientos* que buscan demostrar el quinto postulado. Aunque la historia de los intentos por demostrar el quinto Postulado comienza casi al tiempo que los *Elementos* mismos, nosotros aquí iniciaremos nuestro estudio en el siglo XVII. Como ejemplo, vamos a considerar la demostración de WALLIS (1616-1703). Su estrategia se apoya en la existencia de triángulos semejantes. Uno de los postulados de EUCLIDES nos dice que con cualquier centro y cualquier radio puede trazarse una circunferencia. En particular, pueden trazarse diferentes circunferencias concéntricas. Dado que los triángulos son figuras aún más simples, esta observación hace plausible suponer la existencia de triángulos semejantes. Esto es parte de la ontología subyacente a la geometría: *la homogeneidad del espacio.*

La demostración de WALLIS es como sigue: dado el punto P exterior a la recta ℓ constrúyase la paralela m a ℓ por P . PQ es perpendicular tanto a ℓ como a m . Sea n otra recta distinta a m y a la recta determinada por PQ . Tómesese R sobre n , como indica la figura y S el pie de la perpendicular RS . Considerando el triángulo PSR y el lado PQ debe existir un punto T de modo que el triángulo PQT sea semejante al triángulo PSR . Se concluye que el rayo PR coincide con el rayo PT . Es decir, T está sobre el rayo PR . Por otro lado, el ángulo PQT es recto. Entonces T está en la intersección de ℓ



y n . Es decir, la única paralela a ℓ por P es m .

Llevando el análisis más lejos podemos demostrar a su vez, que la existencia de triángulos semejantes se sigue del quinto postulado. Como son lógicamente equivalentes, la prueba de WALLIS sufre del mal de "petición de principio". El mal del que sufren todas las demostraciones del quinto postulado cuando se tratan de realizar desde los otros cuatro postulados de EUCLIDES. Esto llevó a LOBACHÉVSKI a declarar en sus *Nuevos Principios de la geometría* (1835):

Es bien conocido que hasta la fecha la teoría de las paralelas ha permanecido incompleta. Los esfuerzos infructuosos hechos desde tiempos de EUCLIDES y a lo largo de un período de más de dos mil años, me han convencido de que los conceptos involucrados en esta investigación no contienen la verdad de lo que se desea demostrar.

No es quizá exagerado decir que las grandes transformaciones matemáticas han gravitado siempre alrededor de problemas epistemológicos. En EUCLIDES, los objetos de la geometría anteceden a la ciencia misma, existen potencialmente en las cosas sensibles y no pueden ser separados de ellas. El objeto abstracto conserva una dependencia ontológica respecto del objeto material que sirve para generarlo por vía de la abstracción. Este enfoque se hace explícito cuando hablamos de los postulados como de "proposiciones evidentes en sí mismas". La historia de la construcción de las geometrías no-euclídeas es la historia de la lucha contra esta concepción del objeto matemático. En efecto, las proposiciones que se consideran como "absurdas" son aquellas que entran en conflicto con proposiciones que se consideran como intuitivamente verdaderas. Dado que es la "sustancia" la fuente de los obstáculos, los matemáticos, a partir de cierto momento del siglo XIX, decidieron desembarazarse de ella. La cita de COURANT & ROBBINS que presentamos arriba, refleja justamente tal punto de vista.

Continuemos con la historia del quinto postulado. Después de los intentos de WALLIS y de muchos otros, hechos desde la perspectiva de aquél, podemos señalar una nueva etapa que inaugura SACCHERI (1667-1733). Se trata de intentar una demostración por el absurdo. SACCHERI supone como válidos todos los postulados de EUCLIDES excepto el quinto y en su lugar coloca una de las dos formas de su negación. Es decir,

por un punto exterior a una recta dada en un plano, no pasa ninguna paralela a dicha recta,

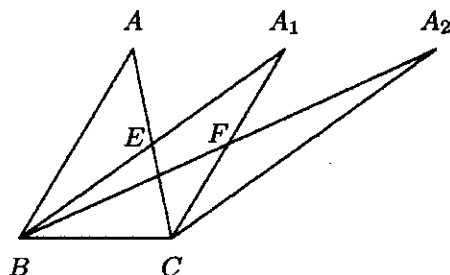
o bien,

por un punto exterior a una recta dada, en un plano, pasa más de una paralela a dicha recta.

La primera hipótesis equivale a que la suma de los ángulos de cualquier triángulo sea mayor que dos rectos. La segunda, equivale a que la suma de los ángulos de un triángulo sea menor que dos rectos. A partir de cualesquiera de estas hipótesis, SACCHERI intenta arribar a una contradicción. Por ejemplo, suponiendo válidos los primeros cuatro postulados de EUCLIDES, el principio de continuidad de ARQUÍMEDES y la existencia de segmentos de longitud arbitraria —hipótesis aceptadas dentro del marco euclídeo— es posible demostrar que la suma de los ángulos de un triángulo debe ser menor o igual a dos rectos. En consecuencia, no puede suponerse, dentro de este marco axiomático la validez de la primera hipótesis: la hipótesis del ángulo obtuso. Para descartar la otra hipótesis, la del ángulo agudo (la suma de los ángulos de un triángulo es inferior a dos rectos) SACCHERI se ve envuelto en un complicado proceso deductivo que no parece arribar a ninguna contradicción. En cierto momento, empieza a gravitar su posición epistemológica, a saber, que la única geometría posible es la euclídea. Tenemos así la proposición XXXIII de su libro *Euclides liberado de todo error (Euclides ab omni naevo vindicatus, 1733, año de su muerte)*: “La hipótesis del ángulo agudo es absolutamente falsa porque repugna a la naturaleza de la línea recta”. Ésta ya no es la actitud del lógico, sino la del hombre dogmático que sostiene, contra su propio razonamiento, la fe en el carácter absoluto de la geometría euclídea. Con razón LOMBARDO-RADICE ha dicho de esta actitud de SACCHERI: *el dogma vence a la lógica.*

LEGENDRE (1752-1833) adoptó el enfoque seguido por SACCHERI. Sus intentos de demostración del quinto postulado, fueron publicados en sucesivas ediciones de su texto de geometría. En la geometría euclídea se demuestra que la suma de los ángulos de cualquier triángulo es igual a dos rectos. La demostración tradicional

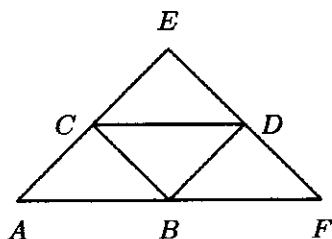
emplea el quinto postulado. Recíprocamente, tomando como base tal teorema euclídeo, se puede demostrar el quinto postulado. Es decir, son proposiciones equivalentes desde un punto de vista lógico. Uno de los intentos más interesantes de LEGENDRE consistió en demostrar la imposibilidad de las hipótesis del ángulo obtuso y del ángulo agudo. Como en el caso de SACCHERI, se requiere del auxilio del principio de continuidad de ARQUÍMEDES y de la posibilidad de construir un segmento de recta de longitud arbitrariamente grande. Veamos cómo se descarta la hipótesis del ángulo obtuso:



Sea E el punto medio del lado AC . Se traza BA_1 de suerte que $BE = EA_1$. Los triángulos ABE y ECA_1 son congruentes y, en consecuencia, la suma de los ángulos del triángulo original ABC y la del triángulo BCA_1 son iguales. Denotemos tal suma por $180^\circ + \epsilon$, donde $\epsilon > 0$. Puede observarse que uno de los ángulos del triángulo BCA_1 es menor que la mitad del ángulo ABC (vértice en B), si este es el menor ángulo agudo del triángulo ABC . Partiendo ahora del triángulo BCA_1 tomamos el punto medio F del lado CA_1 y construimos el triángulo BCA_2 . De nueva cuenta este triángulo tiene un ángulo agudo que es menor o igual que la mitad del ángulo CBA_1 (vértice en B), y, por lo tanto, menor o igual que la cuarta parte del ángulo CBA . Si realizamos esta construcción n veces, habremos construido un triángulo que tiene un ángulo agudo menor o igual que $ABC/(2n)$. Para n suficientemente grande, el número $ABC/(2n)$ es menor que ϵ . Por lo tanto, habremos llegado a un triángulo en el cual la suma de dos de sus ángulos es mayor que dos rectos. Esto es una contradicción.

De esta forma queda descartada la hipótesis del ángulo obtuso. En consecuencia, la suma de los ángulos de cualquier triángulo es menor o igual que dos rectos. LEGENDRE se propone entonces demostrar que la suma no puede ser menor, estrictamente, que dos rectos.

Supongamos que la suma de los ángulos del triángulo ABC es $180^\circ - \epsilon$, donde $\epsilon > 0$.

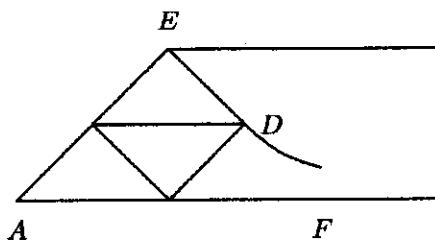


Construimos el punto D simétrico de A respecto a la recta BC . Entonces el triángulo ABC es congruente al triángulo DBC . En tales triángulos, el ángulo en A es igual al ángulo en D , el ángulo en F es igual al ángulo en C , respectivamente. Por el punto D se traza la recta EF . Entonces:

- Suma de los ángulos del triángulo $ABC = 180^\circ - \epsilon$
- Suma de los ángulos del triángulo $BCD = 180^\circ - \epsilon$
- Suma de los ángulos del triángulo $DBF \leq 180^\circ$
- Suma de los ángulos del triángulo $ECD \leq 180^\circ$

Por lo tanto, la suma de los ángulos del triángulo EAF es menor o igual que $180^\circ - 2\epsilon$. Si repetimos n veces esta construcción llegaremos a un triángulo (como EAF) en el cual la suma de los ángulos es $180^\circ - 2^n\epsilon$. Por la propiedad arquimediana, este número será negativo si n es suficientemente grande. Hemos llegado entonces a una contradicción: tenemos un triángulo cuya suma de ángulos es negativa.

Si la demostración fuese correcta LEGENDRE habría probado que la suma de ángulos de cualquier triángulo es 180° y con ello, el postulado de las paralelas. El error de su demostración consiste en suponer que por el punto D se puede trazar, siempre, una recta que intersecte a las prolongaciones de los lados AB y AC . ¿Por qué es esto un error? Porque estaríamos descartando injustificadamente una situación como la siguiente:



Es decir, en donde exista la posibilidad de que la recta

que trazamos por D sea paralela a AF . El dibujo ilustra una situación posible en una geometría en donde pueda haber más de una paralela a AF por el punto E . Nada hay que impida que el comportamiento de la recta ED no sea como el de la figura. Que la línea ED intersecta a la base en un punto F , sería afirmar que la paralela a AF , por el punto E es única. He allí el error de LEGENDRE: usar en su demostración una hipótesis implícita equivalente a lo que se pretende demostrar.

Los esfuerzos de LEGENDRE para intentar producir una demostración del quinto postulado son admirables: durante 29 años y doce ediciones de su libro de geometría, estuvo presentando demostraciones cada vez "corregidas", de la unicidad de la paralela a una recta dada por un punto exterior a ella.

Los trabajos de SACCHERI y LEGENDRE pertenecen a una segunda etapa del desarrollo de las geometrías no-euclídeas —quizá sea más apropiado decir de los "antecedentes". Corresponden a los intentos de demostrar el quinto postulado mediante la verificación de la inconsistencia de los sistemas alternativos: los correspondientes a las hipótesis del ángulo obtuso y del ángulo agudo.

Ubicado entre los trabajos de SACCHERI y LEGENDRE, hallamos los del matemático alemán LAMBERT (1728–1777), quien produjo un trabajo notable sobre el problema de las paralelas. LAMBERT leyó el trabajo de SACCHERI y en muchos aspectos lo mejoró. Articuló la primera fase de su trabajo alrededor de una figura reminiscente del cuadrilátero de SACCHERI: el cuadrilátero de LAMBERT que posee tres ángulos rectos y un cuarto ángulo al que se pueden adjudicar valores obtusos, recto y agudos. Desde luego, bajo la hipótesis del ángulo recto la geometría resultante es la euclídea. La hipótesis del ángulo obtuso es relativamente fácil de descartar, como antes, explicitando tanto el postulado arquimediano como la longitud infinita de la recta. (Vale la pena dar aquí la noticia: DEHN demostró, en 1900, la imposibilidad de demostrar que la suma de los ángulos de un triángulo es menor o igual que 180° , en ausencia del postulado de continuidad arquimediano.)

A diferencia de SACCHERI, LAMBERT no llegó a conclusiones sobre lo absurdo de la existencia de una geometría en donde fuese válida la hipótesis del ángulo agudo. Por ejemplo, leamos la cita siguiente de LAMBERT:

Se pueden desarrollar demostraciones del postulado euclídeo que dan la impresión de que sólo requieren un pequeño arreglo para hacerlas rigurosas. Sin embargo, bajo un escrutinio más detenido aquello que parecía sólo requerir un pequeño arreglo se convierte en el punto cru-

cial; usualmente allí se esconde la proposición que se quiere demostrar o alguna otra equivalente.

La opinión que aquí expresa LAMBERT ya empezaba a ser compartida en su tiempo por los estudiosos del problema: no importa cuán duro se trabaje en la búsqueda de una demostración del postulado de las paralelas, siempre se llega a un callejón sin salida. Esto llevó al mismo LAMBERT a opinar así:

Estoy inclinado a creer que la geometría correspondiente al ángulo agudo es válida sobre una esfera de radio imaginario. Debe haber una poderosa razón para que no la podamos descartar sobre el plano, como sí podemos fácilmente cuando se trata de la hipótesis del ángulo obtuso.

La alusión a la esfera de radio imaginario se debe a que la geometría del ángulo obtuso (más otras modificaciones) corresponde a la geometría de la esfera. La trigonometría esférica se transforma en la trigonometría hiperbólica si realizamos la sustitución formal del radio r de la esfera por ir (donde i representa la raíz cuadrada de -1). Debe enfatizarse que LAMBERT se está moviendo en un terreno especulativo (aunque con una intuición correcta, como se verá después). Establece la siguiente analogía: así como en la esfera (donde vale la hipótesis del ángulo obtuso) los triángulos tienen un área proporcional al exceso: (suma de los ángulos) -180° , entonces, ya que la trigonometría hiperbólica implica que el área de un triángulo es proporcional al defecto: $180^\circ -$ (suma de ángulos del triángulo) entonces, dado que ésta es la trigonometría que corresponde a la esfera de radio imaginario, la geometría de esta esfera imaginaria es la geometría de la hipótesis del ángulo agudo. Las analogías de LAMBERT estuvieron acompañadas de sus reflexiones sobre la naturaleza del espacio físico. Entre 1765 y 1770 sostuvo correspondencia sobre estos asuntos con KANT. LAMBERT no logra dar un paso crucial, a saber, ver la geometría euclídea como la *geometría de otra superficie*: el plano euclídeo. No, para él la geometría euclídea tiene un papel protagónico que la sitúa aparte. Es la geometría del espacio físico.

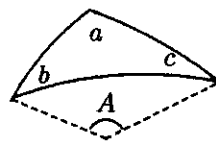
Debe observarse que la introducción de consideraciones de carácter analítico —como son las fórmulas trigonométricas— marca el inicio de una nueva etapa en la investigación del quinto postulado. El enfoque analítico del problema fue explorado por TAURINUS y el propio GAUSS. En el trabajo del primero, el estudio de las fórmulas hiperbólicas, la reiterada vinculación a la geometría de una esfera de radio imaginario y, principalmente, la proposición que vincula el área de

un triángulo hiperbólico con su defecto, fueron abriendo paso a una forma distinta de conceptualizar el problema. En efecto, las fórmulas de la trigonometría hiperbólica expresaban relaciones matemáticas coherentes; si había una superficie cuya geometría tuviese asociada tal trigonometría, aquella coherencia sería reflejo de la posibilidad de existencia de dicha geometría. Faltaba poco para que se diera el paso en firme que faltó a LAMBERT.

En 1825 y 1826 aparecieron dos libros de geometría de TAURINUS. El primero se oponía a la posibilidad de una geometría no-euclídea debido que “repugna a la intuición”, argumento que nos recuerda a los de SACCHERI. En el segundo, empero, su posición cambia y nos habla entonces de una geometría logarítmico-esférica que, sin embargo, añade, no puede corresponder a un plano aunque sí a otra posible superficie —pero no dice a cual superficie. Describamos brevemente el trabajo analítico de TAURINUS. Partiendo de la fórmula que vincula los lados con los ángulos de un triángulo esférico:

$$\cos\left(\frac{a}{k}\right) = \cos\left(\frac{b}{k}\right)\cos\left(\frac{c}{k}\right) + \sin\left(\frac{b}{k}\right)\sin\left(\frac{c}{k}\right)\cos A,$$

donde k es el radio de la esfera, a, b, c son los ángulos del triángulo esférico y A el ángulo central subtendido por el arco en cuyos extremos se encuentran los ángulos b y c .



Si como radio usamos ik , se obtiene, de la fórmula anterior, la siguiente:

$$\cosh\frac{a}{k} = \cosh\frac{b}{k}\cosh\frac{c}{k} - \sinh\frac{b}{k}\sinh\frac{c}{k}\cos A$$

Esta relación vale entonces para los triángulos de la esfera de radio imaginario. Desde luego, el problema es entender a qué nos estamos refiriendo cuando hablamos de esferas de radio imaginario. TAURINUS no aclaró este punto crucial, aunque consideró de importancia capital su esclarecimiento. Su trabajo tiene un aura de misterio. La última fórmula, empero, permite concluir que en

tal "geometría" la suma de los ángulos de un triángulo es inferior a 180 grados.

§4. Gauss

GAUSS (1777-1755), uno de los mayores matemáticos de la historia, fue quizás quien primero comprendió las implicaciones de una geometría no-euclídea. Por razones muy diversas, nunca publicó sus trabajos sobre el tema. Para conocer su trabajo hay que recurrir a la correspondencia que sostuvo con sus allegados a quienes confió parte de sus reflexiones. Parece que desde muy joven GAUSS se interesó por el problema; al comienzo, tal como hicieron SACCHERI y LAMBERT, GAUSS trató de demostrar el quinto postulado mediante reducción al absurdo. Creía entonces que la geometría del espacio físico era euclídea. Gradualmente se fue convenciendo de la posibilidad de existencia de otras geometrías lógicamente consistentes, sin calibrar todavía (algo que haría después) las conexiones entre tales geometrías posibles y la naturaleza del espacio. Hacia 1799 escribió a su amigo Farkas BOLYAI (padre de Janos BOLYAI, considerado como uno de los creadores de las geometrías no-euclídeas):

En cuanto a mí, he hecho algún progreso en mi trabajo. Sin embargo, el camino que he elegido me ha conducido a lugares distintos a los esperados... que me hacen dudar de la veracidad misma de la geometría. Ciertamente he encontrado resultados que muchos considerarían demostrados, pero que a mis ojos no lo están. Por ejemplo, si uno pudiera hallar un triángulo de área arbitrariamente grande, entonces estaría preparado para demostrar que la geometría es totalmente rigurosa. Para muchos, esto puede parecer un axioma, pero no para mí... podría ocurrir que hubiese un límite al área de cualquier triángulo, sin importar que tan separados estuvieran sus vértices entre sí.

Fue WALLIS quien utilizó la existencia de triángulos de área arbitrariamente grande como un postulado. Hoy sabemos que esta afirmación es lógicamente equivalente al quinto postulado, de manera que los comentarios de GAUSS señalan que estaba al tanto de esta situación y que no había que confundir lo intuitivamente claro con las verdades necesarias de la geometría. Está implícita ya, en el trabajo de LAMBERT y TAURINUS, la existencia de una cota superior para las áreas de los triángulos: el área de un triángulo es proporcional a su defecto.

En 1817 GAUSS escribe a su amigo el astrónomo (aficionado) OLBERS:

Cada vez estoy más convencido que la verdad necesaria de nuestra geometría no puede ser demostrada...

hasta entonces, deberemos colocar la geometría sobre las mismas bases... que la mecánica.

Esta cita ya no deja lugar a dudas: las dificultades para demostrar el quinto postulado, lo han llevado a dudar de la naturaleza euclídea del espacio físico. De alguna manera, la demostrabilidad del postulado y la naturaleza del espacio empiezan a aparecer como problemas desvinculados. En este punto es obligatoria la referencia a la carta que envió a TAURINUS en 1824:

La hipótesis de que la suma de los ángulos de un triángulo sea menor que 180 grados da lugar a una geometría curiosa, muy diferente a la nuestra (la euclídea) que he desarrollado a mi entera satisfacción, tanto que puedo, en ella, resolver cualquier problema excepto la determinación de una constante que no puede ser determinada a priori... los teoremas de esta geometría parecen paradójicos y hasta absurdos... pero calma, una reflexión sostenida revela que no contienen nada imposible. Por ejemplo, los tres ángulos de un triángulo se hacen arbitrariamente pequeños si tomamos los lados suficientemente grandes, a pesar de lo cual el área permanece siempre acotada... No encuentro contradicciones en esta geometría no-euclídea a pesar de todos mis esfuerzos... varias veces he expresado mi deseo de que la geometría euclídea no fuera verdadera (en el mundo físico) porque entonces tendríamos una unidad absoluta de longitud...

Si la geometría no-euclídea (la versión hiperbólica, para mayor claridad) fuera "la verdadera" con relación al espacio físico, entonces las áreas de los triángulos tendrían un límite superior en términos de la suma de los ángulos del triángulo en cuestión. Dado que el radián puede ser tomado como unidad absoluta de medida angular, quedaría determinada también una unidad absoluta de medida para la longitud. Este comentario de GAUSS nos muestra ya que las reflexiones de casi 33 años habían dado sus frutos.

La sugerencia sobre la naturaleza no-euclídea del espacio físico, iba en sentido contrario a las tesis kantianas expresadas por el filósofo de Koenigsberg (1724-1804) en su *Crítica de la razón pura* (1781) cuando GAUSS tenía cuatro años de edad. Como sabemos, KANT señala que el conocimiento del espacio no es empírico sino proveniente de las estructuras apriorísticas del intelecto. Las percepciones sensoriales son organizadas y moldeadas por nuestras estructuras mentales de la misma manera que un recipiente da forma al líquido que se vierte en él. Dado que nuestras percepciones, siempre según KANT, se estructuran de acuerdo a un marco euclídeo, se con-

cluye que sólo esta geometría es posible. Debemos mencionar que, por ejemplo, la teoría de la relatividad ha invalidado estas tesis kantianas al mostrar que la geometría del espacio está determinada por la distribución de masa en el espacio. En su momento, empero, las concepciones epistemológicas de KANT fueron responsables, en gran medida, de la resistencia que encontraron las ideas sobre la posibilidad de una geometría no-euclídea. Además, no podemos olvidar que durante más de dos mil años los geómetras estuvieron empeñados en demostrar la validez del quinto postulado, como consecuencia de una postura ontológica: el espacio físico está descrito fielmente por la geometría euclídea. GAUSS fue consciente de que esta tradición tan añeja representaba una resistencia formidable a sus ideas; sobre todo con el apoyo que ahora recibía del espléndido sistema kantiano. Quizá esto explique su reticencia, que repetidamente aparece en su correspondencia, a hacer públicos los resultados de sus reflexiones. GAUSS no era hombre de polémicas; seguramente conoció las consecuencias de las disputas entre NEWTON y LEIBNIZ.

Cuando, finalmente, GAUSS parecía disponerse a escribir sobre el tema, según consta en carta dirigida en 1831 a SCHUMACHER, recibió de su viejo amigo Farkas BOLYAI su libro *Tentamen inventutem studiosam in elementa matheseos purae introducendi* que contenía el ya célebre apéndice escrito por su hijo Janos BOLYAI sobre la geometría que “había creado de la nada”. La respuesta a F. BOLYAI es un documento polémico. Queremos tan sólo rescatar, para beneficio de este escrito, que en esa carta GAUSS presenta su bella demostración de la relación entre el área y el defecto de un triángulo:

$$\text{área} = k^2(180^\circ - \text{suma de los ángulos})$$

Esta fórmula puede ser interpretada como una espléndida síntesis de las reflexiones de GAUSS. Nos señala la perfecta correspondencia con la fórmula conocida de la geometría esférica, para el cálculo del área de un triángulo esférico:

$$\text{área} (\Delta \text{ esférico}) = R^2(\text{suma de los ángulos} - 180^\circ)$$

donde R es el radio de la esfera. Desde nuestra perspectiva privilegiada podemos decir que uno de los puntos débiles de los geómetras de aquel entonces, fue no haber dado a la constante k (que vimos aparecer en el trabajo de TAURINUS, por ejemplo) una interpretación geométrica. Hoy en día sabemos que, así como el cuadrado del radio R es el recíproco de la curvatura de la esfera, también la constante k es el recíproco del valor

absoluto de la curvatura de una superficie de curvatura constante negativa, que realiza la geometría no-euclídea estudiada por GAUSS y tantos otros geómetras.

§5. Lobachévsky

En 1829 se publicó el primer trabajo sobre las geometrías no-euclídeas. Su autor: Nicolai I. LOBACHÉVSKY (1792–1856), quien desarrolló de manera considerable la teoría de las paralelas. En 1840 publicó una versión en alemán de su trabajo, el cual fue leído y apreciado por GAUSS. Para los geómetras que desarrollaron las ideas no-euclídeas, fue inevitable su enfrentamiento con las ideas kantianas. LOBACHÉVSKY aceptó este reto y en 1835 escribió:

Es bien conocido que hasta la fecha, la teoría de las paralelas ha permanecido incompleta. Los esfuerzos infructuosos realizados desde los tiempos de EUCLIDES hasta la fecha, a lo largo de más de dos mil años, me han llevado a la convicción de que los conceptos involucrados en esta investigación no contienen la verdad de lo que se deseaba demostrar... convencido de mi conjetura escribí mis argumentos en 1826.

Es importante señalar la frase “los conceptos involucrados no contienen la verdad de lo que se desea demostrar”; ella es clave para entender lo que LOBACHÉVSKY está tratando de comunicar en este párrafo. En primera instancia, entendemos de su lectura, el postulado no puede ser deducido —como una verdad necesaria— de los restantes postulados de la geometría euclídea. Yendo un poco más lejos, entendemos que LOBACHÉVSKY está tratando de decirnos que la forma (axiomática) como ha sido desarrollada la geometría es defectuosa al extremo que no permite dilucidar una cuestión tan central como el postulado de las paralelas. Por eso, él propone un enfoque diferente de desarrollo de la geometría que expone, de manera por demás brillante, en su libro *Principios de geometría*, en donde toma como punto de partida la noción de *contacto entre los cuerpos*. Es decir, la geometría empieza con un estudio de los sólidos, luego se pasa las superficies como fronteras de sólidos y finalmente aparece la línea recta. Un orden inverso al que sigue EUCLIDES, y que no fue cuestionado por los geómetras durante todo el largo período de exploración del quinto postulado.

LOBACHÉVSKY no aceptó de manera acrítica la hipótesis del ángulo agudo para desarrollar su geometría; primero, desarrolla su concepción de la geometría del espacio; nos dice:

Las superficies, las líneas, los puntos así como se definen en la geometría sólo existen en nuestra imagina-

ción; para medir superficies y líneas hacemos uso de los cuerpos...

El concepto de *contacto* equivale a la posibilidad de dividir un cuerpo en secciones de diferentes tipos y de recomponerlas nuevamente. Los diferentes tipos de contacto definen las superficies, las líneas y los puntos. Sólo después de desarrollar mediante este acercamiento la llamada *geometría neutra*, es decir, la parte que no depende de un postulado sobre las paralelas, es cuando él nos presenta su teoría sobre la posibilidad de una geometría con más de una paralela a una recta por un punto exterior a ella. En palabras de LOBACHÉVSKY, la geometría neutra es:

El complejo de deducciones derivadas de aquellos conceptos que son concebidos de inmediato en nuestra mente a través de la representación de los cuerpos, representación a la que está atenta nuestra imaginación; deducciones que podemos extraer de la naturaleza directamente sin recurrir a nociones artificiales y extrañas.

En otros términos, para él, la geometría neutra es la que elaboramos a partir de conceptos geométricos fundamentales derivados del movimiento de los sólidos ordinarios. El recurso metodológico que emplea LOBACHÉVSKI consiste en ir presentando resultados de la geometría del plano (neutro) y luego compararlos con los correspondientes resultados de la geometría esférica. Esto cumple con el propósito de ir abriendo camino a las ideas no-euclídeas que nos presentará más adelante a propósito de la hipótesis del ángulo agudo. Algunas de las diferencias fundamentales entre la geometría de la esfera y la geometría neutra del plano, son:

1. La suma de los ángulos de un triángulo esférico es mayor que 180 grados (*diferente* de 180 grados).
2. Las "rectas" de la geometría esférica tienen longitud finita (son los círculos máximos), mientras que la recta plana tiene longitud infinita.
3. Sobre la esfera es posible definir, además de una unidad absoluta de medida angular, una unidad absoluta de medida de longitud. Por ejemplo, podemos tomar como tal la longitud de un círculo máximo.
4. Sobre la esfera, dos triángulos semejantes son necesariamente congruentes; es decir, la igualdad de ángulos implica la igualdad de lados correspondientes.

A esta forma de geometría no-euclídea no podía LOBACHÉVSKY dedicar sus esfuerzos, ya que él incluía entre los conceptos primitivos de su geometría, la infinitud

de la recta. Sin embargo, la esfera era algo así como un "objeto de reflexión" que mostraba también las diferencias y analogías entre los resultados de la geometría basada en la hipótesis del ángulo obtuso y la del ángulo agudo. Por ejemplo, lo que en la esfera es el exceso del triángulo, en la geometría de la hipótesis del ángulo agudo es el defecto del triángulo.

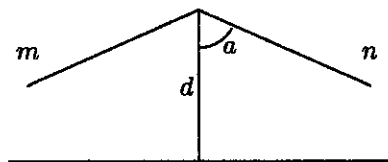
Como bien escribe LOMBARDO-RADICE, LOBACHÉVSKY no es sólo un lógico, también es un físico, un experimentador. El hecho que la "medición real" nos lleve a concluir la veracidad del teorema de PITÁGORAS y que la suma de los ángulos del triángulo es 180 grados, tan sólo es una prueba de la concordancia de la geometría ordinaria con la experiencia ordinaria, dentro de los límites de la observación ordinaria, y no más allá de éstas. Por ejemplo, la suma de los ángulos de un triángulo puede diferir de 180 grados por una cantidad muy pequeña, insensible a las mediciones prácticas por precisas que éstas sean. Pero las diferencias pueden hacerse ostensibles a medida que abandonamos la esfera de nuestra experiencia ordinaria. Esta reflexión llevó a LOBACHÉVSKY a intentar la exploración empírica de la naturaleza del espacio físico mediante el cálculo de la suma de los ángulos del triángulo formado por la tierra, el sol y la estrella Sirio. Desafortunadamente para sus propósitos, todavía a esta escala, las diferencias con respecto a los clásicos 180 grados resultaba despreciable.

Para LOBACHÉVSKY, los principios geométricos no se derivan exclusivamente de la razón, con independencia de los objetos materiales. Los principios de una ciencia son el resultado último de la investigación, son resultado de un delicado proceso de abstracción. Todo su trabajo puede verse como inmerso dentro de un programa de sistematización de la investigación matemática. El elemento dialéctico de su obra se manifiesta en la toma de conciencia de la existencia de diferentes esferas de validez de las "leyes geométricas". La geometría euclídea era, en este enfoque, la geometría práctica.

LOBACHÉVSKY utilizó las fórmulas de la trigonometría hiperbólica como soporte de la coherencia lógica de su sistema geométrico. Bajo la hipótesis del ángulo agudo, pudo demostrar que en la figura anexa, si las rectas m y n son las paralelas a derecha e izquierda (en la geometría euclídea el ángulo de paralelismo es recto y, por lo tanto, las rectas coinciden) entonces se cumple la siguiente relación fundamental:

$$\operatorname{tg} \frac{a}{2} = \exp(-d)$$

que muestra, analíticamente, la relación entre la unidad de medida angular y la unidad de medida de longitud.



Mediante el recurso de los métodos analíticos, se pudieron establecer las bases de una geometría no-euclídea recurriendo a figuras que, podríamos considerar como “metáforas” de los objetos geométricos de tal sistema. Coincidimos con GRAY, en que no ha sido suficientemente valorado el papel que jugó en el trabajo estrictamente técnico de la geometría de LOBACHÉVSKI (también en la versión de BOLYAI, que no vamos a considerar aquí) el recurso a los métodos analíticos.

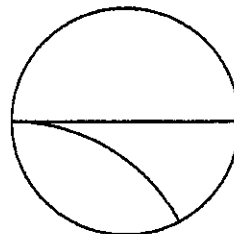
Intentemos una síntesis de lo expuesto hasta ahora:

- (i) La casi totalidad de géómetras anteriores a GAUSS, vieron el problema de las paralelas como la oportunidad de corregir una deficiencia en los *Elementos* de EUCLIDES. No tuvieron duda alguna sobre la naturaleza euclídea del espacio. Tampoco sobre la coherencia del sistema euclídeo, pues lo suponían un fiel reflejo del espacio. En esencia, era un problema ubicado dentro del terreno deductivo. No había preocupaciones ontológicas derivadas de una reflexión sobre la naturaleza del espacio.
- (ii) GAUSS y LOBACHÉVSKY (también J. BOLYAI) plantearon el problema de modo distinto. En la imposibilidad de hallar una demostración del quinto postulado no vieron la incapacidad de los géómetras, sino la incapacidad del sistema geométrico para reflejar, por un lado, la naturaleza del espacio y, por otro lado, para suministrar los elementos necesarios para producir una demostración del postulado.

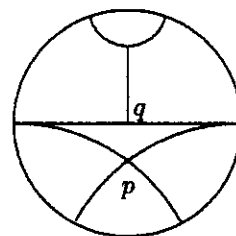
Ninguno de ellos logró, empero, pasar de la convicción a la verificación de la consistencia de la geometría. Desde luego, esto es natural ya que, en gran medida, fue a raíz de la investigación sobre el quinto postulado como se dió la toma de conciencia sobre la construcción de modelos de un sistema axiomático con el propósito de verificar su consistencia. Fue el trabajo posterior de BELTRAMI, KLEIN, POINCARÉ y otros investigadores, lo que permitió esclarecer el problema de la consistencia y fijar, para siempre, a la geometría no-euclídea de GAUSS, LOBACHÉVSKY y BOLYAI, en el mapa de las matemáticas.

§6. Modelo de Poincaré

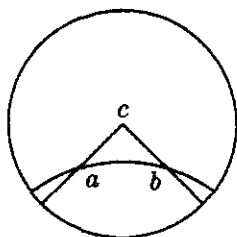
Daremos ahora una pequeña introducción a un modelo, debido a POINCARÉ, de la geometría hiperbólica. Para ello hay que diseñar primero un diccionario. Tomaremos como “plano” de nuestro modelo el interior de un círculo. Los “puntos” serán los puntos del interior de tal círculo y las “rectas” los arcos de circunferencia interiores al círculo y que sean ortogonales al borde del mencionado círculo.



Este dibujo ilustra lo que hemos dicho sobre el modelo. Las rectas pueden ser los diámetros o cualquier otro segmento de circunferencia ortogonal al disco fijo. ¿Cómo podemos ilustrar en el modelo que se cumple el postulado de LOBACHÉVSKY, es decir, que por un punto exterior a una recta pasan al menos dos paralelas? De la

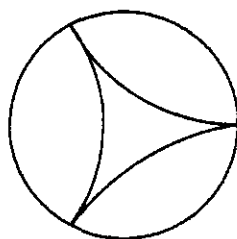


siguiente forma: por el punto p (véase la figura adjunta), exterior a la recta representada por el diámetro, pasan al menos dos paralelas; por el punto q , pasa una “hiperparalela” a la recta representada por el diámetro. Nótese que se ilustra el teorema “dos hiperparalelas tienen una perpendicular común”. Los ángulos se miden, en el modelo, de manera euclídea. La siguiente figura ilustra el teorema central “la suma de los ángulos de un triángulo siempre es menor que 180 grados”: esto “se ve” en el triángulo abc . Por último ilustremos lo que sería un triángulo de área máxima: sabemos que debe ser un



triángulo con defecto máximo, es decir, cuya suma de ángulos sea cero.

Para que el área sea máxima los tres vértices deben estar en el infinito, representado por el borde del círculo del modelo. Estas ilustraciones del modelo de POINCARÉ nos señalan, además, el gran esfuerzo de imaginación que debieron hacer los geómetras que incursionaron en el estudio de esta geometría. Guiados por una intuición extraordinaria y un coraje intelectual que no se detuvo ni ante la epistemología dominante, la de KANT, ni ante cualquier otro obstáculo.



Ante el lector, queda el siguiente reto: articular esta investigación con los desarrollos de la geometría diferencial, en donde la constante intrínseca adquiere su real dimensión: la curvatura del espacio. Entender que el sello característico de la geometría intrínseca de una superficie es la curvatura, abrió posibilidades inéditas a la geometría.

§7. Hacia la estructura

Hasta el siglo XIX la matemática podía apoyarse tanto en la geometría como en el álgebra para buscar sustentación para sus afirmaciones. La toma de conciencia de que el contenido de verdad quedaba sustituido por la consistencia del modelo, volcó los esfuerzos hacia la aritmética. ¿Estaría allí la fuente de verdad que parecía necesaria para continuar el trabajo matemático? Veamos la situación que prevalecía en el cálculo. Desde

GALILEO y NEWTON, una de las tradiciones generadoras del cálculo extrajo, del contexto geométrico del estudio dinámico del movimiento, las reglas de operación del nuevo cálculo. El libro de POLYA, *Matemáticas y razonamiento plausible* reproduce varios ejemplos de esto. Aquí, sin embargo, no puede hablarse de una actitud totalmente anclada en el pensamiento empirista pues en el estudio del movimiento aparece un concepto que no pudo ser extraído de allí: el *concepto de velocidad instantánea*.

El desarrollo del cálculo, del cálculo *infinitesimal*, siguió las líneas que le eran posibles con este sustento conceptual. Desde luego hubo momentos de crisis como el que se dió alrededor del problema de la cuerda vibrante y que en el fondo reflejó una incapacidad del cálculo, hasta ese momento, para modelar el movimiento de un continuo. Pero el momento de crisis que nos interesa registrar se dió durante el siglo XIX. Es cuando WEIERSTRASS publica (1872), gracias a los buenos oficios de su discípulo Paul DU BOIS-REYMOND, su teorema sobre *la existencia de funciones continuas que en ningún punto tienen derivada*. Las consecuencias de este resultado son profundas. Hasta entonces, para hablar de una función continua se decía que era "aquella cuya gráfica puede trazarse sin levantar el lápiz del papel". Aún hoy en día usamos esta expresión cuando queremos dar una idea "informal" sobre la continuidad de una función. Pero el resultado de WEIERSTRASS mostró que se podía hablar de la continuidad en un lenguaje totalmente analítico. Es decir, no era necesario recurrir a las imágenes geométricas, a lo que los dibujos sugerían para poder hablar "con precisión" sobre la continuidad. La existencia de funciones continuas sin derivadas así lo mostraban, pues tales funciones *no se pueden graficar*. Aparecieron desde entonces advertencias sobre lo "peligroso" que resultaba confiar demasiado en las conclusiones extraídas de un dibujo. Se dieron "demostraciones falsas" basadas en dibujos de triángulos, que llevaban a la conclusión de que "todos los triángulos son equiláteros", por ejemplo. *El ojo era digno de desconfianza*, como ha dicho P. DAVIS.

La crisis no era sólo de carácter metodológico. Las estructuras conceptuales, la continuidad, por ejemplo, debieron entonces ser revisadas. Esto nos habla de un cambio en la naturaleza misma del conocimiento. Una vez más el problema de la desustanciación. La toma de conciencia sobre la estructura. Desde luego, en esta perspectiva se quedan muchas cosas por fuera: unas por la presión del tiempo, otras por mi desconocimiento. Pero creo que lo que sí puede verse, desde los ojos de

nuestra teoría —parafraseando a HANSON— es que la idea de demostración está vinculada orgánicamente a la concepción de los objetos de la matemática y que ambos son resultado de una historia.

Bibliografía

1. **Euclides**, *Elementos de Euclides*, Gredos, Madrid, 1991.
2. **Hilbert, D.**, *Fundamentos de la geometría*, C.S.I.C., Madrid, 1952.
3. **Courant, R. , Robbins, H.**, *¿Qué es la matemática?*, Aguilar, Madrid, 1962.
4. **Whiteside, T.**, *it Mathematical Papers of I. Newton*, Cambridge University Press, 1967.
5. **Bonola, R.**, *Non-Euclidean Geometry*, Dover, New York, 1955.
6. **Lobachévsky**, *Nuovi Principii della Geometria*, Lombardo-Radice (ed), Boringheri, 1974.
7. **Torreti, R.**, *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré*, Reidel, 1978.
8. **Piaget, J y García**, *Psicogénesis e historia de la ciencia*, Siglo XXI, 1982.

UTILIZACION DE LAS MARIPOSAS COMO BIOINDICADORAS DEL TIPO DE HABITAT Y SU BIODIVERSIDAD EN COLOMBIA

por

M. Gonzalo Andrade-C*

Resumen

Andrade-C., M.G.: Utilización de las mariposas como bioindicadoras del tipo de hábitat y su biodiversidad en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **22**(84): 407-421. 1998. ISSN 0370-3908.

El estudio de las mariposas de Colombia en un rango altitudinal comprendido entre los 250 y los 3000 m de altitud, ha permitido describir la distribución local de la comunidad de mariposas en tres ecosistemas: Bosque primario (BP), Bosque secundario (BS) y Zonas perturbadas (ZP). Esta descripción se ha hecho con base en algunas condiciones de parámetros ambientales y gradientes, tales como: altitud, clima y condiciones de alteración de la vegetación. Simultáneamente, se ha descrito la estacionalidad de algunas especies, además de registra su actividad diurna y comparación de los datos de la vegetación propia de cada área

Palabras claves: Bioindicadores, Conservación, Biodiversidad, Lepidoptera, Rhopalocera, Colombia

Abstract

This work is the result of the study of Colombian butterflies, across an altitudinal range between 250 and 3000 m, whose primary objective was to describe the local distributions of a community of butterflies in three different kinds of ecosystems: primary forest (BP), secondary forest (BS), and disturbed zones (ZP). These descriptions took under consideration environmental parameters and gradients, such as: altitude, climate and how the vegetation had been changed. At the same time, based on observations and captures of butterflies, the seasonality of several species, their daily activity cycles, and microhabitat fidelity were described.

Key words: Bioindicator, Conservation, Biodiversity, Lepidoptera, Rhopalocera, Colombia

* Profesor Asociado, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Santafé de Bogotá, Colombia, E-mail, mgandrad@ciencias.ciencias.unal.edu.co.

Introducción

Uno de los principales problemas del final de siglo es el "descubrimiento" del potencial económico de la diversidad biológica, y el desespero que causa, el hasta hace poco subdimensionado, proceso de destrucción de los ecosistemas terrestres, en especial de los tropicales. La gigantesca tasa estimada de pérdida de especies (27.000 al año, sensu Agenda Sistemática 2000), plantea la posibilidad de que, en un siglo, más de la mitad de las especies vivientes se consideren extintas. Este problema ha tocado las fibras más hondas de la conciencia humana, toda vez que involucra una posibilidad de pérdidas económicas incalculables, ya que cada especie extinta corresponde a una posibilidad en la pérdida de descubrimiento de algún compuesto con aplicaciones industriales.

Esto ha revertido muchas situaciones y enfrenta a los países tropicales a múltiples posibilidades de resurrección económica, antes despreciadas, y que ya generan rapiña por parte de consorcios económicos e industriales, dada la acumulación actual de la diversidad biológica, en manos, de naciones con poco poder económico, pero que alcanzan las mayores tasas de crecimiento poblacional y destrucción o transformación de los ecosistemas naturales.

Al igual que para la mayoría del "tercer mundo", la enorme riqueza biológica de Colombia, contrasta de manera evidente con la falta de recursos económicos para, al menos, conocer lo que tenemos y definir cuales áreas deben mantenerse al margen de los procesos de colonización. En adición, la acelerada destrucción de los ecosistemas, ha planteado la necesidad de realizar estudios de conservación en el menor tiempo posible, y con el mínimo de gastos; esto para conformar la imposibilidad práctica de realizar inventarios completos de la biota, labor básica para la selección, el diseño y el manejo de áreas prioritarias de conservación.

Aunque la pérdida acelerada de los ecosistemas naturales es un fenómeno extendido a todo el país, existen zonas donde este proceso es ahora muy pronunciado. Una de éstas es el Piedemonte del costado Este de la Cordillera Oriental, que por sus características históricas y biogeográficas puede ser considerado como uno de los puntos claves del país y del mundo en cuanto a Biodiversidad. Constituye una zona de convergencia de especies montanas y de las planicies; es el último frente de encuentro de los elementos norte y suramericanos, y probablemente fue, un enclave de selva húmeda estable durante las fases secas del Pleistoceno (Brown 1982, INDERENA 1986, Hernández et al. 1992) Desafortu-

nadamente, debido a que es una zona de alta fertilidad, ha sido también una de las de mayor destrucción para su transformación en áreas de cultivo o potreros de pastoreo.

El área de bosques por debajo de los 1400 m de altitud es la que se reduce más aceleradamente. Este proceso de degradación tiene un agravante, que es la separación de grandes masas arbóreas por las carreteras, caminos o fincas. Este proceso, denominado fragmentación, plantea una serie grande de inconvenientes para las poblaciones animales y vegetales que contiene el bosque. En un fragmento, las poblaciones están aisladas de otra zona de vegetación arbórea, debido a que no están adaptadas a las variaciones microclimáticas drásticas de los ambientes desprovistos de árboles; esto produce su desplazamiento y reemplazo por especies propias de las zonas de borde o de hábitats abiertos, mejor adaptadas a este tipo de variaciones. Se crea entonces una zona de transición dentro del perímetro del fragmento, con una biota característica, denominada "de borde", que usualmente alberga un número de especies menor. Esta zona de "borde" incrementa su área con cada nueva división del bosque, tanto que en fragmentos pequeños todo el parche es una sola zona de transición.

Las poblaciones originales de especies de bosque pueden llegar a fragmentarse de tal modo que las manchas resultantes no pueden mantenerlas, produciéndose extinciones locales. Este proceso paulatino de disminución del hábitat disponible y del número de individuos con posibilidad de intercambio genético es un fuerte generador de procesos de extinción, y desafortunadamente, es un proceso difícil de detectar y monitorear. ¿Cuándo un fragmento de vegetación arbórea deja de ser "representativo" de la biota del bosque nativo y pierde su capacidad de sostenerla? ¿Cómo podemos detectar hasta que profundidad del fragmento se extiende el "efecto de borde"? ¿Existe alguna tendencia en las características de una comunidad sometida a estos procesos que permitan realizar predicciones en comunidades de otras zonas pese a que la composición sea diferente? Estos interrogantes son precisamente las preguntas de investigación que se han planteado durante varios años. Sin embargo, responderlas requiere de altos costos tantos económicos como en lo referente a personal técnico y profesional altamente capacitado. Una de las formas de reducir este esfuerzo es el utilizar grupos bioindicadores como las mariposas.

El presente trabajo es el resultado del estudio de las mariposas de Colombia en un rango altitudinal comprendido entre los 250 y los 3000 m de altitud; el

objetivo principal ha sido describir la distribución local de la comunidad de mariposas en tres zonas diferentes de bosque, como son el bosque primario (BP), el bosque secundario (BS) y las zonas perturbadas (ZP). Esta descripción se ha hecho teniendo en cuenta algunas condiciones de parámetros ambientales y gradientes, tales como: altitud, clima y condiciones de alteración de la vegetación. Simultáneamente, con base en observaciones y capturas de las mariposas adultas, se señala la estacionalidad de algunas especies, además de registrar su actividad diurna, una comparación de los datos de la vegetación propia de cada área permitió determinar la presencia o ausencia de las plantas hospedantes de las orugas de las mariposas para poder describir la residencialidad y migración de las especies de mariposas encontradas en las tres zonas. Además de registrar su actividad diurna, también se proporcionan datos ecológicos sobre los depredadores de las mariposas, abundancia relativa de algunas especies y especies consideradas como bioindicadoras de bosque primario, bosque secundario y zonas perturbadas.

Los datos proporcionados sirven de base para iniciar un estudio sobre conservación de especies de mariposas en Colombia, pretendiendo de esta manera, llevar a cabo una interpretación biogeográfica de conjunto y de cada una de las especies que hayan sido citadas para estas zonas, iniciando con la lepidopterofauna de las montañas, ya que dentro de esta zona, se reúnen varias especies de las más estenotópicas, y al parecer, se encuentran las comunidades con mayor número de residentes originales posibles.

Zonas de estudio

La siguiente es la lista de las localidades estudiadas en los tres tipos de bosque. Las mismas permiten mostrar la biodiversidad de las mariposas en Colombia.

1. Departamento del Meta, municipio de Cubarral, altitud 450 m.
2. Departamento de Cundinamarca, municipio de Yacopí, inspección de policía de Guadualito, altitud 1450 m.
3. Departamento del Cesar, municipio La Jagua de Ibirico, Serranía de Perijá. Altitud 350 m.
4. Departamento de Nariño, municipio de Barbacoas, inspección de policía de Altaquer, Reserva Natural Río Ñambí, Altitud 1700 m.

5. Departamento del Caquetá, Municipio de Florencia, inspección de policía de San Vicente del Caguan, Río Pato. Altitud 250 m.
6. Departamento de Risaralda, municipio de Pereira, corregimiento de La Florida, Parque Regional Natural de Ucumarí, Altitud entre 1500 y 3000 m.
7. Departamento de Risaralda, municipio de Mistrató, Inspección de policía San Antonio de Chamí, altitudes entre 1200 y 1800 m.
8. Departamento de Risaralda, municipio de Pueblo Rico, altitudes entre 1000 y 1700 m.
9. Departamento de Risaralda, municipio de Mistrató, inspección de policía de San Antonio de Chamí, Alto de Pisonés, altitudes entre 800 y 2200 m.

Para hacer un análisis desde el punto de vista biogeográfico las anteriores localidades se agruparon de acuerdo con los refugios cuaternarios propuestos por Brown, así:

Refugio Villavicencio: Villavicencio, Yacopí, Chingaza, Macarena, Acacias, Restrepo.

Refugio Catatumbo: Serranía del Perijá.

Refugio Chocó: Chocó, Nariño (La Planada, Ñambi, Guayacana, Tumaco, Barbacoas).

Refugio Cauca: Mistrató, Parque Ucumarí, Pueblo Rico, San Antonio del Chamí, Alto Pisonés.

Refugio Putumayo: Putumayo, San Vicente del Caguan, cuenca del Río Pato.

Refugio Loreto: Amacayacú, Apaporis –Tabatinga.

Refugio Imerí: Serranía de Chiribiquete.

Por qué utilizar los insectos como bioindicadores del hábitat

Una de las preguntas que con mas frecuencia nos hacemos es ¿Por que utilizar los insectos como bioindicadores del hábitat?, esto obedece a cinco aspectos fundamentales, alta riqueza y diversidad de especies, fácil manipulación, fidelidad ecológica, fragilidad frente a perturbaciones mínimas y corta temporalidad generacional, teniendo en cuenta para cada uno de ellos lo siguiente:

Alta riqueza y diversidad de especies: cuatro de cada cinco especies de animales son insectos, lo que en términos de probabilidades facilita cualquier labor de captura

Fácil manipulación: Con excepción de las especies con riesgos de efectos tóxicos para el hombre, la mayoría requieren bajos esfuerzos de captura, ya sea con trampas de baja o gran selectividad. El tamaño de los ejemplares reduce la labor de captura y el desplazamiento de muestras

Fidelidad ecológica: Muchas especies de insectos pueden presentar rangos estrechos de tolerancia a los factores abióticos; esto permite, en principio, relacionar determinados grupos de insectos con determinados hábitats y microhábitats

Fragilidad frente a perturbaciones mínimas: Este factor permite seleccionar variables demográficas o de comportamiento que pueden ser medidas u observadas en el campo, y lo que es más importante, que tengan una estrecha correlación con las variables abióticas preseleccionadas

Corta temporalidad generacional: A diferencia de la mayoría de animales, un gran número de especies son polivoltinas, es decir con varias generaciones en un ciclo anual, lo que posibilita gestiones de monitoreo a corto plazo.

Entre 1963 y 1967 **Mac Arthur & Wilson** plantearon los principales postulados de su teoría de la Biogeografía de Islas (propuesta de manera simultánea por **Preston** en 1962, sensu **Brown & Lomolino** 1989), éstos son: existe una relación directa entre el área de la isla y el número de especies que contiene? (una isla grande tiene más especies que otra más pequeña), existe un efecto de aislamiento pronunciado? (islas remotas tienen menos especies que aquellas cercanas al continente), y existe un proceso de recambio o alternancia de las especies de una isla (cuando las islas son colonizadas, los colonizadores usualmente reemplazan a los extintos) **Shafer** 1990. Ellos plantearon que en una isla existe un número de especies presentes que depende del número de especies inmigrantes provenientes de la masa continental más cercana, y del número de especies extintas localmente; esos procesos pueden dar lugar a una comunidad isleña con un número constante de especies, pero de composición variable con el tiempo. De acuerdo con estos preceptos, se predice que la tasa de inmigración variará respecto de la distancia a una masa continental, y que la tasa de extinción variará principalmente con

respecto de la distancia a una masa continental y que la tasa de extinción variará principalmente con respecto al área de la isla, pero también con respecto a su distancia de una masa continental (**Shafer** 1990, **Harris** 1984).

Esta teoría puede ser extendida, aunque con sus condicionamientos, a hábitats continentales aislados, bien por intervención humana, o bien por la distribución natural de las unidades paisajísticas (**Harris** 1984, **Shafer** 1990, **Harris & Silva-López** 1992). Un ejemplo de esto puede ser un fragmento de bosque inserto entre un pastizal, una pradera o una sabana, o el caso contrario, un sector de sabana o catinga baja en medio de la selva pluvial amazónica. Para el primer caso, las especies del bosque están aisladas en otra zona de vegetación arbórea más grande por alguno de los hábitats en mención, que se caracterizan por tener condiciones ambientales substancialmente diferentes. Un fragmento de vegetación boscosa está sujeto a varios procesos perjudiciales para el mantenimiento de la biota que sostiene; el principal es la exposición de las especies del bosque, habituadas a la estabilidad microclimática de su interior, a las variaciones de temperatura, humedad, vientos o radiación más drásticas de los ambientes desprovistos de cubierta arbórea; esto produce su desplazamiento y reemplazo por especies propias de las zonas de borde o de hábitats abiertos, mejor adaptadas a este tipo de variaciones (**Lovejoy** et al. 1984, 1986). Se crea entonces una zona de transición dentro del perímetro del fragmento con una biota característica, denominada "de borde", que probablemente tenga en promedio una abundancia relativa más alta, pero que seguramente también tendrá menor número de especies que las que puede sostener un bosque tropical no fragmentado, una de las características del bosque tropical es tener un número muy alto de especies, pero con abundancias muy bajas (**Lovejoy** et al. 1986). Este ecotono incrementa su real conforme se reduce el área del fragmento; en tamaños pequeños se llega a un punto en el que toda la mancha es una sola zona de transición, que ya no alberga las especies propias del bosque y, por ende, tampoco sostiene su alta biodiversidad (**Harris** 1984, **Lovejoy** et al. 1984, 1986, **Gilpin & Soule** 1991, **Harris & Silva-López** 1992).

El segundo proceso perjudicial es la separación de poblaciones. La mayoría de los organismos del bosque quedan aislados, pues generalmente no les es posible pasar de un fragmento a otro, debido a las condiciones microclimáticas adversas, a la presión de los depredadores de zonas abiertas, a limitaciones en su capacidad de desplazamiento o a otras de diversa índole (**Harris** 1984). En casos extremos la población original puede llegar a

fragmentarse de tal modo que las manchas resultantes son tan pequeñas que no pueden mantener poblaciones estables, produciéndose extinciones locales (Harris & Maser 1984, Gilpin & Soule 1991, Stiling 1996, Turner & Mallet 1996). El área de hábitat típico a partir del cual es posible mantener una población estable de algún organismo se denomina "área mínima" y varía de acuerdo con la especie (Wilcox & Murphy 1985, Lomolino et. al. 1989, Lacy 1992, Villard et. al.1995). Este proceso paulatino de disminución del hábitat disponible y del número de



Foto 1. *Heliconius erato*, indicadora de bosque secundario.



Foto 3. *Archaeoprepona ligia*, indicadora de bosque primario



Foto 2. *Pierella lesbia*, indicadora de bosque primario



Foto 4. *Mechanitis menapis*, indicadora de bosque secundario, hembra y macho



Foto 5. *Oressinoma typhla*, indicadora de zona perturbada

individuos con posibilidad de intercambio genético, es un fuerte generador de procesos de extinción y, desafortunadamente, es un proceso difícil de detectar y monitorear. ¿Cuándo un fragmento de vegetación arbórea deja de ser "representativo" de la biota del bosque nativo y pierde su capacidad de sostenerla? ¿Cómo podemos detectar hasta qué profundidad del fragmento se extiende el "efecto de borde"? ¿Existe alguna tendencia en las características de una comunidad sometida a estos procesos que permita realizar predicciones en comunidades de otras zonas, pese a que la composición sea diferente?.

Las respuestas a estos interrogantes involucrarían un análisis detallado de la biota en fragmentos de diferente tamaño; por su puesto, un trabajo de este tipo requeriría un esfuerzo monumental. A estas preguntas se puede responder mediante el análisis detallado de los patrones de variación de riqueza, diversidad y composición en fragmentos pero solo de algunos grupos de taxonomía y biología relativamente bien conocida, que tras su análisis y comparación con los resultados obtenidos en el estudio de vegetación, permitan plantear propuestas sobre su uso como bioindicadores de procesos de fragmentación y efecto de borde en bosques tropicales y diferentes ecosistemas del país.

El hacer uso de especies o grupos taxonómicos capaces de reflejar el estado de conservación de una biota su biodiversidad, endemismo o grado de intervención, es el principio fundamental de los Bioindicadores (Coddington et. al. 1991, Brown 1991, Colwell 1994, Colwell & Coddington 1996, Pearson 1994^a); estos son taxones o grupos de especies de biología y taxonomía bien conocidas que sean fácilmente identificables y manipulables tanto en el campo como en laboratorio. Además deben ser abundantes, estables y preferiblemente sedentarios dentro de un ecosistema; deben estar ecológicamente bien diversificados, y es preferible que tengan ciclos de vida cortos y alta sensibilidad y fidelidad ecológica. Estas características se complementan si presentan áreas definidas de endemismos y centros de diversidad (Brown 1991, Pearson 1994b).

Muchos de los trabajos realizados con bioindicadores han sido hechos en insectos, grupo que, además de presentar los requerimientos anteriores, posee densidades poblacionales usualmente altas, lo que permite realizar análisis numéricos o estadísticos comparativamente relevantes. Dos de los grupos que han sido empleados para tales fines son las mariposas y las hormigas (Holloway & Hebert 1979, Brown 1982, 1987, 1991, Lovejoy 1984, Lovejoy et. al. 1986, Andersen 1990, Holloway & Stork 1991, Kremen 1992a, 1994, Ozane 1996, Lowman et. al.

1996, Majer & Beeston 1996, Dufrene & Legendre 1997). Precisamente, uno de los grupos animales que más sobresale en cualquier unidad paisajística, es el de las mariposas; sus colores brillantes, usualmente contrastantes con el medio, y su vuelo, más lento que el de los vertebrados, y distintivo para diferentes grupos taxonómicos, hace que su identificación sea relativamente sencilla y que no implique un sacrificio excesivo de animales.

Por que las mariposas

Teniendo en cuenta todo lo anterior, entonces nos preguntamos ¿Por qué las mariposas?, y para responder esto debemos tener en cuenta que cumplen con los requerimientos que debe tener taxón determinado para ser considerado como bioindicador; los mismos son:

- Taxonomía bien conocida y estable.
- Buen conocimiento de su biología e historia natural.
- Facilidad de observación en el campo.
- Amplitud de ocupación de hábitats y rango geográfico.
- Especialización de hábitat de algunas especies.
- Patrones biológicos correlacionados con otros taxa.

En nuestro país el uso de las mariposas como bioindicadores es un tema del conocimiento relativamente reciente; los estudios se han concentrado más que nada a análisis de tipo descriptivo, de los que se han publicado comentarios generales y anotaciones sobre géneros representativos así: Vélez y Salazar (1991), Adams (1985, 1986), Callaghan (1986), Salazar (1989, 1990a, 1990b, 1991a, 1991b, 1991c, 1995), Andrade-C. (1994, 1995), Andrade-C. & Amat (1996). No obstante, cabe destacar que este es un campo de trabajo muy reciente, no solo en nuestro país, y que las investigaciones con métodos de registro específicamente dirigido a comparaciones entre hábitats y análisis numéricos y estadísticos solo aparecieron en 1984, con el análisis que Brown Jr. realizó para mariposas, dentro del trabajo general de Lovejoy et al. 1984, 1986. Esta línea de investigación alcanzó su madurez con los trabajos que Kremen y su grupo el cual realizaron en Madagascar (Kremen 1994) y con los lineamientos generales dados por Ehrlich (1992); cabe destacar las anotaciones de De Vries (1987, 1996), los trabajos del grupo dirigido por Llorente-Bousquets en México (Luis-Martínez & Llorente-Bousquets 1990) y el trabajo sobre variación altitudinal de las mariposas de España central de Sánchez-Rodríguez & Baz (1995).

Estas características han permitido que las mariposas hayan sido frecuentemente utilizadas en estudios de los



Foto 6. *Actinote eresia*, indicadora de zona perturbada



Foto 7. *Consul fabius*, indicadora de bosque primario



Foto 8. *Archonias tereas*, indicadora de bosque secundario



Foto 9. *Pseudohaetera piera*, indicadora de bosque primario



Foto 10. *Agryas amydon*, indicadora de bosque

procesos biogeográficos tendientes a comprender la biodiversidad del trópico y su alteración antrópica (Brown 1982, Levins 1982, 1983, Lovejoy et al. 1984, 1986, New 1990, Kremen 1992a, 1992b, 1994). Dentro de los trabajos que han empleado mariposas y polillas como indicadores, cabe destacar los de Brown (1979, 1982), Lovejoy et al. (1984; 1986), Holloway (1985), citados por Brown, 1991, los cuales discutieron el uso de las mariposas como indicadores en comparación con otros taxones (aves y mamíferos), encontrando que las mariposas presentaban mayor fidelidad ecológica en ecosistemas neárticos, siendo más aptas para el reconocimiento de hábitats y comunidades vegetales que los otros grupos. Dado que el grupo está mucho más diversificado en zonas tropicales, es de esperar que dicha fidelidad sea aún más alta en nuestras latitudes

Buena parte de los trabajos en comunidades de artrópodos se enmarcan dentro de la teoría general de Biogeografía de islas de McArthur y Wilson (Gilbert 1984). Aunque la mayoría de estas investigaciones se han realizado en vertebrados. Bierregaard & Lovejoy (1989), entre otros, cabe recalcar que en artrópodos, ya desde 1948, se realizaban trabajos sobre el tema, como el de E. Munroe en 1948 citado por Gilbert (1984), quien encontró una correlación entre el número de especies de mariposas y el tamaño del área de las islas de las Indias Occidentales. En cuanto a comunidades de fragmentos de bosque, se ha demostrado que la varianza en el número de especies de mariposas de fragmentos de vegetación boscosa era debido principalmente al tamaño del área; en adición, De Vries (1987), Lovejoy et al. 1984, 1986, Brown (1991) y Kremen (1992b, 1994) mencionan la variación en la composición de las comunidades de acuerdo con el grado de intervención en parcelas de vegetación boscosa.

Al igual que para los animales, las plantas también se ven afectadas con los cambios en las condiciones microclimáticas en los fragmentos de bosque, y por el aislamiento genético de sus poblaciones. En ecosistemas tropicales estos inconvenientes pueden ser más agudos, debido a que buena parte de las especies presentan densidades poblacionales bajas, son dióicas o tienen mecanismos de autoincompatibilidad, y para empeorar, dependen en su mayoría, de animales del bosque para su polinización o para la dispersión de las semillas. Es de esperar que el efecto de la fragmentación sea aún más dramático en un bosque tropical lluvioso, donde las relaciones de polinización son más específicas, y donde la dispersión entre plantas de la misma especie es mayor.

Biología de las mariposas como bioindicadoras

Para poder analizar esto debemos tener en cuenta dos aspectos: Residencialidad de las mariposas y gremios alimenticios en orugas y adultos:

Residencialidad de la comunidad de mariposas

La compilación florística, se utilizó para determinar la posible residencia de los taxones componentes de la comunidad de mariposas; ya que de manera simultánea y con base en la literatura lepidopterológica, cada especie de mariposa se registró dentro de un área específica en Colombia, considerando lo siguiente: si la planta huésped de la especie de mariposa registrada se incluía en la lista florística, entonces se podría confirmar su residencia, sin olvidar el análisis bajo otros criterios, como el de abundancia, que también influye en este aspecto. Se puede argumentar que la relación trófica entre los fitófagos y

su(s) huésped(es), muchas veces es eurixena y puede variar geográficamente, por lo que es necesario tener en consideración que, aunque en la literatura se citan relaciones tróficas conocidas para otros países no debe repararse en ellas, pues sería erróneo extrapolarlas en todas las especies de mariposas colombianas, además debe tenerse en cuenta, que a menudo los datos de literatura son inexactos.

La intención de cotejar y correlacionar la lista florística para cada una de las zonas de estudio, con la lista de posibles plantas hospedantes de las orugas en estas áreas, sólo ha perseguido lo siguiente 1- Reconocer la posible residencia, 2- Servir de guía para efectuar observaciones de campo, esto es la búsqueda de las orugas en sus plantas de alimentación y 3- Poder determinar el estatus biogeográfico para algunas especies cuya abundancia es relativamente reducida, pues con frecuencia se pueden presentar registros de especies que incluyen tanto a las poblaciones residentes como a las migratorias.

Para aplicar los criterios de posible residencia de las especies en las áreas de estudio, se procedió primero a comparar las dos listas de plantas. La primera sobre las plantas vasculares del cada una de las áreas; la segunda, sobre las posibles plantas de alimentación larval, la cual se efectuó mediante el estudio de decenas de citas bibliográficas, que aparecen para cada taxón; así como, varias observaciones y recolecciones realizadas en la zona permitieron reconocer algunas plantas hospedantes en las zonas de estudio como por ejemplo: *Anartia amathea* y *Anartia jatrophae* en *Lippea* sp.; *Catonephele chromis godmani* en *Alchornea* sp.; *Hypanartia kefersteini* en *Pilea* sp.; *Hypanartia lethe* en *Boehmeria* sp.; *Marpesia coresia* en *Ficus maxima*; *Vanessa virginiensis* en *Senecio* sp.

Como primer criterio para el análisis de la residencia de las especies de mariposas, se cotejó la lista de posibles plantas de alimentación larval de acuerdo con la lista completa de plantas de las zonas de estudio. Para este análisis cada especie de planta se clasificó en una de cinco posibles categorías: 1. La especie hospedante de alimentación larval se registra en las zonas de estudio. 2. El género en que se incluyó la especie hospedante se registra en la zona. 3. La especie hospedante no está en las zonas de estudio, pero si en zonas aledañas. 4. El género al que pertenece la especie hospedante se halla en zonas aledañas, pero no en las zonas de estudio y 5. Ninguna especie, ni el género hospedante se encuentra en las zonas de estudio y en zonas aledañas.

1. Básicamente, aquellas especies de mariposas para las cuales una de sus plantas hospedante se registró en

- las zonas de estudio, se consideró como residente. Se reconoce el criterio de planta hospedante, el de abundancia relativa, estado de conservación de los ejemplares y otros para el citado estatus. Independientemente del uso del criterio de planta hospedante, para determinar la posible residencia de las especies, por ejemplo en el Parque de Ucumari (ver zonas de estudio), se observó que 43 especies de plantas, del total de 581 especies, son posibles fuentes de alimentación larval. Estas 43 especies de plantas ofrecen un sustrato potencial a las orugas de 37 especies de mariposas en la zona, de las cuales 20 presentan poblaciones residentes.
2. En un segundo grupo se incluyen los organismos cuyas plantas hospedantes no se citan para la zona, pero el género al que pertenecen se localiza dentro del perfil de estudio, por la que puede existir una relación trófica con especies cercanas o sustituidas; por lo cual, para el área se registran un total de 130 géneros, de los cuales 14 son posible fuente de alimentación de 21 especies de orugas, siendo 20 poblaciones residentes, tres no residentes y seis entran en la categoría de migratorias. Dentro de este grupo se ofrecen varios casos a continuación: Las especies residentes, como *Hypanartia kefersteini* se nutren principalmente de plantas del género *Pilea*, lo mismo sucede con otros ninfalidos, en la zona de estudio se citan por lo menos 2 especies del género *Pilea*, las cuales son fuente potencial de alimento para las especies de *Hypanartia*. Por otra parte, *Tegosa anieta* según **De Vris** (1987) se alimenta de los géneros *Mikania* y *Vernonia*, los cuales están representados en las zonas de estudio por *Mikania banisteriae* y *Vernonia patens*. Tanto la oruga como su planta de alimentación, son especies restringidas en bosque húmedo, para el caso de *Mikania banisteriae* con un rango altitudinal entre 800 y 2800 m. y para *Vernonia patens* entre 700 y 2500 m.
 3. La tercera categoría comprende aquellas especies que no se encuentran en las zonas de estudio, pero se hallan bien distribuidas en zonas aledañas, pudiendo advertir una influencia directa sobre algunos elementos de las otras áreas, principalmente sobre las especies que entran en la zona y no son residentes, tal es el caso de *Colias dimera*, *Eurema salome*, *Adelpha hypsenor*, *Pycina zamba*, *Leodonta dysoni zenobia*, *Leptophobia aripa* cuyas plantas de alimentación no se localizan en la Serranía del Perijá.

4. En un cuarto grupo tenemos a los géneros presentes en las zonas de estudio y cuyas especies cercanas pueden potencialmente ser utilizadas como recurso, respecto a las especies de zonas aledañas, el resultado es similar al tercer grupo pues sólo pueden caracterizar individuos no residentes o migratorios.
5. En esta categoría se incluyen todos aquellos registros de plantas hospedantes, cuya distribución no alcanza las zonas de estudio y que están en relación con las mariposas citadas para cada una de las zonas; no presentan poblaciones residentes y sólo son registros ocasionales. En la mayoría de los casos, su presencia se debe a que cada zona puede ser un área de paso en sus rutas de migración v. gr. *Diaethria marchalii*. Desde luego, existe un grupo de especies, consideradas residentes por diversos criterios pero en las que se desconocen las plantas hospedantes de las larvas; tal es el caso de: *Cissia ucumariensis*, *Elzunia humboldtii*, *Epiphele epimenes*, *Perisama bomplandii*, *Perisama marianna*, *Perisama alicia*, *Perisama diotima*, *Perisama humboldtii*, *Perisama opelli*, en el Parque de Ucumari

Gremios alimenticios

Las mariposas se pueden clasificar según el tipo de alimento que consumen en estado adulto, en tres gremios alimenticios; (a) las que obtienen su fuente de alimentación de las flores (nectarívoras); (b) aquellas cuyos nutrientes están principalmente en la arena húmeda y charcos, y (c) las que llegan a frutas en descomposición (fermentados) y/o excretas de algunos animales (aves, mamíferos) para alimentarse. Sin embargo, existen especies que pueden enmarcarse dentro de más de una categoría, dependiendo de la zona geográfica que estén habitando, las condiciones ambientales o las preferencias. El segundo gremio se formó indirecta y artificialmente, de acuerdo con los individuos obtenidos mediante la trampa Van Someren-Rydon con fruta fermentada o pescado podrido como señuelo. Dentro de éste, se registraron *Mygona irmina*, *Hypanartia kefersteini* y *Vanessa virginensis*, alimentándose de fruta fermentada y *Catonephele chromis godmani*, *Fountainea nesea* y *Prepona chromus*, alimentándose de pescado podrido.

De acuerdo con lo anterior podríamos definir las especies de mariposas en tres tipos teniendo como nivel de comparación el tipo de hábitat que indican:

Tipo	Estado	Hábitat
I	Ocasional	Hábitat discontinuo
II	Adulto Residente, orugas Oligófagas	Hábitat continuo y heterogéneos
II	Adulto Residente, orugas Monófagas	Hábitat homogéneo

Teniendo en cuenta lo anterior, para trabajar con las mariposas como bioindicadoras del tipo de hábitat se pueden seguir dos direcciones; la primera, si conocemos la calidad del hábitat podemos predecir la comunidad de mariposas que encontraremos en la zona por estudiar; y la segunda, si conocemos la comunidad de mariposas, y el tipo al cual pertenece cada una de las especies, podremos saber la calidad del hábitat que nos indica cada una (Figura 1).

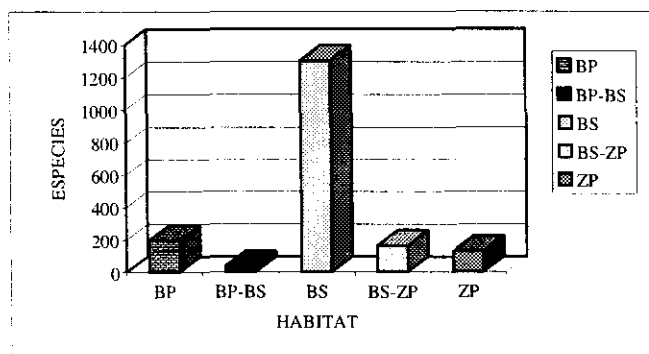
Colecciones estudiadas y literatura utilizada

Para producir un primer listado de especies de Lepidoptera: Rhopalocera utilizadas como bioindicadoras del tipo del hábitat en Colombia, se realizó el estudio de la literatura existente y de las colecciones disponibles en los distintos museos, universidades y centros de investigación en Colombia, España (Madrid), Francia (París) e Inglaterra (Londres).

Las colecciones estudiadas fueron las siguientes:

ICN-MHN Instituto de Ciencias Naturales - Museo de Historia Natural, Universidad

Figura 1. Especies de mariposas según el tipo de hábitat en Colombia



MUJ	Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá.
UN	Museo Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Biología, Unesis, Santafé de Bogotá.
CFLG	Universidad de Nariño, Departamento de Biología, San Juan de Pasto, Nariño.
CUA	Colección de entomología "Francisco Luis Gallego", Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín, Antioquia.
MUC	Colección de entomología, Departamento de Biología, Universidad de Antioquia, Medellín.
MHN-UPTC	Museo Universidad de Caldas, Manizales, Caldas.
BMNH	Museo de Historia Natural, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá.
MNCN	British Museum of Natural History, London, U.K.
MNHN	Museo Nacional de Ciencias Naturales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.
MNHN	Museum National d'Historie Naturelle, Paris, France.

Recolección y observación

El trabajo de campo se desarrolló de la siguiente manera: para cada una de las áreas de estudio se realizaron dos salidas de campo de mínimo 15 días de duración, en cada una se realizaron recolecciones y observaciones. Las recolecciones se iniciaron a las 9:30 horas para terminar entre las 16 ó 17 horas; los sitios de recolección se agruparon para su estudio en cuatro recorridos, explorados y transitados generalmente por una persona.

A lo largo de los diferentes perfiles se dispusieron 20 trampas del tipo Van Someren - Rydon en las que se empleó como señuelo o cebo, una mezcla de frutas en estado de fermentación, o pescado podrido. Las trampas se colocaron a uno o tres metros de altura, tratando de abarcar los diferentes microhábitats del recorrido, por lo que se ubicaron a una distancia de entre 50 y 75 m. una de otra. Paralelamente a la recolección con trampas se realizó lo mismo con la red entomológica aérea,

rastreando a los ejemplares en los distintos sitios a los que concurren en busca de pareja, alimento, agua, protección, o bien en lugares especiales en donde se manifiestan ciertas actividades de conducta como territorialidad, búsqueda de la planta huésped para la oviposición, percheo y termorregulación.

En cada una de las zonas de estudio se realizaron observaciones e identificaciones de algunas especies de mariposas directamente con la ayuda de unos binoculares.

Para cada ejemplar se tomaron los siguientes datos: hora, microhábitat (penumbra, ambientes riparios, arena húmeda, etc), sustrato alimenticio si estaban alimentándose (especie de planta, excremento, frutos en descomposición), conducta (percheo o posible territorialidad, oviposición).

Trampa Van Someren-Rydon

Esta trampa funciona para aquellas especies cuyos requerimientos de nutrientes se encuentran en los frutos en descomposición, animales podridos o excretas de vertebrados. Los organismos que recurren a estos nutrientes conforman grupos de mariposas bien establecidos en áreas tropicales o subtropicales. Por otra parte, el establecimiento de dichas poblaciones está relacionado de manera directa con el tipo de infrutescencias, pues en ellas se observa que las especies del estrato arbóreo-arbustivo presentan frutos predominantemente secos, lo que trae consigo un número muy reducido de frutos carnosos propios para la descomposición, correlacionados con una escasez del número de organismos de las poblaciones que recurren a estas fuentes de alimento. De acuerdo con la literatura, la trampa Van Someren-Rydon fue utilizada por primera vez de manera sistemática e intensiva para áreas de altitudes elevadas en Colombia, concluyéndose que la limitada eficiencia obtenida en el transcurso de los registros puede ser adjudicada, en forma directa, a la flora y al clima, e indirectamente a factores meteorológicos tales como: la temperatura media diaria; ya que se advirtió que en muchas ocasiones la temperatura en las zonas altas, descendía drásticamente y ello evitaba la típica evaporación y olor característico de los líquidos resultantes de la fermentación que ocurre en condiciones más calientes y, por ende, su disseminación en el ambiente no ocurrió siempre, anulando a menudo la posible atracción de las mariposas; la eficiencia de la trampa fue muy baja para estas altitudes, y no representa, en estas zonas en particular, la ventaja que sí registra, en otras áreas a menor altitud y con una mayor riqueza de especies

vegetales con frutos carnosos, en donde el número de especies capturadas por este método, llega a alcanzar de un 25 a un 30 % del total de las especies citadas para una zona dada (Andrade-C., 1994). Finalmente, se puede considerar que el empleo de la citada trampa en altitudes mayores de los 1800 m, es una ayuda opcional para atrapar un mayor número de ejemplares, y no así de especies en la comunidades de mariposas, pues para las consideradas como no residentes, su observación o captura pierde importancia, ya que su presencia en la comunidad está determinada por factores externos a las zonas de estudio.

Discusión

Para poder hacer un análisis mucho más detallado de la biodiversidad de especies de mariposas en Colombia y su utilización como bioindicadoras del tipo de hábitat se trabajo con un número total de 1459 especies, quizá el número mas alto citado hasta ahora para Colombia.

En la figura 2 podemos observar la riqueza de especies de mariposas en cada uno de los refugios cuaternarios de Colombia; el refugio con el número mas alto de riqueza es Putumayo con 457 especies, seguido por el refugio Villavicencio con 290 especies; en tercer lugar el refugio Loreto con 277 especies, a continuación el refugio Cauca con 151 especies, después el refugio Chocó con 113 especies y por último el refugio Imerí con 19 especies.

En la figura 3 se muestran las especies de mariposas exclusivas de cada uno de los tipos de hábitats, los cuales han sido agrupados en cinco tipos: Bosque primario (BP), Bosque secundario (BS), Zona perturbada (ZP), las asociaciones Bosque primario – Bosque secundario (BP-BS) y Bosque secundario – Zona perturbada (BS-ZP); es de anotar que para efectos de indicadoras del tipo de hábitat únicamente se deben tener en cuenta las de los primeros tres tipos de hábitat, es decir BP, BS y ZP: las especies que se ubican en las asociaciones no se consideran como indicadoras de hábitat, quizá debido a que pueden ser migratorias o no residentes en la zona (Tipo I, figura 1), es decir que su presencia en la zona de estudio es ocasional, y que la planta nutricia de las orugas no se encuentra en la zona; por lo anterior se deduce que la mas alta diversidad de especies ocurre en el tipo de hábitat de bosque secundario, para los siete refugios cuaternarios en Colombia, ya que en el refugio Putumayo se encuentran 784 especies exclusivas, seguido por el refugio Villavicencio con 359 especies.

En la figura 4, en donde se indican las especies de mariposas según el tipo de hábitat en Colombia, podemos

Figura 2. Riqueza de especies de mariposas en los refugios cuaternarios de Colombia

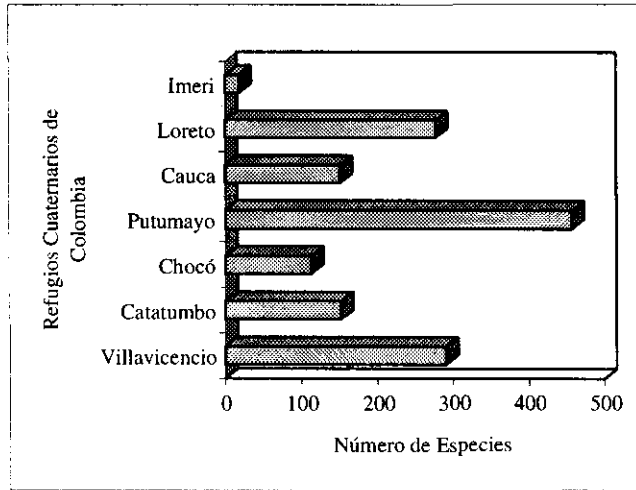
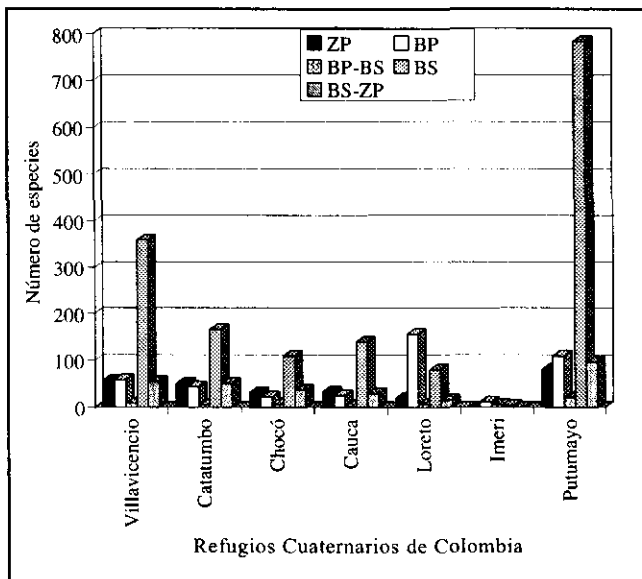


Figura 3. Especies de mariposas exclusivas de cada uno de los tipos de hábitats



notar que al igual que en la figura anterior el Bosque secundario con 1302 especies es el más rico en especies propias de ese tipo de hábitat, seguido del Bosque primario con 198 especies; con 129 especies aparece la Zona perturbada. No obstante las asociaciones del Bosque secundario - Zona perturbada están representadas con 164 especies, y el tipo de Bosque primario-Bosque secundario con 34 especies; lo anterior obedece a que (según Rangel 1998, com. pers) la superficie de bosques en Colombia

esta entre un 50 y 60 %, en un 30 % para Bosque primario y entre 20 y 30 % para uno de tipo secundario o con diferentes grados de intervención, el 40 % restante para una superficie transformada o desprotegida.

No existe método en la literatura para determinar la composición de residentes en una comunidad de mariposas; por lo tanto, los criterios usados en este trabajo; han servido para seleccionar las de las zonas de estudio, pero a la vez son provisionales y pueden usarse en otras áreas. Desde luego, cada uno de los criterios por separado, puede ser bastante discutible; sin embargo tomados en conjunto y aunados a la experiencia sobre la fauna de áreas adyacentes, y al conocimiento de las mariposas de Colombia, puede considerarse con suficiente confianza. Así, de las 1459 especies utilizadas para este estudio, tan solo 1629 se establecieron como residentes en los diferentes refugios cuaternarios de estudio, en donde para cada uno de ellos se consideraban las plantas hospedantes de cada una de las orugas. El conocimiento de la relación fitófago-huésped en mariposas aunque todavía insuficiente, permitió en muchos casos seleccionar especies no residentes o migratorias en la comunidad; 198, especies de mariposas en Colombia, criterio que fue más significativo reconociendo las posibilidades de dispersión de los taxones, su distribución en áreas contiguas y su relación con plantas de cultivo u ornato. La división de las plantas de alimentación de las orugas de las mariposas en las zonas obedeció únicamente a fines prácticos, por lo que su análisis puede perder objetividad; sin embargo, esta división facilitó el trabajo de reconocer la residencia de las especies, ya que existen dentro de las mariposas tres divisiones reales de alimentación larval: la primera se refiere a aquellas especies monófagas que únicamente son capaces de alimentarse de una especie de planta, por lo que la presencia de las dos (tanto la planta como la mariposa), en la zona puede dar margen a reconocer su residencia; el segundo grupo corresponde a las especies oligófagas, que incluye organismos que se alimentan de un grupo de especies de plantas preferentemente enmarcadas en una familia, tal es el caso de *Catasticta incerta* en Lorantheaceae, *Dismorphia arcadia* en Mimosaceae, *Leptophobia eleone* en Brassicaceae. El tercero y último, incluye las especies capaces de alimentarse de un gran grupo de plantas, las cuales se encuentran en dos a más familias (v. gr. *Vanessa virginiensis*), denominadas como especies polífagas; para estos dos últimos grupos fue necesario analizar más características y criterios que permitieran evaluar su estatus de residencia. Esto último pone de manifiesto el error de interpretación que puede acarrear el solo hecho de basarse en los listados

bibliográficos, así como la extrapolación de las erratas que existen tanto en la literatura nacional o extranjera; debido a que en ocasiones los recursos larvales pueden variar geográficamente, tanto a nivel poblacional y específico, como supraespecífico, además de considerar que en muchas ocasiones la determinación taxonómica de la planta hospedante es errónea. Cuando una población resultó muy abundante (espacial y estacionalmente) en las zonas de estudio, se consideró como alta la probabilidad de que fuera residente, principalmente si los organismos presentaban poco deterioro y se podían reconocer como individuos nuevos o seminuevos. De acuerdo con ello, se indica su emergencia en las zonas de estudio, evidencia de que el ciclo de vida se desarrollaba *in situ*. Generalmente los ejemplares que migran presentan desescamación, daños alares y vuelos irregulares, aún en el caso de movimientos locales. En la mayoría de los casos, para las especies no residentes o migratorias no se reconoció su planta de alimentación dentro de las zonas, lo que reflejó que se trataba de elementos externos a las zonas. Con lo expuesto, queda claro que los criterios tomados en conjunto: abundancia relativa, reconocimiento de las plantas hospedantes, estado de los ejemplares, junto con otros criterios, determinaron la decisión sobre el estatus de residencia de las especies.

Agradecimientos

Al Instituto de Ciencias Naturales y a la Universidad Nacional de Colombia por todo su apoyo durante estos siete años en los que me ha permitido desarrollarme como investigador y docente, al IDEAM, Fondo FEN Colombia, Agencia Española de Cooperación Internacional, al CINDEC hoy DIB de la Universidad Nacional de Colombia que han financiado en parte los distintos proyectos de Investigación que hacen parte de este trabajo, el cual fue presentado como conferencia magistral para mi posesión como Miembro Correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Bibliografía

- Adams, M. J.** 1985. Speciation in the Pronophilina butterflies (Satyridae) of northern Andes. Second Symposium on Neotropical Lepidoptera (Arequipa, Perú). *J. Res. Lepid., Supplement 1*: 33-49.
- Adams, M. J.** 1986. Pronophilina butterflies (Satyridae) of three Andean cordilleras of Colombia. *Zoological Journal of Linnean Society* 87: 235-320.
- Andersen, A. N.** 1990. The Use of ant communities to evaluate, change in australian terrestrial ecosystems: a review and recipe. *Proc. Ecol. Soc. Aust.* 16: 347-357.

- Andrade-C. M. G.**, 1994. Estudio de conservación y Biodiversidad de las mariposas en dos zonas de bosque primario y secundario en Colombia. *Revista SHILAP. Madrid España.* 22 (86): 147 - 181.
- Andrade-C. M. G.** 1995 Monografías de Fauna de Colombia 1. Nymphalidae: Acraeinae: Actinote. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Editora Guadalupe. 120 pp.
- Andrade-C. M.G., & G. Amat.** 1996. Un estudio regional de las mariposas altoandinas en la Cordillera Oriental de Colombia. 149 - 180. En Andrade-C. M.G., G. Amat, F. Fernández (Eds.) *Insectos de Colombia, estudios escogidos.* Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Colección Jorge Alvarez Lleras 10. Coeditado con el Centro Editorial Javeriano . 541pp
- Bierregaard, R. O. Jr. & T.E. Lovejoy.** 1989. Effects of fragmentation forest on amazonian understory bird communities. *Acta Amazonica* 19: 215-241-
- Brown, K.S. Jr.** 1982 Palaeoecology and regional patterns of evolution in neotropical forest butterflies. 336-357 In. Prance G.T. (Ed.) *Biological diversification in the tropics.* Columbia University Press. New York. 457 pp.
- Brown, K.S. Jr.** 1987. Biogeography and evolution of the neotropical butterflies. 66-104. In. Whitmore T. C. & G. T. Prance (Eds.) *Biogeography and quaternary History in Tropical America.* Clarendon Press. Oxford.
- Brown, K. S. Jr.** 1991. Conservation of neotropical environments: Insects as Indicator. 349-404 p. In: Collins, N.M., J.A. Thomas. (Eds.) *The Conservation of Insects and their habitats.* Academic Press. N. Y.
- Brown, J. H. & M. V. Lomolino.** 1989. Independent discovery of the equilibrium theory of Island Biogeography. *Ecology* 70 (6): 1954-1957.
- Callaghan, C. J.** 1986. Notes on the zoogeographic distribution of subfamily Riodininae in Colombia. *J. Res. Lep. Suppl.*, 1:51-69.
- Coddington, J. A., Ch. E. Griswold, D. Silva, E. Peñaranda & S. Scott.** 1991. Designing and testing samplings protocols to estimate biodiversity in tropical ecosystems. 44-60. In Duddley, E. C. (Ed.) *The unity of evolutionary Biology: Proceedings of the fourth International Congress of Systematic and Evolutionary Biology.* Dioscorides Press. Portland or., 2 vols. 1048 pp.
- Colwell, R. K.** 1994. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. In Hawksworth, D. L. (Ed.): *The quantification and estimation of organismal biodiversity.* Special volume, *Phil. Trans. R. Soc. London.*
- Colwell, R. K. & J. A. Coddington.** 1996. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. 101-118. In Hawksworth, D. L. (Ed.): *The quantification and estimation of organismal biodiversity.* Special volume, *Phil. Trans. R. Soc. London* 140 pp.
- De Vries, Ph. J.** 1987. *The butterflies of Costa Rica and their natural history.* Papilionidae, Pieridae, Nymphalidae. Princeton University Press. Princeton. 327 pp.
- De Vries, Ph. J.** 1996. *The butterflies of Costa Rica and their natural history.* Riodinidae. Princeton University Press. Princeton 227 pp.
- Dufrene, M. & P. Legendre.** 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological monographs* 67(3): 345-366.

- Ehrlich, P.** 1992. Population biology of checkerspot butterflies and the preservation of global diversity. *Oikos* 63: 6-12.
- Gilber, L. E.** 1984. Biology of Butterfly communities. 41-54 pp. In R.I. Vane-Wright & P.R. Ackery (Eds.) *The biology of butterflies*. Academic Press, London. 327 pp.
- Gilpin, M.E. & M.E. Soule.** 1991. Minimum viable populations: Processes of species extinction. Chapter 2. 19-34. In: Gilpin, M.E. & I. Hanski (Eds.) *Metapopulations dynamics: Empirical and theoretical investigations*. Academic Press, San Diego. 336 pp.
- Harris, L. D.** 1984. The fragmented forest. *Island Biogeography theory and the preservation of biotic diversity*. The University Chicago Press. Chicago 211 pp.
- Harris, L.D. & C. Maser** 1984. Anymal community characteristics. 44-70. In: Harris, L.D. (Ed.): *The Fragmented forest. Island Biogeography theory and preservation of biotic diversity*. The University Chicago Press. Chicago. 211 pp.
- Harris, L.D. & G. Silva-López.** 1982. Forest fragmentation and conservation of biological diversity. Chapter 8, 197-238. In: Fiedler, P.L. & K. Jain (Eds.) *Conservation Biology. The theory and practice of nature conservation preservation and management*. Chapman & Hall. New York. 507 pp.
- Holloway, J. D.** 1985. Months as indicator organism for categorising rain forest and monitoring change and regeneration process 235-242 pp. In: A. Chadwick, A. & Sutton, S. (Eds.) *Tropical rain forest*. Leeds Philosophical and literary.
- Holloway, J. D. & N. E. Stork.** 1991. The dimensions of biodiversity: The use of invertebrates as indicators of human impact. 3-62. In: Hawksworth, D. L. (Ed.) *The biodiversity of Microorganisms and invertebrates: Its role in sustainable Agriculture*. D. S. International. Washington.
- Holloway, J. D. & P. D. N. Herbert.** 1979. Ecological and taxonomic trends in macrolepidopteran host plant selection. *Biol. J. Linnean Soc.* 12:229-251.
- Kremen, C., R. K. Cowell, T. L. Erwin, D. D. Murphy, R. F. Noss, & M. A. Sanjayan.** 1993. Terrestrial arthropod assemblages: Their use in conservation planning. *Conservation Biology* 7 (4): 796-808.
- Kremen, C.** 1994. Biological Inventory using target taxa. A case study of butterflies of Madagascar. *Ecological applications* 4 (3): 407-422.
- Lacy, R. C.** 1992. The effects of inbreeding on isolated populations: are minimum viable population sizes predictable? Chapter 11, 227-296. In: P. L. Fiedler & S. K. Jain (Ed.) *Conservation Biology. The theory and practice of nature conservation preservation and management*. Chapman & Hall. New York. 507 pp.
- Lomolino, M. V., J. H. Brown & R. Davis.** 1989. Island Biogeography of montane forest mammals in the american southwest. *Ecology* 70 (1): 180-194.
- Lovejoy, T. E., J. M. Rankin, R. O. Brerregaard, K. S. Brown Jr. L. H. Emmons & L.H. Van Der Voort.** 1984. Ecosystem decay of Amazon forest remnants. 295-325. In: Nitecki, M.H. (Ed.) *Extinctions*. University Chicago Press. 475pp.
- Lovejoy, T. E., R. O. Brerregaard, A. B. Rylands, J. R. Malcom, C. E. Quintela, L. H. Harper, K. S. Brown Jr., A. H. Powell, G. V. Powell, R. O. Schubart & M. B. Hays.** 1986. Edge and other effects of isolation on Amazon forest fragments. 52-285 pp. In: Sodre, M. E. (Ed.) *Conservation Biology. The Science of scarcity and diversity*. Sinauer Sunderland. Massachusetts.
- Lowman, M. D., R. L. Kitching & G. Carruthers.** 1996. Arthrop sampling in Australian subtropical rain forest-How accurate are some of the more common techniques? *Selbyana* 17: 36-42.
- Luis-Martínez, A. & J. Llorente-Bousquets.** 1990. Mariposas en el Valle de México: Introducción e Historia 1. Distribución local y estacional de los Papilionoidea de la cañada de los Dinamos. *Magdalena Contreras, D.F. México. Foli Entomológica mexicana* 78: 95-198.
- Majer, J. D. & G. Beeston.** 1996. The biodiversity integrity index: an illustration using ants in Western Australia. *Conservation Biology* 10 (1): 65-73.
- Ozane, C. M. P.** 1996. The arthropod communities of coniferous forest trees. *Selbyana* 17: 43-49.
- Pearson, D.** 1994^a. Selection indicator taxa for the quantitative assessment of biodiversity. *Phil. Trans. R. Soc. London* 345: 75-79.
- Pearson, D.** 1994^b. Selection indicator taxa for the quantitative assessment of biodiversity. 75-80. In: Hawksworth, D.L. (Ed.): *The quantification and estimation of organismal biodiversity*. Special volume, *Phil. Trans R. Soc. London* 140 pp.
- Salazar, J. A.** 1989. *Estudio preliminar sobre el registro de especies y subespecies del género Prepona Boisduval, 1836 (Lepidoptera: Nymphalidae) en Colombia (Parte I)*. *SHILAP Rev. Lepid.* 17 (68): 381-387.
- Salazar, J. A.** 1990^a. *Estudio preliminar sobre el registro de especies y subespecies del género Prepona Boisduval, 1836 (Lepidoptera: Nymphalidae) en Colombia (Parte II)*. *SHILAP Rev. Lepid.* 18 (71) 267-272.
- Salazar, J. A.** 1990^b. *Breves notas sobre dos oblacones de Papilio cacicus Lucas, 1852 en Colombia (Lepidoptera: Papilionidae)* *Shilap Rev. Lepid.* 18 (71): 217-221.
- Salazar, J. A.** 1991. Algunos papilionidos miméticos de Colombia (Lepidoptera: Papilionidae). *SHILAP Rev. Lepid.* 19 (74): 93-110.
- Salazar, J. A.** 1991^a. *Consideraciones sobre el género Agrias Doubleday, 1844, en Colombia (Lepidoptera: Nymphalidae, Charaxinae)*. *SHILAP Rev. Lepid.* 19 (73): 69-74.
- Salazar, J. A.** 1991^b. *I. Contribución al conocimiento de los Morphinae colombianos. Localización de una población de Morpho hecuba wernerii Hopp, 1921 en Colombia. (Lepidoptera: Nymphalidae: Morphinae)*. *SHILAP Rev. Lepid.* 19 (75): 205-09.
- Salazar, J. A.** 1995. Lista preliminar de las mariposas diurnas (Lepidoptera: Rophalocera) que habitan en el Departamento del Putumayo. Notas sobre la distribución en la zona Andina. *Colombia Amazónica* 8 (1): 11-69.
- Sánchez-Rodríguez, J. F. & A. Baz.** 1995. The effects of elevation on the butterfly communities of a Mediterranean Mountain, Sierra de Javalambre, Central Spain. *J. Lep. Soc.* 49 (3): 192-207.
- Shafer, C. L.** 1990. *Nature Reserves. Island theory and conservation practice*. Smithsonian Institution Press, Washington 189 pp.
- Stiling, P. D.** 1996. *Ecology, theories and applications*. Second edition. Prentice-Hall. 539 pp.

Turner, J. R. G. & J. L. B. Mallet. 1996. Did forest islands drive the diversity of warningly coloured butterflies? Biotic drift and the shifting balance. *Phil. Trans. R. Soc. London.* 351: 835-845.

Vélez, J. & J. Salazar. 1991. *Mariposas de Colombia.* Villegas Editores, Bogotá 167 p.

Villard, M. A., G. Merriam & B. A. Maurer. 1995. Dynamics in subdivided populations of neotropical migratory birds in a fragmented temperate forest. *Ecology* 76 (1): 27-40.

Wilcox, B. A. & D. D. Murphy. 1985. Conservation strategy: The effects of fragmentation on extinction. *Am. Nat.* 125: 879-887.

UNA NUEVA ESPECIE DE *COLOSTETHUS* DEL GRUPO *EDWARDSI* DE COLOMBIA

por

Taran Grant*

Resumen

Grant, T.: Una nueva especie de *Colostethus* del grupo *edwardsi* de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **22**(84): 423-428 . 1998. ISSN 0370-3908.

Se describe la especie hermana de *Colostethus edwardsi* y *C. ruizi* como una nueva especie de *Colostethus*. La monofilia del clado que contiene los tres taxones está dada por la presencia de una conspicua proyección cloacal que se extiende hasta el nivel medio de los muslos, y *C. edwardsi* + *C. ruizi* están unidas por la ausencia sinapomórfica de una quilla o tubérculo tarsal (presente en todos los demás dendrobátidos). Los datos de colección indican que el material típico de la nueva especie proviene de la zona urbana del municipio de Apartadó, Antioquia, pero la veracidad de esta información es cuestionable, puesto que el escenario biogeográfico de la ocurrencia en la tierra baja del Chocó de la especie hermana de dos especies del subpáramo de la Cordillera Oriental es muy improbable.

Palabras claves: Taxonomía, Filogenia, Anura, Dendrobatidae.

Abstract

The sister of *Colostethus edwardsi* and *C. ruizi* is described as a new species of *Colostethus*. The monophyly of the clade containing these three species is supported by the occurrence of the anal sheath, and *C. edwardsi* + *C. ruizi* are united by the synapomorphic absence of a tarsal keel or tubercle (present in all other dendrobatids); The type specimen of the new species is reported to have been collected within the urban area of Apartadó, Antioquia, but the veracity of this information is questionable, given that the biogeographic scenario of a Chocoan lowlands species being the sister of two species from the subpáramo of the Cordillera Oriental is extremely unlikely.

Key words: Taxonomy, Phylogeny, Anura, Dendrobatidae.

* Laboratorio de Herpetología, Departamento de Biología, Universidad del Valle, A. A. 25360, Cali, Valle del Cauca.

Dirección actual: Department of Herpetology, American Museum of Natural History, Central Park West at 79th Street, New York, N.Y. 10024, USA.

Introducción

Se sabe muy poco de la sistemática del género dendrobátido *Colostethus sensu lato*. Existen numerosos problemas taxonómicos básicos por resolver debido a los límites específicos difusos y la abundancia de especies colombianas no descritas. En cuanto a la filogenética, de las más de 100 especies descritas y en prensa, existe evidencia convincente de monofilia para apenas tres grupos que incluyen solo 13 especies (Grant et al., 1997; Grant & Myers, en prensa; pero ver Kaplan, 1997). Dadas estas limitaciones, parecería poco probable encontrar una especie no descrita asignable a algún grupo monofilético ya conocido, por lo cual resultó ser una grata sorpresa hallar un ejemplar de una nueva especie cuyas relaciones se conocen.

En este artículo describo esta nueva especie de *Colostethus* y propongo la hipótesis de que pertenece al grupo *edwardsi* (Lynch, 1982), y que es la especie hermana de *C. edwardsi* + *C. ruizi*.

Colostethus lynchi sp. nov. (Figs. 1, 2)

Holotipo. Museo de Historia Natural del Colegio San José (CSJ) 0632, una hembra adulta colectada por Marco Antonio Serna el 22 de diciembre de 1983.

Localidad típica. COLOMBIA, Departamento Antioquia, Municipio Apartadó, 7°53'N, 76°38'W, 30 m. s. n. m. (localidad es dudosa; ver Discusión).

Diagnosis. Un dendrobátido de tamaño moderado (hembras de ca. 28 mm longitud rostro-cloacal; machos desconocidos) distinguido de todos los demás miembros de la familia por presentar numerosos tubérculos y verrugas en toda la superficie dorsal (muchas especies de *Colostethus* exhiben tubérculos restringidos a la parte posterior del dorso, i.e., en la región coccígea, mas no en la parte más anterior del dorso), y todos exceptuando *C. edwardsi* y *C. ruizi* por la presencia de la proyección cloacal (= «anal sheath» de Lynch, 1982; traducido como «embudo o bolsa cloacal» por Rivero, 1990: 14, pero esta traducción no logra describir adecuadamente la estructura, ya que la estructura no tiene la forma de un embudo y no es una bolsa).

Colostethus lynchi difiere de *C. edwardsi* y *C. ruizi* en presentar una quilla o tubérculo tarsal bien formado, rebordes laterales fuertes extendidos hasta la base de cada disco digital, pliegues metacarpales y metatarsales externos bien formados, el pliegue supratimpánico agrandado posteriormente para formar una protuberancia preaxilar, y la forma del rostro. Adicionalmente, *C. lynchi* difiere de

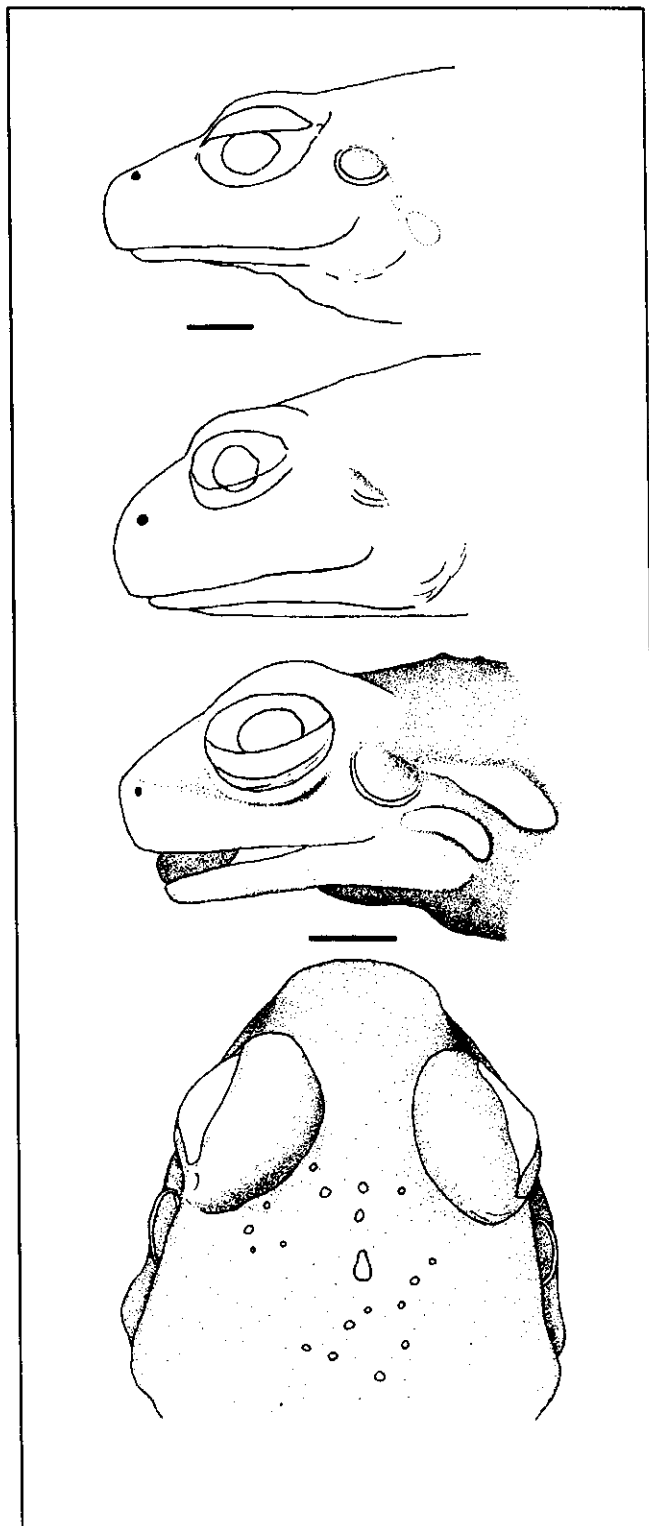


Figura 1. Cabezas de las especies del grupo *edwardsi*. Vistas laterales de (A) *Colostethus ruizi*, (B) *C. edwardsi* y (C) *C. lynchi* y (D) vista dorsal de *C. lynchi*. (A–B modificados de Lynch, 1982.) Línea = 2 mm.

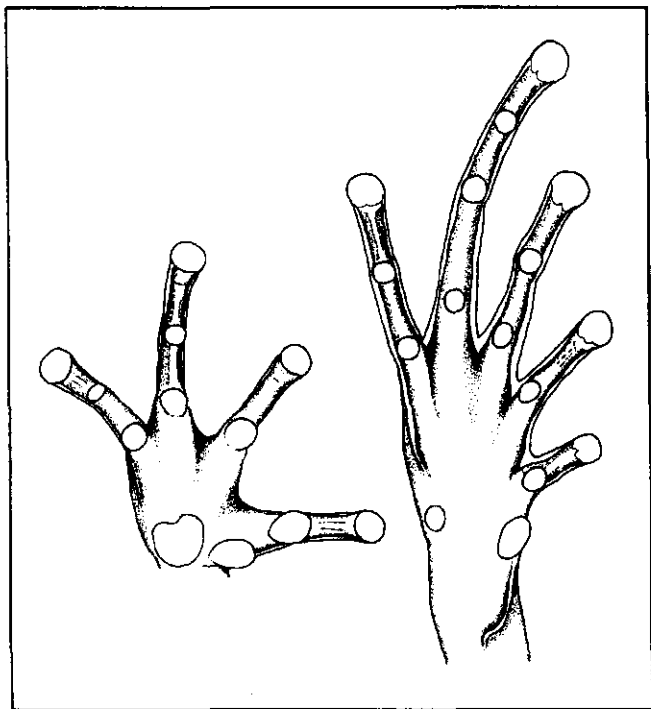


Figura 2. Mano y pie de *Colostethus lynchi*. Línea = 5 mm.

C. edwardsi por presentar el tímpano más prominente, y de *C. ruizi* por presentarlo más grande (diámetro del tímpano = ca. la mitad de la longitud del ojo en *C. lynchi* y un tercio de la longitud del ojo en *C. ruizi*).

Dimensiones del holótipo (en mm). Longitud rostro-cloacal (LRC) 27.9; antebrazo (entre el codo flexionado y el borde proximal del tubérculo palmar) 5.5; mano (entre el borde proximal del tubérculo palmar y la punta del dedo III) 7.0; tibia (entre la rodilla flexionada y el talón) 11.4; pie (entre el borde proximal del tubérculo metatarsal externo y el extremo del dedo IV) 11.6; anchura de la cabeza (entre los ángulos de las mandíbulas) 10.6; longitud diagonal de la cabeza (entre la punta del rostro y el ángulo de las mandíbulas) 8.3; longitud del ojo 3.5; distancia entre el ojo y el centro de la narina 2.4; distancia entre los centros de las narina 3.5; longitud del rostro (entre la esquina anterior del ojo y la punta del rostro) 4.0; distancia interorbital 2.4; diámetro del tímpano 1.9.

Descripción. El holótipo es una hembra adulta con oviductos fuertemente plegados («convoluted») y robustos, y huevos ováricos diferenciados. Los huevos carecen de pigmento (melanina), y los más grandes son

de un diámetro de 1.8 mm. La proyección cloacal es conspicua, extendida hasta el nivel medio de los muslos. El proceso lingual medial está ausente. La disección del paladar revela que los palatinos (neopalatinos) están ausentes, y que cada *planum antorbitale* es cartilaginoso en el medio lateral y altamente osificado (o posiblemente calcificado) medialmente.

Las superficies dorsales presentan tubérculos y pequeñas verrugas bajos y redondeados, más pronunciados en la parte posterior de la espalda (i.e., la región coccígea) y las tibias, pero presentes en los muslos, toda la espalda y la cabeza (los miembros anteriores son lisos). Los párpados carecen de tubérculos. Un tubérculo posrictal fuerte y alargado ocurre en cada lado de la cabeza, al igual que una protuberancia preaxilar apenas superior al tubérculo posrictal y continuo con el pliegue timpánico (ver abajo). Las superficies ventrales son lisas, exceptuando la parte posterior del abdomen, la cual presenta una textura rugosa. Los tubérculos cloacales están ausentes, pero proximalmente las superficies posteriores y posteroventrales de los muslos presentan numerosas protuberancias diminutas diferenciadas del resto de la superficie por su color más claro.

La anchura de la cabeza es 1.28 veces su longitud el 38% de la LRC y de la cabeza. El rostro sobrepasa ligeramente el borde anterior de las mandíbulas. En aspecto lateral (Fig. 1), el rostro es un poco redondo dorsalmente (i.e., no plano e inclinado), casi truncado, levemente convexo entre el labio superior y la punta del rostro. Las narinas se dirigen posterodorsalmente. El tímpano es grande (54% del ojo); el anillo timpánico está ocultado posterodorsalmente por el *m. depressor mandibulae*. El pliegue timpánico es débil encima del tímpano, pero se incrementa el grosor de la piel posteroventralmente para terminar en una protuberancia preaxilar fuerte y alargada dorsal al tubérculo posrictal.

En aspecto dorsal (Fig. 1), el extremo rostral es casi truncado, apenas redondeado. Las narinas no son visibles dorsalmente. El *canthus rostralis* está poco definido y es suavemente redondeado. La región loreal es levemente cóncava, un poco inclinada hacia el labio.

La longitud manual (Fig. 2) representa el 25% de la LRC y es 1.27 veces más larga que el antebrazo. Las longitudes relativas de los dedos son $3 > 4 > 2 > 1$. Los tubérculos manuales son protuberantes y bien definidos. El tubérculo palmar es grande y protuberante. El tubérculo tenar es prominente y alargado y está ubicado en el borde externo de la base del primer dedo. Hay un redondo tubérculo subarticular en los dedos 1 y 2 y dos

en 3 y 4; los tubérculos distales menos protuberantes. Ambos lados de cada dedo presentan un reborde cutáneo lateral que se extiende desde la base del dedo hasta el disco digital, pero son más fuertes distalmente. El reborde externo del cuarto dedo es continuo con un leve pliegue metacarpal externo, el cual casi alcanza el borde distal del tubérculo palmar. Las manos carecen de tubérculos supernumerarios y palmeadura. Los discos digitales están poco expandidos; en aspecto dorsal presentan escudos digitales bien definidos.

La tibia y el pie (Fig. 2) representan el 41% y el 42% de la LRC, respectivamente. Las longitudes relativas de los dedos de pie son $4 > 3 > 5 > 2 > 1$. Los dedos presentan rebordes cutáneos fuertes en ambos lados. El reborde externo del primer dedo continúa proximalmente hasta el borde lateral del tubérculo metatarsal interno. De manera similar, el reborde del quinto dedo continúa proximalmente como el pliegue metatarsal externo prominente, cubriendo dos tercios de la distancia entre la base del dedo y el tubérculo metatarsal externo. El tubérculo metatarsal externo es redondo y protuberante, de aproximadamente el mismo tamaño que los tubérculos subarticulares. El tubérculo metatarsal interno es elíptico, fuerte, y aproximadamente dos veces el tamaño del tubérculo externo. Una protuberancia difusa ocurre entre los tubérculos metatarsales, pero no forma un tubérculo *per se*. La quilla tarsal de cada pie es prominente, curvada internamente, extendida desde el borde proximal del tubérculo metatarsal interno sobre el medio distal del tarso; su mayor protuberancia se encuentra en el extremo proximal. Ocurre un tubérculo subarticular protuberante y redondo en los dedos 1 y 2, dos en 3 y 5, y tres en el dedo 4. La membrana interdigital podial se limita a las bases, aunque los rebordes laterales continúan hasta los discos. La fórmula de la membrana pedial (Savage & Heyer, 1967; modificado por Myers & Duellman, 1982) es $I\ 2-2^+ II\ 2-3^+ III\ 3^+ - 4\ \frac{1}{4} IV\ 4\ \frac{1}{4} - 3\ V$ (la membrana entre los dedos 4 y 5 es muy reducido, poco más que un reborde cutáneo).

Musculatura mandibular y del muslo. Al igual que en las otras dos especies del grupo *edwardsi*, ambos grupos de músculos presentan el estado normal de la familia Dendrobatidae. El anillo timpánico está inclinado posterodorsalmente debajo del pliegue superficial masivo del *m. depressor mandibulae*. La rama mandibular del nervio trigeminal (V_3) pasa lateral (superficial) al *m. adductor mandibulae posterior subexternus* y el *m. a. m. externus superficialis* está ausente.

En el muslo, el tendón distal del *m. semitendinosus* está atado a la superficie profunda del complejo *gracilis*

por el tendón secundario de enlace y se inserta dorsal (profundo) al tendón de los *mm. gracilis*.

Patrón de coloración. La coloración del holótipo en etanol al 70% consiste principalmente en diferentes tonos de café. El dorso es café con puntos y pequeñas manchas irregulares poco conspicuas de color café oscuro o café-negruzco, especialmente asociados con las protuberancias más prominentes. Un leve patrón reticulado de color café pálido puede detectarse en la región interorbital y el rostro. Los párpados son del mismo color café que el resto del dorso.

La región loreal es café, demarcada ventralmente por una línea de color café pálido entre el borde ventral del ojo y la nariz. Debajo del ojo ocurren varios puntos café pálido sobre un fondo café más oscuro; estos puntos pálidos no se extienden anteriormente en el rostro. Los tubérculos posricetales y preaxilares son del mismo color (café) que la piel adyacente (i.e., no son blancos). Los labios carecen de marcas oscuras.

No ocurren franjas dorsolaterales ni ventrolaterales. Cada franja oblicua lateral es completa, extendida entre el ojo y la ingle. Esta franja está representada por una línea fina y un poco ondulada, de color café pálido a crema, más fuerte posteriormente que anteriormente; en algunas porciones, la línea está conformada por una serie de puntos pequeños casi conectados. Ventral a la franja, los flancos son de color café con pequeños puntos y flecos blancuzcos. Este patrón de puntos pálidos se fortalece ventralmente y se extiende sobre la parte lateral del abdomen, formando una serie de puntos irregulares de color blancuzco o crema; en la región medial del abdomen, se forma un patrón reticulado de color café oscuro. La región gular es café con moteado pálido.

No ocurren marcas coloración desconcertante ni en las ingles ni en los miembros posteriores, pero las axilas son conspicuamente más pálidas (de color blancuzco) que la piel adyacente, lo cual sugiere que en vida existían manchas brillantes prominentes de xantóforos o iridóforos.

Los miembros posteriores carecen de bandas transversas o franjas longitudinales. La superficie anterior del muslo es de color café, algo más pálido que la superficie dorsal. La superficie posteroventral de la parte proximal de cada muslo presenta numerosas protuberancias diminutas demarcadas por su color crema. Las superficies ventrales de los muslos son de color café-grisáceo pálido. Los pies, inclusive los escudos digitales, son cafés, al igual que las superficies plantares.

Dorsalmente, los miembros anteriores son café, sin bandas transversas ni franjas longitudinales. Ventralmente son más pálidos, de color café-gricáceo. La superficie palmar es café con los tubérculos y el pliegue metacarpal algo más pálidos que el resto.

Etimología. El epíteto específico hace referencia a John D. Lynch, quien descubrió este grupo natural y describió las otras dos especies del clado, y cuyos esfuerzos en Colombia a lo largo de los últimos 20 años han logrado aumentar considerablemente nuestro conocimiento de la fauna anfibia más diversa del planeta.

Discusión

Péfaur (1985: 323) menciona la ocurrencia de un conspicuo «transversal sacral flap above the anus» en su descripción de *Colostethus durantei*, lo cual podría interpretarse como la descripción de una proyección cloacal. Desafortunadamente el autor no incluyó ninguna ilustración de la estructura, y no he examinado su material, pero la descripción está más de acuerdo con el pliegue que se forma en la región de la punta del cóccix en muchos dendrobátidos (e.g., *C. abditaurantius*) que con la proyección cloacal; de hecho, en el número 20 de su diagnóstico, **Péfaur** (p. 322) lo describe como «skin of sacral end forming a transversal fold.»

Así que en la familia Dendrobatidae, únicamente *Colostethus edwardsi*, *C. lynchi* y *C. ruizi* presentan la proyección cloacal, lo cual representa evidencia fuerte a favor de la hipótesis de que forman un grupo natural. Es posible que la ausencia de la cámara vocal y las hendiduras vocales sea otra sinapomorfia para el grupo *edwardsi*, pero es imposible precisarlo en el momento porque el único ejemplar disponible de *C. lynchi* es una hembra.

La topología del clado se resuelve totalmente con la inclusión de la sinapomorfia putativa de la ausencia de la quilla tarsal para unir a *Colostethus edwardsi* + *C. ruizi* (Fig. 3). La interpretación de la ausencia de estructuras siempre es problemática, i.e., podría representar una ausencia plesiomórfica o una pérdida apomórfica. Debido a que el resto de la familia exhibe una quilla o un tubérculo tarsal, para que se interpretara como una ausencia plesiomórfica, *C. edwardsi* + *C. ruizi* tendrían que ser el grupo hermano de los demás dendrobátidos. Sin embargo, la evidencia (e.g., la ausencia de los palatinos, la ocurrencia de la proyección cloacal en *C. lynchi*) no apoya esta hipótesis, y la interpretación más parsimoniosa es que la ausencia se debe a una pérdida apomórfica.

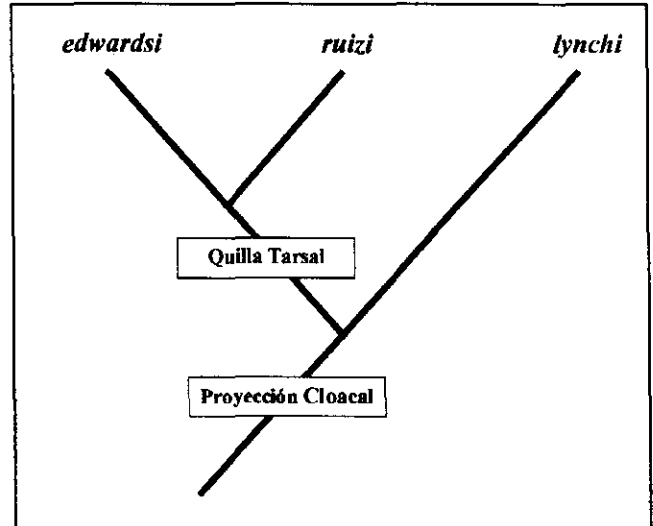


Figura 3. Hipótesis de relaciones dentro del grupo *edwardsi*. Ver el texto para una discusión de los estados de carácter.

Las preferencias cavernícolas de *C. edwardsi* y *C. ruizi* (**Lynch**, 1982) pueden apoyar esta topología también, pero prefiero no involucrar la selección de hábitat en la hipótesis cladística hasta obtener más material, puesto que las implicaciones biogeográficas ponen en duda la veracidad de la información de localidad de origen del holótipo de *C. lynchi*.

El escenario biogeográfico de la ocurrencia en la tierra baja del Chocó biogeográfico de la especie hermana de dos especies del subpáramo de la Cordillera Oriental es extremadamente improbable y representaría una relación biogeográfica única entre los anuros colombianos (**Lynch et al.**, 1997). Las notas de campo del Hno. Serna no están disponibles, pero en el catálogo del CSJ el número 0632 figura como parte de una serie de anuros que sí proviene de la tierra baja del Chocó (e.g., *Physalaemus pustulosus*; L. A. Zamudio, comunicación personal). Pero la etiqueta original no estaba con el ejemplar cuando lo examiné por primera vez, y es posible que haya ocurrido alguna confusión con los números. Sin embargo, hay muchas regiones poco exploradas en Colombia, y hay mucho por aprender sobre la sistemática y la biogeografía de *Colostethus*.

Agradecimientos

El Hno. Luis A. Zamudio permitió la revisión y préstamo del material del Colegio San José y facilitó información adicional sobre el mismo. Charles W. Myers

aportó sus conceptos sobre varios aspectos de este trabajo. En el Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, María Cristina Ardila, John D. Lynch y Pedro M. Ruiz autorizaron el acceso a los equipos del Laboratorio de Anfibios y la revisión del material perteneciente a la Colección Batracológica del Museo de Historia Natural, y Claudia Vélez comentó sobre el manuscrito. Gran parte de este trabajo se realizó en el Laboratorio de Herpetología de Fernando Castro en el Departamento de Biología, Universidad del Valle.

Bibliografía

- Grant, T., E. C. Humphrey, & C. W. Myers. 1997. The median lingual process in frogs: a bizarre character of Old World ranoids discovered in South American dendrobatids. *Am. Mus. Novitates* 3212: 1-40.
- Grant, T. & C. W. Myers. Review of the *Colostethus nubicola* group (Anura: Dendrobatidae), with descriptions of five new species from the Chocoan lowlands of Colombia. *Am. Mus. Novitates* (en prensa).
- Kaplan, M. 1997. A new species of *Colostethus* from the Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) with comments on intergeneric relationships within the Dendrobatidae. *J. Herpetol.* 31(3): 369-375.
- Lynch, J. D. 1982. Two new species of poison-dart frogs (*Colostethus*) from Colombia. *Herpetologica* 38(3): 366-374.
- Lynch, J. D., P. M. Ruiz-Carranza, & M. C. Ardila-Robayo. 1997. Biogeographic patterns of Colombian frogs and toads. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 21(80): 237-248.
- Myers, C. W. & W. E. Duellman. 1982. A new species of *Hyla* from Cerro Colorado, and other tree frog records and geographical notes from western Panama. *Am. Mus. Novitates* 2752: 1-32.
- Péfaur, J. E. 1985. New species of *Colostethus* (Dendrobatidae). *J. Herpetol.* 19(3): 321-327.
- Rivero, J. A. 1990 «1988». Sobre las relaciones de las especies del género *Colostethus* (Amphibia, Dendrobatidae). *Mem. Soc. Cienc. Nat. La Salle* 48 (129): 3-32.
- Savage, J. M. & W. R. Heyer. 1967. Variation and distribution of the tree-frog genus *Phyllomedusa* in Costa Rica, Central America. *Beitr. Neotrop. Fauna* 5: 111-131.

A NEW FROG (GENUS *ELEUTHERODACTYLUS*) FROM CLOUD FORESTS OF SOUTHERN BOYACA

por

John D. Lynch¹

Resumen

Lynch, J. D.: A new frog (genus *Eleutherodactylus*) from cloud forests of southern Boyaca. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **22** (84): 429-432, 1998. ISSN 0370-3908.

Se describe una especie nueva del género *Eleutherodactylus* con base en material de una localidad en el sur del Departamento de Boyacá. La especie nueva es la especie hermana de *E. nervicus*, conocida de los páramos asociados con Laguna Chingaza en el Departamento de Cundinamarca. La especie nueva es más grande que *E. nervicus* y tiene discos más grandes.

Palabras claves: Anura, cambio ecológico, especiación alopátrica, Leptodactylidae

Abstract

A new species of *Eleutherodactylus* is described from a single locality in southern Boyacá. It is the sister species of *E. nervicus*, known from the páramos associated with Laguna Chingaza in Departamento Cundinamarca. The new species is larger than *E. nervicus* and has larger digital disks.

Key words: Anura, allopatric speciation, ecological shift, Leptodactylidae

Introduction

In 1981, long before I would come to appreciate Boyacá and its cultural contributions to Colombia, my colleagues Ma. Cristina Ardila and Pedro M. Ruiz set out on an expedition to collect frogs from several of the páramos in northern Depto. Cundinamarca and

southern Boyacá. They were trying to define the southern limits of distribution of frogs of the genus *Phrynopus* in the Cordillera Oriental and the collections of *Eleutherodactylus* made during that field trip remained unexamined until 1998. Most of the *Eleutherodactylus* that they collected pertained to the group including *E. bogotensis* and *E. lynchi* but one collection made on a cloud enshrouded cuchilla SE of Ramiriquí, Boyacá contained a small series of a strikingly different species.

¹ Laboratorio de Anfibios, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia

Lynch (1994) described *E. nervicus* from Alto del Tigre on the border between Deptos. Cundamarca and Meta. During the past few years, additional material has accumulated providing evidence that the species is not restricted to the Alto del Tigre as thought originally but is distributed across the complex of paramos collectively called Chingaza (Fig. 1). The frog from Ramiriquí appears to be the sister species of *E. nervicus*. These two species share a pointed snout, the tip of which develops a pale protuberance in adults. The protuberance appears to be formed partly by glandular development of the skin and partly by a core of connective tissue beneath the skin. This feature is here proposed as a synapomorphy of the pair of taxa.

Materials and methods

Terminology follows Lynch & Duellman, 1997. The following abbreviations are used in the text: E-N (distance from eye to nostril), HW (greatest head width), IOD (interorbital diameter), SVL (snout-vent length). Means are reported as \pm one SE of the mean when sample sizes are adequate.

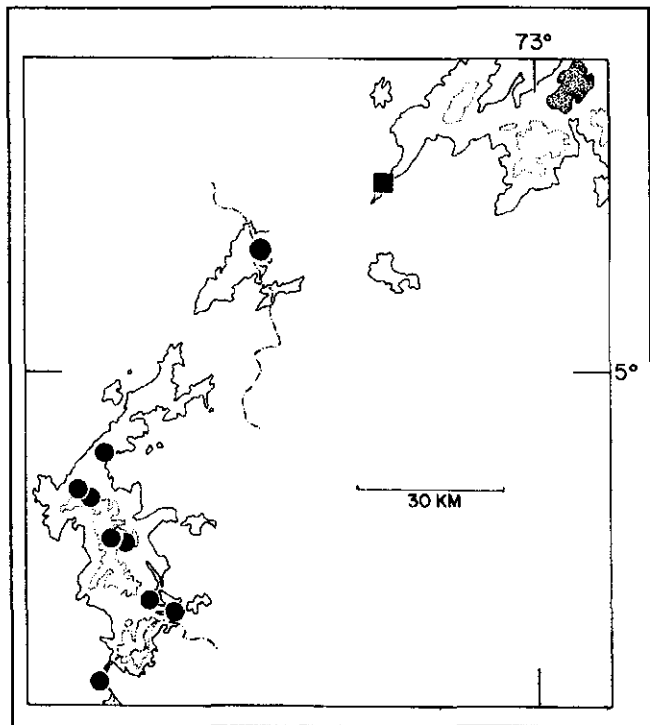


Figure 1. Distributions of *Eleutherodactylus mnionaetes* sp. nov. (square) and *E. nervicus* (circles) on the Cordillera Oriental. 3000 m (solid lines) and 3600 m (dotted lines) contour lines serve to define páramo islands in the region. Lago Tota is shown in stipple.

Eleutherodactylus mnionaetes sp. nov. (Fig. 2)

Holotype. ICN (amphibian collection of the Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia) 11004, an adult female, one of a series collected by M. C. Ardila and P. M. Ruiz on 29 November 1981 (original field number PR 6203).

Type-locality. COLOMBIA, Departamento de Boyacá, municipio de Ramiriquí, Km 11-12 carretera Ramiriquí – Zetaquirá, 3060-3080 m.

Paratopotypes. ICN 11005 (amplectant male), 11009-14 (other males), 11006-07 (adult females), taken with the holotype.

Referred specimen. ICN 11008, a juvenile female taken with the type-series.

Etymology. Greek (*mnios*, meaning moss, and *naetes*, meaning frequenting), in reference to the moss-encrusted microhabitat of the animal.

Diagnosis. (1) skin of dorsum bearing numerous low warts, that of venter areolate; dorsolateral folds extending about 1/2 length of body; (2) tympanum round, 30-44 % eye length; (3) snout acuminate in dorsal view,

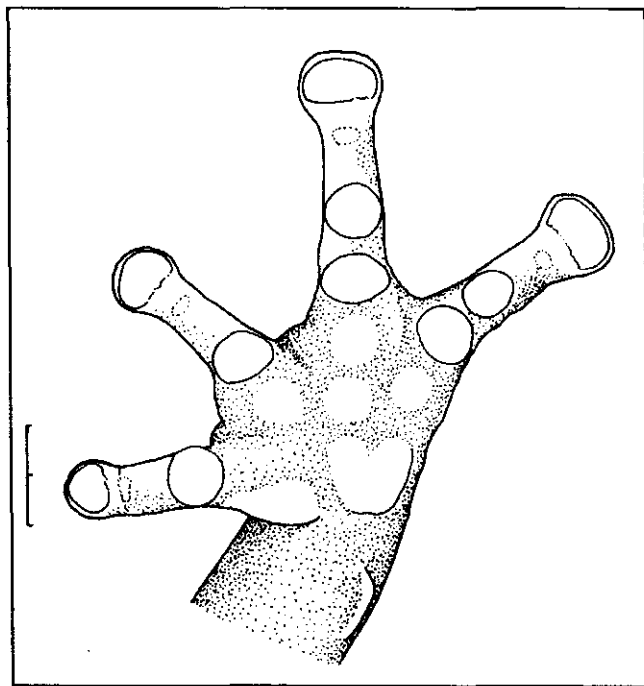


Figure 2. Palmar view of hand of *Eleutherodactylus mnionaetes* sp. nov. (ICN 11007). Scale equals 2 mm.

pointed in lateral profile; canthus rostralis sharp, concave; (4) upper eyelid narrower than IOD; no cranial crests; (5) vomerine odontophores low; (6) males with vocal slits, subgular vocal sac, white, nuptial pads; (7) first finger slightly shorter than second; digits bearing slightly expanded disks; (8) fingers bearing thick lateral keels; (9) series of ulnar tubercles present; (10) low round tubercles on heel, short inner tarsal fold; (11) two metatarsal tubercles, inner oval, 4 times size of round outer; supernumerary plantar tubercles present; (12) toes bearing thick lateral fringes, producing basal webbing between outer toes, slightly expanded disks; fifth toe much longer than third; (13) dorsum brown with black markings; venter cream with brown reticulum or spots or brown with darker brown mottling; (14) adults small, males 17.9-20.8 (\bar{x} = 19.4 \pm 0.4, N = 7) mm SVL, 3 females 30.1-33.5 (\bar{x} = 31.9) mm SVL.

Most similar to *E. nervicus* from which it differs in having a more pointed snout, ulnar tubercles, larger digital disks, basal webbing between toes III-IV, more coarse skin of the dorsum, and nuptial pads in males. *Eleutherodactylus nervicus* (males 15.8-19.7 mm SVL, \bar{x} = 17.1 \pm 0.3, N = 14; females 23.9-28.2 mm SVL, \bar{x} = 25.6 \pm 0.4, N = 14) is also slightly smaller than *E. mnionaetes*.

Description (proportions are based on seven males and four females). Head narrower than body, wider than long; HW 38.0-41.3 (\bar{x} = 39.8 \pm 0.5) % SVL in males, 39.5-41.7 (\bar{x} = 40.6) % in females; snout acuminate in dorsal view, nearly pointed in lateral profile; nostrils well back from tip of snout, weakly protuberant, directed laterally; E-N 66.7-78.3 (\bar{x} = 71.8 \pm 1.5) % eye length in males, 72.0-90.3 (\bar{x} = 82.4) % in females; canthus rostralis, sharp, gently curved; loreal region concave, sloping abruptly to lips; lips not flared; upper eyelids bearing low tubercles, narrower than interorbital space, their width 55.6-65.5 (\bar{x} = 60.8 \pm 1.4) % IOD in males, 55.6-62.1 (\bar{x} = 59.7) % in females; no cranial crests; supratympanic fold prominent, ending above insertion of upper arm; tympanum round, its length 30.4-37.5 (\bar{x} = 34.3 \pm 0.8) % eye length in males, 32.0-43.8 (\bar{x} = 41.7) % in females, separated from eye by distance equal its own diameter; two postrictal tubercles posteroventral to tympanum; choanae small, round, medial to palatal shelf of maxillary arch; odontophores median and posterior to choanae, each oval, bearing clump of 2-4 teeth, about 3-4 times size of a choana, separated medially by distance twice width of an odontophore; tongue longer than wide, its posterior 2/5 not adherent to floor of mouth, posterior border not notched; vocal slits posterolateral to tongue, short.

Series of low ulnar tubercles; palmar tubercle bifid, much larger than oval thenar; numerous low supernumerary palmar tubercles; subarticular tubercles round, nonconical; fingers bearing fleshy fringes (keels); all fingers with obvious round disks, those on outer digits larger than those on inner digits; disks about 1.5 times width of digit just proximal to disk; circumferential grooves complete, defining ventral pads (wider than long); first finger shorter than second; males with white nuptial pads.

Dorsum bearing many low warts, those on lower back coarsest; short dorsolateral fold, complete to level of sacrum, then continuing as series of larger warts (than those of back); a second fold on upper flank; no anal sheath or perianal tubercles (aside from warts on back); skin of flanks much more areolate than that of dorsum; venter areolate, discoidal folds well anterior to groin; skin of upper surfaces of limbs less warty than dorsum.

Small tubercles on heel with even less distinct tubercles along outer edge of tarsus; inner edge of tarsus bearing short thickened fold on distal 1/5; inner metatarsal tubercle twice as long as wide, about 4 times size of round outer metatarsal tubercle; numerous supernumerary plantar tubercles; subarticular tubercles round, nonconical; toes bearing fleshy lateral fringes, coalescing as basal webbing; toe V partially fused to toe IV; toe disks as large as those of outer fingers, about 1.5 times width of digit proximal to disk, with well defined circumferential grooves; tip of toe III reaches base of penultimate subarticular tubercle of toe IV, that of toe V reaches distal edge of distal subarticular tubercle of toe IV; heels almost touching when flexed hindlimbs held perpendicular to sagittal plane; shank 40.0-47.4 (\bar{x} = 43.1 \pm 1.0) % SVL in males, 38.5-45.4 (\bar{x} = 41.7) % in females.

Color in ethanol. Body brown with black markings (sacral chevron, interorbital bar, inguinal bar); snout dirty cream; limb bars perpendicular on shank, narrower than interspaces; no anal triangle; side of head darker than dorsum, with vague indications of canthal-supratympanic stripe; pale markings on lip approximately defining labial bars; brown band extending from eye across tympanum; posterior surfaces of thighs brown; venter dirty cream, spotted with brown, or brown with diffuse darker reticulum.

Color in life. Dorsum brown with black spots; flanks and venter often with yellow spots bordered with dark brown; flanks and concealed limbs brown to burnt pink; throat and chest yellow in males; venter yellowish with fine black spots; iris yellow with wavy black horizontal stripe and fine black or brown reticulum (P. M. Ruiz fieldnotes, 29 Nov. 1981).

Measurements of holotype in mm. SVL 32.2, shank 13.9, HW 13.2, head length 11.2, chord of head length 12.2, upper eyelid width 2.2, IOD 3.8, tympanum length 1.3, eye length 3.1, E-N 2.8.

Natural history. *Eleutherodactylus mnionaetes* was collected only once during a brief visit to a cloud forest on the road between Ramiriquí and Zetaquirá. Of the eleven individuals found, all seven males are adults as are three of the females. The fourth female (ICN 11008) is a juvenile 21.8 mm SVL. The holotype was found under a rock in axillary amplexus with ICN 11005. Because the collectors visited the site during the day, no calling was heard that could be attributed to this species. When I revisited the site in February 1998, during the drought of El Niño, the environment was moist and not bathed in clouds but rather intense sunlight, most of the cloud forest had been cleared within 1 km of the road, and the area was being converted into pastureland and/or potato fields. Searching under rocks, logs, and in the dirt banks along the side of the road yielded a single *Bolitoglossa*. Our failure to find frogs in February 1998 was probably due to the impact of El Niño more than the activity of campesinos because the soil beneath rocks and logs was warm to the touch. Immediately to the NNE of the type-locality, cloud forests persist on the northeastern face of the cuchilla de Bijagual.

Remarks. *Eleutherodactylus mnionaetes* exhibits the "S" condition of the mandibular ramus of the trigeminal nerve and a SQat formula for the *m. depressor mandibulae*.

Eleutherodactylus nervicus is now known from eight localities on the complex of páramos associated with Laguna Chingaza at elevations between 3000 and 3850 m. Additionally, it has been found in the Páramo de Chisacá (ICN 11869, 11871-72), Municipio de Usme, Depto. Cundinamarca, 3600 m (aprox. 4° 18'N, 74° 13'W) and in one of the páramos on the Boyacá-Cundinamarca border (MLS 1172, 8.5 km, airline, W Úmbita, Municipio de Úmbita, Depto. de Boyacá, 3450 m, aprox. 5° 13'N, 73° 32'W) (Fig. 1).

Discussion. The importance of this small frog is biogeographic because it appears to be the sister species of *E. nervicus*. As such, the suture between the distributions of this pair of species corresponds to that of two other probable pairs of sisters: *E. bogotensis*-*E. lynchi* and

Atelopus marinkelli-*A. muisca*. However, before one can conclude that a vicariance event has led to these speciation events, we need explicit hypotheses of relationships for all three pairs of species and, equally important, we need detailed mapping of the distributions of these species along the eastern edge of the Cundiboyacense altiplano, where páramo habitats are discontinuous (Fig. 1).

A further significant point about *E. mnionaetes* and *E. nervicus* is that they appear to differ in habitat. The available data for *E. nervicus* are relatively plentiful and the species appears to be one of páramos although it does descend into the upper parts of the bosque andino. The only collection for *E. mnionaetes* is from a site in bosque andino, suggesting that the speciation event included an ecological shift (Ross, 1972). Vicariance speciation does not predict habitat shifts whereas peripatric speciation requires it (Lynch, 1989). There is no obvious difference in habitat for the pair of *Atelopus* species nor for the other pair of *Eleutherodactylus* species.

Acknowledgments

The many courtesies of Maria Cristina Ardila and Pedro M. Ruiz. For companionship in the field, Angela Suárez, Jairo Sánchez, and P. M. Ruiz. For their help in securing live specimens of *E. nervicus*, Andres Acosta, Ximena Bernal, Pedro Galvis, and Horst Luddecke.

Literature Cited

- Lynch, J. D. 1989. The gauge of speciation: on the frequencies of modes of speciation. Pp. 527-553. In D. Otte & J. A. Endler (eds.), *Speciation and Its Consequences*. Sinauer Assoc., Inc. Sunderland, Massachusetts.
- _____. 1994. A new species of high-altitude frog (*Eleutherodactylus*: Leptodactylidae) from the Cordillera Oriental of Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 19 (72): 195-203.
- _____. & W. E. Duellman. 1997. Frogs of the genus *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) in western Ecuador: Systematics, ecology, and biogeography. The University of Kansas Natural History Museum, Special Publication (23): 1-236.
- Ross, H. 1972. An uncertainty principle in ecological evolution. Pp. 133-157. In R. T. Allen & F. C. James (Eds.), *A Symposium on Ecosystematics*. University of Arkansas Museum, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas.

FIRST OSTEOLOGICAL RECORD OF THE DWARF SPERM WHALE IN COLOMBIA, WITH NOTES ON THE ZOOGEOGRAPHY OF *KOGIA* IN SOUTH AMERICA

por

Milton F. Muñoz-Hincapié¹, Diana M. Mora-Pinto¹, Daniel M. Palacios²,
Eduardo R. Secchi³ & Antonio A. Mignucci-Giannoni⁴

Resumen

Muñoz-Hincapié, M. F., D. M. Mora-Pinto, D. M. Palacios, E. R. Secchi & A. A. Mignucci-Giannoni: First osteological record of the dwarf sperm whale in Colombia, with notes on the zoogeography of *Kogia* in South America. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **22**(84): 433-444 . 1998. ISSN 0370-3908.

Los cachalotes enano y pigmeo (*Kogia* spp.) se distribuyen generalmente en aguas pelágicas tropicales y templadas de todos los océanos; para Sur América la información es muy dispersa. Este primer informe osteológico del cachalote enano (*K. simus*) en Colombia, incluye la revisión de registros previos para Sur América. El espécimen de Colombia es el sexto caso para la costa del Pacífico suramericano y la primera evidencia osteológica de la especie en Colombia. La información biológica sobre las dos especies en Sur América se ha incrementado en los últimos años. Un total de 21 casos de *K. breviceps*, 23 de *K. simus* y 5 de *Kogia* sp. fueron estudiados para el análisis zoogeográfico de las especies. Estas especies son comunes en la mayoría de los

- 1 Biologists, Universidad Nacional de Colombia, AA 72773 Santafé de Bogotá, Colombia; Present address: Departamento de Ciencias Marinas, Universidad de Puerto Rico, PO Box 908, Lajas, Puerto Rico 00667; milton_fmh@hotmail.com and diana_mora@hotmail.com.
- 2 Oceanographer, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University, 104 Oceanography Administration Building, Corvallis, Oregon 97331-5503; dpalacio@oce.orst.edu.
- 3 Oceanographer, Laboratorio de Mamíferos Marinhos, Museu Oceanográfico "Prof. Eliézer de C. Rios", Caixa Postal 379, Rio Grande, RS, 96200-970 Brasil; musmamif@super.furg.br.
- 4 Biological Oceanographer and Associate Professor, Red Caribeña de Varamientos • Caribbean Stranding Network & Departamento de Ciencias y Tecnología, Universidad Metropolitana, SUAGM, PO Box 361715 San Juan, Puerto Rico 00936-1715; mignucci@caribe.net.

países con costas en el Caribe, Atlántico y Pacífico, pero Uruguay, raras en Argentina y Chile. No existen registros para Venezuela, Trinidad, Guyana, Surinam y Guayana Francesa. La mayor parte de los casos corresponden a aguas tropicales al norte del Trópico de Capricornio (23.5°S); las diferencias en la distribución entre las latitudes de los informes en las costas occidental y oriental, probablemente están relacionadas con las corrientes y masas de agua prevalentes. La distribución de las especies de *Kogia* parece estar ligada a las masas de aguas cálidas, y caracterizada como pelágico-tropical, alcanzando 15°S en la costa del Pacífico y hasta 33°S en la costa del Atlántico.

Palabras claves: Cetacea, *Kogia breviceps*, *K. simus*, zoogeografía, varamientos, Colombia, Sur América.

Abstract

The dwarf and pygmy sperm whale (*Kogia* spp.) are known to occur in pelagic waters of all tropical and temperate oceans, but their record in South America is fragmentary. We reviewed the literature for records of both species in South America as part of documenting the first osteological record of the dwarf sperm whale (*K. simus*) in Colombia. The new Colombian specimen is only the sixth recorded so far from the Pacific coast of mainland South America, and the first osteological voucher of the species for Colombia. The biological information of the two species in South America has increased in recent years as a result of increased presence of researchers in the region. A total of 21 records of *K. breviceps*, 23 of *K. simus* and 5 of *Kogia* sp. were studied, to analyze the species' zoogeography. Both whale species were found in most coastal nations of the Caribbean, Atlantic and Pacific, but appear to be rare in Uruguay, Argentina and Chile. No records exist for Venezuela, Trinidad, Guyana, Suriname, and French Guiana. Most of the records were in waters north of the Tropic of Capricorn (23.5°S); differences in tropical distribution observed when comparing the latitudes of records from the east coast with the west coast are probably related to the prevailing currents and water masses. The distribution of both species of *Kogia* appears to be tied to the warmer water masses, and characterized as tropical pelagic, ranging as far south as 15°S on the Pacific coast and 33°S on the Atlantic coast.

Key words: Cetacea, *Kogia breviceps*, *K. simus*, zoogeography, strandings, Colombia, South America.

Introduction

The dwarf sperm whale (*Kogia simus*) and pygmy sperm whale (*Kogia breviceps*) are odontocetes known to occur in all tropical and temperate oceans of the world, particularly offshore (Handley, 1966; Caldwell & Caldwell, 1989; Jefferson et al. 1993). These shy and undemonstrative whales are rarely detected at sea, except under excellent sighting conditions, and specific separation is often difficult during the typically brief encounters. On the other hand, they are one of the most commonly stranded cetaceans in several parts of the world, and indeed most of the information available is based on beached individuals or ones occasionally taken in small fisheries (e.g. Jefferson et al., 1993). However, their zoogeography, basic biology, life history and behavior remain poorly understood.

Information on the distribution of the genus *Kogia* for the South American continent has been extremely scarce. The most recent revision (Caldwell & Caldwell, 1989) only included two records of *K. breviceps* and two of *K. simus* for this part of the world. Since then, the number of documented reports has significantly increased to 49, but unfortunately, this information has not always been part of the mainstream scientific literature. Thus we consider it of value to include a review of reports of both pygmy and dwarf sperm whales in South America as part of documenting the first osteological record of the dwarf sperm whale in Colombia.

Colombia's first osteological record of *Kogia simus*

On 20 September 1993, a dwarf sperm whale stranded on a sandy beach between the communities of La Vigia and Mulatos (02°39'N, 78°22'W), on the Pacific coast of Colombia. Despite its advanced state of decomposi-

tion, four days later, initial identification of the animal was made based on the remnant of its false-gill coloration behind the head, the generic characteristic under-slung jaw, and the height, shape and location of its dorsal fin. The diagnostic skull characteristics, as detailed in **Handley** (1966), **Ross** (1979) and **Caldwell & Caldwell** (1989), further confirmed the identification.

The complete skeleton was salvaged and examined. The skull measured 238 mm in condylobasal length (CBL) (Table 1). Each ramus of the lower jaw had 9 alveoli. A total of 7 teeth were collected from both rami. Tooth analysis, as in **Hohn** (1980), indicated an estimated age of 8 growth layer groups (GLGs). The lack of fusion of cranial sutures, vertebrae and intervertebral discs indicated that this specimen was physically immature. The CBL was below the range given by **Ross** (1979) of 265-275 mm of CBL, in which both females and males seem

to reach physical maturity. The rostrum length/CBL ratio of this specimen (44.5%), however, was higher than the range established by **Ross** (1979) for *K. simus* in South African waters of 28.5-41.4%. This finding is in agreement with the observation by **Félix et al.** (1995) that the rostrum of South America specimens appears to be longer and more variable than in the South African specimens (Table 2).

The specimen reported here is only the sixth recorded so far from the Pacific coast of mainland South America, and the first voucher specimen of the species for Colombia.

Review of records of *Kogia* spp. in South America

The South American continent is surrounded by three major ocean realms: the Caribbean Sea to the north, the Atlantic Ocean to the east, and the Pacific Ocean to the

Table 1. Cranial and mandibular measurements of a dwarf sperm whale (*Kogia simus*) from Colombia following the methodology by **Ross** (1979).

Measurements	mm	Percent of Measurement No. 1
1 Total (condylobasal) length	238.0	100.0
2 Rostrum length	106.0	44.5
3 Rostrum, basal width	113.5	47.7
4 Rostrum width at its middle	73.0	30.7
5 Breadth across pre-orbital angles of supraorbital process	192.0	80.7
6 Breadth across post-orbital process	216.0	90.7
7 Zygomatic width	213.0	89.6
8 Height of vertex	163.0	68.5
9 Width of vertex	16.0	6.7
10 Width of supra-occipital at narrowest part between posterior margins of temporal fossae	165.0	69.3
11 Tip rostrum left naris	96.7	40.6
12 Height of ventral border of foramen magnum	46.6	19.5
13 Length maxillary toothgroove left	42.0	17.6
14 Length maxillary toothgroove right	40.0	16.8
15 Width outer margins occipital condyles	70.0	29.4
16 Tip rostrum hind margins pterigoids	120.0	50.4
17 Length of mandible left	191.0	80.2
18 Number of alveoli left	9	-
19 Number of alveoli right	9	-
20 Height mandible at coronoid	58.0	24.3
21 Length mandibular symphysis	32.0	13.4
22 Length lower toothrow left	69.0	28.9
23 Length lower toothrow right	69.0	28.9
24 Height dorsal border of foramen magnum to vertex	107.5	45.1

Table 2. Relationship between condylobasal length and rostrum length of dwarf sperm whales (*Kogia simus*) from South America following the methodology by Ross (1979).

Country	Percent of rostrum length	Reference
Brasil	43.4	Pinedo (1987)
Chile	51.9	Crovetto & Toro (1983)
Colombia	44.5	This paper
Ecuador	38.2	Félix et al. (1995)
Perú	46.0	Reyes & Van Waerebeek (1992)

west. Given the particular oceanographic characteristics of each one of these basins, we consider the records of *Kogia* spp. for each region separately in the review that follows. The records are listed in Table 3 and their distribution is shown in Figure 1.

Caribbean Sea. Three surveys have been conducted in the southwestern Caribbean, including waters of Colombia (Jefferson & Lynn, 1994; Palacios et al., 1995; Palacios et al., 1996a), but no sightings of either species were recorded. The presence of *K. breviceps* in the Colombian Caribbean is known from three strandings and one incidental capture in fishing operations. A live animal stranded in Cartagena, Bolívar, on 29 October 1983 (Prieto-Rodríguez, 1989). Its skull is now housed at the Museo Venado de Oro in Bogotá. A second specimen stranded in Santa Marta, Magdalena, on 7 February 1990 (N.H. Campos, pers. comm.). A third pygmy sperm whale became entangled in artisanal fishing gear in the Gulf of Morrosquillo near Berrugas, Sucre, on 25 November 1988 (Vidal, 1990). The complete skeleton is housed at the Centro de Investigación, Educación y Recreación in Islas del Rosario (C.A. Bohorquez, pers. comm.).

Cuervo et al. (1986) and Vidal (1990) reported the stranding of a dwarf sperm whale in September 1973 in the Gulf of Uraba, near Acandí, Chocó. This identification, however, is incorrect. A careful examination by MFMH and DMMP in 1992 of the skull of this specimen, now housed at the mammalogy collection of the Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, showed that it was in fact a specimen of *K. breviceps*, based on its morphology and size. It is thus the fourth record of the pygmy sperm whale for the Caribbean coast of Colombia. One additional stranding, identified only as *Kogia* sp., was reported from Santa

Marta in June 1986 (Vidal, 1990; M. Prieto-Rodríguez, pers. comm.).

Debrot & Barros (1992) reported the stranding of a *K. simus* stranded in Klein Curaçao in December 1989. No records of *Kogia* spp. have been reported for Trinidad and Venezuela (Romero et al., 1991).

Atlantic Ocean. Information on the presence of the *Kogia* along the east coast of South America consists of 16 strandings, three captures, and one instance of entanglement (Table 3, Figure 1). No records of either species have been reported off the countries along the western equatorial Atlantic (Guyana, Suriname, or French Guiana).

In Brasil there is information on seven pygmy sperm whale strandings and one capture. A pregnant female (with a 26 cm fetus) stranded at Praia José Menino, in Santos (São Paulo) on October 1965 (Carvalho, 1966). The specimen is housed at the collection of the Departamento de Zoologia, Secretaria de Agricultura. Geise & Borobia (1987) documented the stranding of a female on Arraial do Cabo, in Cabo Frio, Rio de Janeiro in December 1983. Its skeletal remains, including the skull are housed at the Museu de Zoologia of the Universidade de São Paulo. A subadult pygmy sperm whale was described by Rosas & Pinedo (1989) from a stranding at Praia do Cassino in Rio Grande, Rio Grande do Sul on September 1986. Its skull, housed at the Colección del Museu Oceanográfico de Rio Grande, had bullet perforations in the eyes and vomer. The authors implicated this as the obvious cause of its death. A male pygmy sperm whale, was found dead in May 1987 at Praia da Cacimba do Padre on Ilha de Fernando de Noronha (L. Lodi and S. Siciliano, unpubl. data). A 288-cm adult female stranded on 15 January 1988 at Praia do Marujá, in Cananéia (São Paulo) (Schmiegelow, 1990). An adult specimen was also reported stranded at Tramandaí, Rio Grande do Sul on 29 September 1988 (GERMARS, unpubl. data). Two females, an adult and a subadult, stranded on 1 May 1989 at Praia do Mar Grosso, in São José do Norte (Rio Grande do Sul) (Secchi et al., 1994); the skull of the adult is housed at the collection of the Museu Oceanográfico "Prof. Eliézer de C. Rios". The most recent *K. breviceps* stranding in Brasil occurred on 21 October 1997, when an animal was found on Praia de Lucena in Rio Tinto (Paraíba) (A. Pereira and D. Peludo pers. comm.).

The dwarf sperm whale has been recorded nine times in Brasil. A pregnant female stranded in July 1983 at Praia do Mar Grosso (Pinedo, 1987). A neonate female stranded

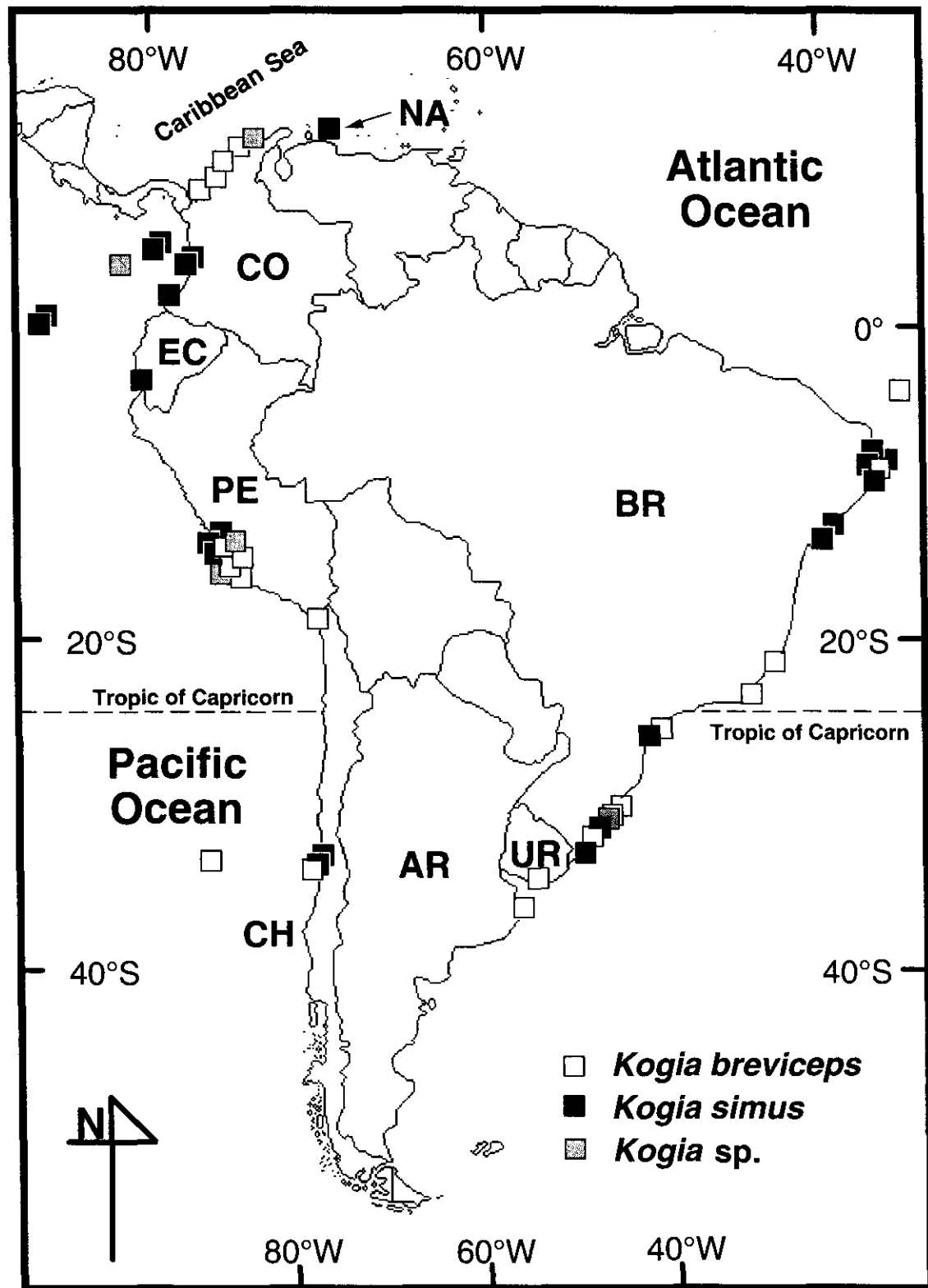


Figure 1. Distribution of *Kogia* spp. in South America based on sighting, stranding and capture data (AR = Argentina, BR = Brasil, CH = Chile, CO = Colombia, EC = Ecuador, NA = Netherland Antilles, PE = Perú, UR = Uruguay).

on 17 January 1990 at the mouth of Rio Imbasai in Santo Antônio, 15 km N of Praia do Forte in Itaparica (Bahia) (Hetzl & Lodi, 1993). A third specimen stranded at Praia das Monções in Paraná on 25 April 1994 (Zanelatto & Guiera, 1994; Zanelatto et al. 1996). On 3 June 1994, a *K. simus* stranded at Praia da Penha in João Pessoa (Paraíba) and another stranded on 13 January 1995 at Praia do Cabo Branco, also in João Pessoa (Pereira et al., 1998). Their skeletal remains were collected and are housed at the Universidade Federal da Paraíba. Local fishermen of Vila de Massarandupió in Entre Rios (Bahia) reported capturing a dwarf sperm whale early in June 1995 (Sampaio et al., 1996). The bones left by the fishermen after consumption of the animal's meat, were collected and are deposited in the collection of the Grupo de Estudos de Cetáceos da Bahia. Another specimen stranded on 24 January 1996 in Barra do Mamanguape, Rio Tinto (Paraíba), and its skeletal remains are housed at the Universidade Federal da Paraíba (Pereira et al., 1998). Soto et al. (1996) reported the incidental capture of *K. simus* in surface gillnets operated by the fishing fleet from Itajaí in Santa Catarina, Rio Grande do Sul. A 200-cm dwarf sperm whale was captured with a gillnet off Praia de Pitimbú in Paraíba on 7 June 1997 (Marques et al., 1998). Upon landing on port, the meat of the animal was consumed by locals. One stranding of *Kogia* sp. was recently recorded near Capão da Canoa in Rio Grande do Sul in April 1997 (GEMARS, unpubl. data).

The only record of *Kogia* in Uruguay was reported by Vaz Ferreira & Praderi (1973). They described the live-stranding of a 195-kg male pygmy sperm whale in April 1971 at Playa Ramírez, in Montevideo. The animal was rescued and taken to the Jardín Zoológico de Villa Dolores, but the animal died on the same night. The skeletal remains of the specimen are now housed at the Museo Nacional de Historia Natural.

In Argentina, a female pygmy sperm whale stranded in October 1981 at Playas de Palo Blanco, San Clemente del Tuyú, between Buenos Aires and Mar del Plata (Castello et al., 1986). D. Rodríguez (pers. comm.) reported to us that four more unpublished records of *K. breviceps* recently were documented in Argentina.

Pacific Ocean. Collectively, over 22 sightings, strandings, and incidents of mortality in fishing operations have been documented for the genus *Kogia* from the four countries along the west coast of South America (Table 3, Figure 1).

Vidal (1990) compiled sighting information in Colombian waters through 1987 from survey cruises conducted

by the U.S. National Marine Fisheries Service (NMFS), and from sightings made on board tuna vessels. There were three sightings of dwarf sperm whales: 75 km W of Bahía Malaga, and 10 km W of Cabo Corrientes, both on 31 October 1986, and one animal sighted near Malpelo Island in 1987. Two additional sightings have been made since: one of a single animal reported as *Kogia* sp. 230 km WSW of Malpelo Island on 9 October 1989, and one dwarf sperm whale 225 km W of Cabo Corrientes on 6 October 1992 (Gerrodette & Palacios, 1996). Previous to the osteological specimen reported here, no strandings had been recorded on the Pacific coast of Colombia.

No sightings of either species of *Kogia* were reported in Ecuadorian waters from the NMFS cruises between 1986 and 1993 (Gerrodette & Palacios, 1996). Day (1994) considered that both dwarf and pygmy sperm whales could be seen in waters around the Galápagos Islands. Palacios et al. (1996b), however, argued that it is more likely that only dwarf sperm whales are normally present there. For the mainland, Félix et al. (1995) reported the incidental capture of two dwarf sperm whales on 12 May 1993 in artisanal gillnets, 56 km SW of Anconcito. The head of one of the animals, an adult male, was collected and its skull was deposited in the reference collection of the Fundación Ecuatoriana para el Estudio de Mamíferos Marinos. Félix et al. (1995) also reported the stranding of a dwarf sperm whale on Quinta Playa, Isabela Island, Galápagos, in March 1990. The skull and skeleton are deposited in the Laboratorio de Taxidermia, Facultad de Ciencias Naturales at the Universidad de Guayaquil. An additional skull of a dwarf sperm whale found on the northern shore of Santa Cruz Island is in the personal collection of G. Angermeyer in Puerto Ayora, Santa Cruz Island, Galápagos (Palacios, 1995).

The first record of *Kogia* for Perú is of a skull of a pygmy sperm whale from Bahía de la Independencia, south of Pisco, collected by R.C. Murphy in November 1919 (Van Waerebeek et al., 1987). This skull is housed at the Museum of Comparative Zoology in Cambridge, Massachusetts (Van Waerebeek et al., 1987; Reyes et al., 1988), and its specific identity has yet to be confirmed as *K. simus* was not recognized as a separate species from *K. breviceps* until 1966 (see Handley, 1966). Van Waerebeek et al. (1987) reported finding the skull and other skeletal remains of a second *K. breviceps* in a trash dump in the port of Pucusana. The specimen was found in December 1984 and is believed to have been captured in the fisheries for small cetaceans run by locals (Van Waerebeek et al., 1987). A third pygmy sperm

whale stranded at Bahía de Paracas in January 1987 (Reyes et al., 1988). The specimen, a pregnant female, had a fetus of approximately 92.5 cm in length. Another female stranded at the same locality on 10 July 1988. The animal's skeletal remains were collected for the Centro Peruano de Estudios Cetológicos (CEPEC).

The first record of *Kogia simus* for Perú is of a female with a fetus, found in a fishing trash dump in Lagunillas, Paracas, in November 1985 (Reyes et al., 1988). The skull was collected for the CEPEC. Reyes et al. (1988) reported the live-stranding of an adult female and a calf dwarf sperm whales on August 1986 in the Bahía de Paracas. They also reported the entanglement in a shark net of an adult male dwarf sperm whale in Pucusana, in January 1988 (Reyes et al., 1988; Reyes, 1992). Two records of *Kogia* unidentified to species level were also reported for Perú, one between April and May 1987 in the port of Pucusana, and one of a pregnant female (with a 84-cm fetus) found stranded in December 1990 in Bahía de Paracas. K. Van Waerebeek (pers. comm.) reported to us that several more unpublished records of *Kogia* exist for Perú.

In Chile, Toro (1965), Crovetto & Toro (1983) and Nagorsen (1985) reported a young female *K. simus* captured by fishermen in Caleta Portales, Valparaíso on 2 December 1960, and a *K. breviceps* stranded in July 1969, 15 km from the beach between Arica, Tarapaca, and the Peruvian border (J. G. Mead & MMEP, Smithsonian Institution, unpubl. data). Another stranding of *K. breviceps* was reported on 8 November 1968 at Caleta Caravahel, Juan Fernández Islands (J. G. Mead & MMEP, Smithsonian Institution, unpubl. data). On 1 April 1995, an adult pygmy sperm whale was reported stranded in Rocas de Santo Domingo (Sanino & Yañez, 1996). The most recent stranding was of a pregnant female of *K. simus* which stranded alive in Playa Maitenlahue, San Antonio on 2 February 1996 (Brito, 1996). The 120-kg animal was pushed back by fishermen, but re-stranded and died.

Zoogeography of *Kogia* in South America

The biological information of the genus *Kogia* in South America has increased in recent years as a result of increased presence of researchers in the region. Equally, our knowledge of its distribution is still largely restricted to specimens collected on beaches or to animals captured by fishermen and brought ashore; in part, this distribution reflects that of the interested observers. Perhaps the only exception is in the most tropical waters

of the Pacific Ocean, where considerable survey effort has been conducted resulting in some sightings of *K. simus*, mainly in Colombian waters.

Both pygmy and dwarf sperm whales were found in most coastal nations of the Caribbean, Atlantic and Pacific. The notable exceptions were Venezuela, Trinidad and Tobago, Guyana, Suriname and French Guiana, as well as the northern part of Brasil (from Cabo Caciporé to Cabo de São Roque). This is perhaps not surprising, considering that the Amazon and Orinoco Rivers discharge enormous amounts of fresh water and continental sediments to this region, possibly modifying the preferred habitats of *Kogia*. A lack of adequate observer effort in these countries could also help explain this gap in distribution. *Kogia* appears to be rare in Uruguay, Argentina and Chile.

The scanty records from the Caribbean, the most tropical of the regions in this study, appear to indicate that *K. breviceps* is more common there than *K. simus*. This may be an artifact of the small sample, however as both species are almost equally well represented in the stranding record for the Gulf of Mexico (Jefferson et al., 1992), to the northwest of our study area.

There was a similar number of records for pygmy and dwarf sperm whales along the Atlantic coast of South America, and they occurred in relatively close proximity to each other, nonetheless, and any suggestion of distributional differentiation or relative abundance of either of the species along this coast is premature until more studies are conducted.

The observed distribution of *Kogia* on the Pacific coast of South America from this study is in agreement with the existing knowledge of the zoogeography of the genus in the eastern North Pacific. Evidence there indicates that *K. breviceps* has a more "anti-tropical" (i.e. warm-temperate to cool-temperate) distribution while *K. simus* tends to occupy the warmer-temperate to tropical waters (Leatherwood et al., 1988; Wade & Gerrodette, 1993). Thus we should expect to find *K. breviceps* further south than *K. simus* in the eastern South Pacific, as the records for Perú and Chile appear to indicate. In fact, according to Caldwell & Caldwell (1989), the tendency for *K. simus* to occur more often in tropical waters should be expected throughout the world's oceans.

The oceanographic conditions off the east and west coasts of the South American continent are determined by important current systems that grant some discussion as they influence the distribution of *Kogia*. Using the Tropic

Table 3. Sighting, stranding and capture records of *Kogia* spp. for South America.

Catalog No.	Date	Locality*	No. Animals	Sex	Size	CBL	Reference
<i>Kogia breviceps</i>							
MCZ18489	— Nov	1919 Bahía de la Independencia, S of Pisco, PE	1	U	-	317 mm	Van Waerebeek et al. 1987
DZ10597	— Oct	1965 Praia José Menino, Santos, São Paulo, BR	1	F	280 cm	-	Carvalho, 1966
NMNH00395634	08 Nov	1968 Caleta Caravahel, Islas de Juan Fernández, CH	1	U	-	-	J. G. Mead, pers. comm.
NMNH00395734	-- Jul	1969 Between Peruvian border and Arica (Tarapaca), CH	1	U	-	-	J. G. Mead, pers. comm.
MNHN2431 1973	— Apr	1971 Playa Ramirez, Montevideo, UR	1	M	220 cm	-	Vaz Ferreira & Praderi,
MHNICN5472 paper	— Sep	1973 Acandí, Golfo de Uraba, Chocó, CO	1	U	-	-	Cuervo et al. 1986, this
-	— Oct	1981 Playas de Palo Blanco, San Clemente del Tuyú, AR	1	F	308 cm	-	Castello et al., 1986
MVO5636	29 Oct	1983 Cartagena, Bolivar, CO	1	U	340 cm	267 mm	Prieto-Rodríguez, 1989
MZUSP19482	— Dec	1983 Arraial do Cabo, Cabo Frio, Rio de Janeiro, BR	1	F	253 cm	364 mm	Geise & Borobia, 1987
JCR037 1987	-- Dec	1984 Pucusana, PE	1	U	204 cm	294 mm	Van Waerebeek et al.,
MORG891	— Sep	1986 Praia do Cassino, Rio Grande do Sul, BR	1	U	200 cm	287 mm	Rosas & Pinedo, 1989
-	— Jan	1987 Bahía de Paracas, PE	1	F	>286 cm	470 mm	Reyes et al., 1988
-	— May	1987 Praia da Cacimba do Padre, Ilha de Fernando de Noronha, BR	1	M	273 cm	347 mm	Lodi & Siciliano unpubl. data
-	15 Jan	1988 Praia do Marujá, Cananéia, São Paulo, BR	1	F	288 cm	-	Schmiegelow, 1990
JCR1482	10 Jul	1988 Bahía de Paracas, PE	1	F	260 cm	410 mm	Reyes et al., 1988
-	29 Sep	1988 Tramandai, Rio Grande do Sul, BR	1	U	>300 cm	-	GEMARS, unpubl. data
comm.							
NEPST135	25 Nov	1988 Near Berrugas, Golfo Morrosquillo, Sucre, CO	1	U	-	-	Vidal, 1990
MORG2014	01 May	1989 Praia do Mar Grosso, Rio Grande do Sul, BR	2	F	323 cm	445 mm	Secchi et al., 1994
				F	224 cm	-	
NEPST260	07 Feb	1990 Santa Marta, Magdalena, CO	1	U	-	-	N. H. Campos, pers. comm.
-	01 Apr	1995 Rocas de Santo Domingo, CH	1	U	350 cm	-	Sanino & Yañez, 1996
-	21 Oct	1997 Praia de Lucena, Rio Tinto, Paraíba, BR	1	U	-	-	A. Pereira & D. Paludo pers. comm.
<i>Kogia simus</i>							
-	— —	— Northern shore of Isla Santa Cruz, Isla Galapagos, EC	1	U	-	-	Palacios, 1995
-	02 Dec	1960 Caleta Portales, Valparaíso, CH	1	F	-	-	Toro, 1965
-	— Jul	1983 Praia do Mar Grosso, Rio Grande do Sul, BR	1	F	249 cm	-	Pinedo, 1987

* AR = Argentina, BR = Brasil, CH = Chile, CO = Colombia, EC = Ecuador, NA = Netherland Antilles, PE = Perú, UR = Uruguay.

Table 3. Continued.

Catalog No.	Date	Locality*	No. Animals	Sex	Size	CBL	Reference
JCR646	— Nov	1985 Lagunillas, Paracas, PE	1	F	214 cm	267 mm	Reyes et al., 1988
-	— Aug	1986 Bahía de Paracas, PE	2	F	~223 cm	-	Reyes et al., 1988
-				U	-	-	
-	31 Oct	1986 75 km W of Bahía Malaga, Valle, CO	1	U	-	-	Gerrodette & Palacios,
1996							
-	31 Oct	1986 10 km W of Cabo Corrientes, Choco, CO	1	U	-	-	Gerrodette & Palacios,
1996							
-	— —	1987 Near Isla de Malpelo, CO	1	U	-	-	Gerrodette & Palacios,
1996							
KVW1027	— Jan	1988 Pucusana, PE	1	M	132 cm	-	Reyes, 1992
-	— Dec	1989 Klein Curaçao, NA	1	U	110 cm	-	Debrot & Barros, 1992
-	17 Jan	1990 Mouth Rio Imbasai, Santo Antônio, Itaparica, Bahia, BR	1	F	100 cm	-	Hetzel & Lodi, 1993
-	— Mar	1990 Quinta Playa, Isla Isabela, Islas Galapagos, EC	1	U	-	-	Félix et al., 1996
-	06 Oct	1992 225 km W of Cabo Corrientes, Choco, CO	1	U	-	-	Gerrodette & Palacios,
1996							
FEMM01293	12 May	1993 56 km SW of Anconcito, EC	2	M	>200 cm	273 mm	Félix et al., 1995
-				U	-	-	
-	20 Sep	1993 Between La Vigía and Mulatos, Nariño, CO	1	U	-	238 mm	This paper
-	25 Apr	1994 Praia das Monções, Paraná, BR	1	U	242 cm	-	Zanelatto & Guiera, 1994
UFPB 2021	03 Jun	1994 Praia da Penha, João Pessoa, Paraíba, BR	1	U	-	261 mm	Pereira et al., 1998.
UFPB 2022	13 Jan	1995 Praia do Cabo Branco, João Pessoa, Paraíba, BR	1	M	-	269 mm	Pereira et al., 1998.
-	04 Jun	1995 Off Vila de Massarandupió, Entre Rios, Bahia, BR	1	U	-	-	Sampaio et al., 1996
UFPB 2405	24 Jan	1996 Barra do Mamanguape, Rio Tinto, Paraíba, BR	1	U	-	254 mm	Pereira et al., 1998.
-	02 Feb	1996 Playa de Maitenlahue, San Antonio, CH	1	F	226 cm	225 mm	Brito, 1996
-	07 Jun 1997	Off Praia de Pitimbu, Paraíba, BR	1	U	200 cm	252 mm	Marques et al., 1998
-	-	Rio Grande do Sul, BR	1	U	-	-	Soto et al., 1996
<i>Kogia</i> sp.							
NEPST244	— Jun	1986 Santa Marta, Magdalena, CO	1	U	-	-	Vidal, 1990
-	— Apr	1987 Puerto Pucusana, PE	1	U	-	-	Reyes et al., 1988
-	09 Oct	1989 230 km WSW of Isla de Malpelo, CO	1	U	-	-	Gerrodette & Palacios,
1996							
-	— Dec	1990 Bahía de Paracas, PE	1	F	-	-	K. Van Warenbeek, pers. comm.
-	— Apr	1997 Near Capão da Canoa, Rio Grande do Sul, BR	1	U	-	-	GEMARS, unpubl. data.

of Capricorn (23.5°S) as a reference latitude which roughly separates tropical waters to the north from temperate waters to the south, it is evident that a large number of records occurred south of 23.5°S on the east coast while there were only a few south of this latitude on the west coast. The southward extension in the range of *Kogia* on the east coast is probably tied to the southward flow of the warm Brazilian Current, which can reach Uruguay and the northern portions of Argentina, particularly at its highest flow peak during the austral summer (Gordon & Greengrove, 1986). On the other hand, the more protracted range of *Kogia* on the west coast is probably linked to the cool, northward flow of the Perú Current. This prompted Van Waerebeek et al. (1987) to believe that *Kogia* is a casual visitor to Perú, perhaps coming in with temporal warm water intrusions, such as occurs during El Niño.

On the southern part of the west coast, only four records exist from central-Chile, which do not fit the observed tropical distribution of *Kogia*. These records occurred during the continent's austral summer, and could possibly be attributed to stray or lost animals which ended up stranded on shore. The same scenario may be true for pygmy sperm whales in Uruguay and Argentina. Contrary to the latter, and as a different explanation, these records may respond zoogeographically to a similar situation as off southern Africa, where both species of *Kogia* are recorded (G. J. B. Ross, pers. comm.). The oceanography of both coasts in the southern part of each continent is similar: The southeastern coast of South America exhibits mixed water between the warm Brazilian current and the cold Malvinas current, similar to the east cape of southern Africa, where the warm Agulhas current and the cold Benguela current mix. The same applies off the western coasts of South America and South Africa, where cold currents moving north are met by warm currents moving south. This mixing of warm and cold water currents, may provide *Kogia* with suitable habitat for feeding, and thus provide an explanation for records south of the Tropic of Capricorn.

In conclusion, this study indicates that both species of the genus *Kogia* are well represented around the South American continent. Our analysis suggests that the distribution of both species of *Kogia* is tied to the warmer water masses, and in some cases in areas where cold currents meet warm currents. Notwithstanding stranding cases, sightings have only been reported for *K. simus*, all offshore in pelagic waters. *Kogia*'s zoogeography in South America could be then summarized as tropical and warm-temperate pelagic, ranging as far south as 15°S on the Pacific coast and 33°S on the Atlantic coast.

Both species appear to strand with some frequency, and it cannot be discounted that, in addition to the documented catches, some of these strandings may be resulting from interactions with fisheries. Thus, management programs in these nations should consider adequate protection of both pygmy and dwarf sperm whales and their habitat. Finally, the urgent need for more systematic studies of the cetacean fauna in the diverse habitats of South America cannot be overemphasized.

Acknowledgments

Support for the study was provided in part by a grant from the Caribbean Stranding Network (CSN) and the United Nations Environmental Program. We gratefully acknowledge the assistance of CSN participants, especially R. A. Montoya-Ospina, and Grupo de Estudio de Mamíferos Acuáticos do Rio Grande do Sul-GEMARS, especially M. Furtado-Neto, E. Zampiroli, C. Sampaio, L. Lodi, A. Pereira, and C. Marques, in the documentation and collection of specimens. We are thankful to A. Aguayo-Lobo, C. A. Bohorquez, R. Bernal, J. L. Brito, N. H. Campos, F. Felix, J. G. Mead (MMEP, Smithsonian Institution), D. Paludo, A. Pereira, M. Prieto-Rodríguez, D. Rodríguez, F. Rosas, S. Siciliano, and K. van Waerebeek, for providing valuable information and references for this review. We acknowledge the assistance of A. R. Estrada-Acosta, M. A. Rodríguez-López and M. A. Cardona in the preparation of the manuscript. G.J. B. Ross kindly reviewed and provided much helpful comments which improved the manuscript.

Literature Cited

- Brito, J. L.** 1996. Segundo registro de *Kogia simus* para la costa de Chile. *In* Resúmenes. VII Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur and I Congreso de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Mamíferos Acuáticos. 22-25 October 1996, Viña del Mar, Chile, p. 82.
- Caldwell D. K. & M. C. Caldwell.** 1989. Pygmy sperm whale *Kogia breviceps* (de Blainville, 1838): Dwarf sperm whale *Kogia simus* Owen, 1866. *In* S. H. Ridgway and R. Harrison (eds), Handbook of Marine Mammals, Volume 4. River dolphins and the larger toothed whales. Academic Press. pp. 235-260.
- Carvalho, C. T. de.** 1966. Notas sobre *Kogia breviceps* (Cetacea, Physteridae). *Revista de Biología Tropical* 14: 169-181.
- Castello, H. P., F. Erize & A. A. Lichter.** 1986. Primer registro del cachalote pigmeo, *Kogia breviceps* (Blainville, 1838) para las costas de la República Argentina. *In* Resúmenes, I Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur. 25-29 June 1984, Buenos Aires, Argentina, pp. 69-77.
- Crovetto, A. & H. Toro.** 1983. Présence de *Kogia simus* (Cetacea, Physteridae) dans les eaux chiliennes. *Mammalia* 147: 591-593.

- Cuervo, A. J. Hernandez & A. Cadena.** 1986. Lista actualizada de los mamíferos de Colombia. Anotaciones sobre su distribución. *Caldasia* 15(71-75): 471-501.
- Day, D.** 1994. List of cetaceans seen in Galápagos. *Noticias de Galápagos* 53: 5-6.
- Debrot, A. O. & N. B. Barros.** 1992. Notes on a Gervais' beaked whale, *Mesoplodon europaeus*, and a dwarf sperm whale, *Kogia simus*, stranded in Curaçao, Netherlands Antilles. *Marine Mammal Science* 8: 172-178.
- Félix, F., B. Haase & J. Samaniego.** 1995. Primeros registros de la orca pigmea *Feresa attenuata* (Cetacea, Delphinidae) y del cachalote enano *Kogia simus* (Cetacea, Physeteridae) en Ecuador continental. *Estudios Oceanológicos* 14: 77-85.
- Geise, L. & M. Borobia.** 1987. New Brazilian records for *Kogia*, *Pontoporia*, *Grampus* and *Sotalia* (Cetacea, Physeteridae, Platanistidae and Delphinidae). *Journal of Mammalogy* 68: 873-875.
- Gerrodette, T. & D. M. Palacios.** 1996. Estimate of cetacean abundance in EEZ waters of the Eastern Tropical Pacific. National Marine Fisheries Service Southwest Fisheries Center Administrative Report LJ-96-10, 28 pp.
- Gordon, L. A. & C. L. Greengrove.** 1986. Geostrophic circulation of the Brazil-Falkland confluence. *Deep Sea Research* 33: 573-585.
- Handley, C. O.** 1966. A synopsis of the genus *Kogia* (pygmy sperm whales). In: K. S. Norris (ed), *Whales, Dolphins and Porpoises*. University of California Press. pp. 62-69.
- Hetzel, B. & L. Lodi.** 1983. Baleias, botos e golfinhos: Guia de Identificação para o Brasil. Rio de Janeiro, Brasil: Editora Nova Fronteira.
- Hohn, A. A.** 1980. Analysis of growth layers in the teeth of *Tursiops truncatus*, using light microscopy, microradiography, and SEM. Pages 155-163 in W. F. Perrin and A. C. Myrick, Jr. (editors). *Age determination of toothed whales and sirenians*. Rep. Int. Whal. Commn. Spec. Issue, 3.
- Jefferson, T. A., S. Leatherwood, L. K. M. Shoda & R. L. Pitman.** 1992. Marine mammals of the Gulf of Mexico: A field guide for aerial and shipboard observers. Texas A&M University Printing Center, College Station, 92 pp.
- _____, _____ & **M. A. Webber.** 1993. *FAO Species Identification Guide. Marine Mammals of the World*. Rome, FAO, 320 pp.
- _____, _____ & **S. K. Lynn.** 1994. Marine mammal sightings in the Caribbean Sea and Gulf of Mexico, summer 1991. *Caribbean Journal of Science* 30: 83-89.
- Leatherwood, S., R. R. Reeves, W. F. Perrin & W. E. Evans.** 1988. *Whales, dolphins and porpoises of the eastern North Pacific and adjacent Arctic waters*. Dover Publications, New York, 245 pp.
- Marques, C. C., A. C. A. El-Deir, G. Rincon Filho, Rangel, C. E., G. M. Costa, R. P. T. Lessa & D. Hellebrandt.** 1998. Registro de captura accidental de um cachalote-anão, *Kogia simus* (Owen, 1866) (Cetacea, Odontoceti) ao largo da costa da Paraíba. In *Resumos, XXII Congresso Brasileiro de Zoologia*, 8-13 February 1998, Recife, Brasil, p. 334.
- Nagorsen, D.** 1985. *Kogia simus*. *Mammalian Species* 239: 1-6.
- Palacios, D. M.** 1995. Cetacean remains and strandings in the Galapagos Islands. In A. H. Kopelman (ed), *Proceedings of the 1995 Northeast Regional Marine Mammal and Sea Turtle Stranding Network Conference*, 28-30 April 1995, Riverhead, New York, pp. 27-29.
- _____, **T. Gerrodette, S. Beltrán, P. Rodríguez & B. Brennan.** 1995. Cetacean sighting cruises off the Colombian Caribbean Sea and Pacific Ocean. In *Abstracts, Eleventh Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals*, 14-18 December 1995, Orlando, Florida, p. 88.
- _____, **P. Rodríguez, B. J. Brennan, S. Beltrán & F. Trujillo.** 1996a. Cetacean sightings during cruises in the southwestern Caribbean Sea. In *Resúmenes, VII Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur and I Congreso de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Mamíferos Acuáticos*, 22-25 October 1996, Viña del Mar, Chile, p. 76.
- _____, **T. Gerrodette & D. Day.** 1996b. Marine mammal diversity off the Galapagos Islands, Ecuador. In *Resúmenes, VII Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur and I Congreso de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Mamíferos Acuáticos*, 22-25 October 1996, Viña del Mar, Chile, p. 72.
- Pereira, A. L. C., B. B. C. L. Melo & S. F. Leiros.** 1998. Primeiro registro de *Kogia simus* (Cetacea: Physeteridae) para a Paraíba, com notas osteológicas. In *Resumos, XXII Congresso Brasileiro de Zoologia*, 8-13 February 1998, Recife, Brasil, p. 346.
- Pinedo, M. C.** 1987. First record of a dwarf sperm whale from Southwest Atlantic, with reference to osteology, food habitats and reproduction. *Scientific Reports Whales Research Institute Tokyo*, 38: 171-186.
- Prieto-Rodríguez, M.** 1989. Reporte de algunos cetáceos del Caribe Colombiano. *Boletín Facultad Biología Marina (Universidad Jorge Tadeo Lozano)* 8: 30-40.
- Reyes, J. C.** 1992. Informe nacional sobre la situación de los mamíferos marinos en Perú. *Informes y Estudios del Programa de Mares Regionales del PNUMA* 145: 1-21.
- _____, _____ & **K. Van Waerebeek.** 1992. Nuevos registros del género *Kogia* en Perú. In *Resúmenes, III Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur*, 25-30 July 1988. Montevideo, Uruguay, pp. 54-61.
- _____, _____ & **B. A. Luscombe.** 1988. Revisión de la distribución de pequeños cetáceos frente al Perú. In H. Salzwedel and A. Landa (eds), *Recursos y Dinámica del Ecosistema de Afloramiento Peruano*. Boletín del Instituto del Mar Perú-Callao (Volumen Extraordinario), pp. 345-351.
- Romero, A., A. Mayayo & I. Agudo.** 1991. Los cetáceos recientes de Venezuela. *Memoria, Sociedad de Ciencias Naturales La Salle*, Tomo LI (135-136): 169-180.
- Rosas, F. C. W. & M. C. Pinedo.** 1989. Nota sobre a ocorrência do cachalote pigmeu, *Kogia breviceps*, no litoral do Rio Grande do Sul, Brasil. *Atlântica* 11: 109-113.
- Ross G. J. B.** 1979. Records of pygmy and dwarf sperm whales, genus *Kogia*, from southern Africa, with biological notes and some comparisons. *Annals of the Cape Provincial Museums (Natural History)* 11: 259-327.

- Sampaio, C. L., A. F. B. Lima, E. L. Queiroz, P. C. Lima, J. O. Castro & R. C. F. R. Lima.** 1996. Registros de encalhes de pequenos cetáceos no litoral norte do estado da Bahia. *In* Resúmenes, VII Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur, 22-25 October 1996, Viña del Mar, Chile, p. 80.
- Sanino, G. P. & J. Yañez.** 1996. Estudio del cachalote pigmeo *Kogia breviceps* (Blainville 1838), varado en la costa de Chile. *In* Resúmenes, VII Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur and I Congreso de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Mamíferos Acuáticos, 22-25 October 1996, Viña del Mar, Chile, p. 93.
- Schmiegelow, J. M. M.** 1990. Estudo sobre cetáceos odontocetos encontrados em praias da região entre Iguape (SP) e Baía de Paranaguá (PR) (24°42'S-25°28'S), com especial referência a *Sotalia fluviatilis* (Gervais, 1853) (Delphinidae). Master's thesis, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 104 pp.
- Secchi, E. R. M. B. Campolim & L. M. Möller.** 1994. Notas sobre o encalhe de dois cachalotes pigmeus *Kogia breviceps* na costa sul do Rio Grande do Sul, Brasil. *In* Actas, IV Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur, 12-15 November 1990, Valdivia, Chile, p. 244-262.
- Siciliano, S., L. Lodi & M. Borobia.** 1990. Noves registros de mamíferos marinhos na costa brasileira. *In* Resúmenes, IV Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur, 12-15 November 1990, Valdivia, Chile, p. 67.
- Soto, J. M., L. R. Caseca-Santos & S. Ternes-Silva.** 1996. Dados sobre a captura accidental de cetáceos pela frota pesqueira de Itajaí (Santa Catarina, Brasil), através de redes de emalhe de superfície. *In* Resúmenes, VII Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur, 22-25 October 1996, Viña del Mar, Chile, p. 63.
- Van Waerebeek, K., J. C. Reyes & B. A. Luscombe.** 1987. A second record of the pygmy sperm whale *Kogia breviceps* (de Blainville, 1838) (Cetacea, Physeteridae) from the Peruvian coast. *Zeitschrift fuer Säugetierkunde* 52(3): 192-194.
- Vaz Ferreira, R. & R. Praderi.** 1973. Un nuevo ejemplar de *Kogia breviceps* (Blainville) (Cetacea, Physeteridae) del Atlántico Sudoccidental. *In* Trabajos del V Congreso Latinoamericano de Zoología 5 (1): 261-277.
- Vidal, O.** 1990. Lista de mamíferos acuáticos de Colombia. Informe del Museo del Mar (Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano) 37, 18 pp.
- Wade, P. R. & T. Gerrodette.** 1993. Estimates of cetacean abundance and distribution in the eastern tropical Pacific. *Rep. Int. Whal. Commn* 43: 477-493.
- Zanelatto, R. C. & C. M. Guiera.** 1994. Primeiro registro de cachalote anão, *Kogia simus* Owen, 1866 (Cetacea, Physeteridae) para a costa do Paraná, Brasil. *In* Resúmenes, VI Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur, 24-28 October 1994, Florianópolis, Brasil, pp. 109-110.
- _____, **F. C. W. Rosas & R. A. Santos.** 1996. Análise do conteúdo estomacal de um cachalote anão, *Kogia simus* (Cetacea: Kogiidae), registrado para o litoral do Paraná, Brasil. *In* Resúmenes, VII Reunión de Trabajo de Especialistas en Mamíferos Acuáticos de América del Sur, 22-25 October 1996, Viña del Mar, Chile, p. 82.

RECONSTRUCCION *IN VITRO* DE EPITELIO CORNEAL EN MATRICES DE COLAGENO*

por

Marcel Yecid Avila Castañeda**, Jorge Ramiro Barrero***, Gloria Romero de Pérez****, Antonio Iglesias*****

Resumen

Avila Castañeda, M. Y., Barrero, J. R., Romero de Pérez, G. & Iglesias, A.: Reconstrucción *In Vitro* de Epitelio Corneal en matrices de colágeno. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 22(84): 445-450. 1998. ISSN 0370-3908.

Las células epiteliales corneales humanas del limbo se cultivaron en lentes de colágeno. Las propiedades del epitelio reconstituido se examinaron mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de transmisión. Después de tres semanas de cultivo, las células presentaron uniones desmosómicas, uniones ocludens, microvellosidades en la superficie externa y formación de una membrana basal focal. Estos hallazgos son similares a los que se encuentran en la córnea normal, lo que sugiere que las células epiteliales cultivadas en matrices de colágeno podrían ser útiles para realizar trasplantes de epitelio corneal.

Palabras claves: Epitelio, cornea, colágeno.

Abstract

Limbal human corneal epithelial cells cultured on collagen shields were analyzed using transmission electron microscopy. Corneal epithelial cells from the limbus were cultured on collagen shields. Ultrastructural properties of the reconstituted epithelium were examined by electron microscopy. After 3 weeks, corneal epithelial cells cultured on collagen shields were examined by electron microscopy. Junctional complexes, desmosomes, tight junction, gap junctions, as well as focal formation of basal lamina and microprojections in superficial cells was observed in a similar way that in vivo findings. Human corneal limbal epithelial cells cultured on collagen shields exhibit cellular and extracellular elements similar to the observed in vivo, suggesting that cultured cells on collagen carriers may serve for corneal epithelial transplantation.

Key words: Epithelium, cornea, collagen.

* Financiado por Colciencias fondo N 2104-10-005-92, Alcon de Colombia y Centro de Microscopía Universidad Nacional

** M.D Banco de Ojos Hospital San Juan de Dios (HSJD)

*** M D Director Médico Banco de Ojos HSJD Bogotá

**** Directora Centro de Microscopía Universidad Nacional

***** M.D Profesor Unidad de Reumatología HSJD Universidad Nacional.

Introducción

La córnea por ser el tejido ocular más externo del globo ocular esta expuesto a sufrir múltiples lesiones bien sea por cuerpos extraños, factores medio ambientales u otros más severos causados por quemaduras químicas, que pueden inducir pérdida visual importante debido fundamentalmente a alteraciones en la cicatrización de la superficie ocular (neoformación de un epitelio que no tiene las características del epitelio normal). Como resultado hay una opacificación y neovascularización de la superficie ocular con los efectos de pérdida visual anteriormente mencionados (Thoft, 1977, 1988).

Las células madre del epitelio corneal se localizan en el limbo corneo-conjuntival y a partir de estas se produce la regeneración del epitelio corneal con sus características funcionales y bioquímicas propias (Shingleton, 1991). Cuando las células madre se lesionan el manejo de esta condición es especialmente difícil porque el epitelio no puede regenerarse. Dentro de las propuestas terapéuticas en las etapas iniciales se utilizan lubricantes, inhibidores de las colagenasas, lentes de contacto, factor de crecimiento epidermal (FCE), y en las fases posteriores se realiza trasplante de córnea, epiqueratoplastias, trasplantes heterólogos de conjuntiva, procedimientos que producen generalmente resultados desalentadores (Kenyon & Tseng, 1989).

El trasplante autólogo de conjuntiva se ha utilizado con resultados satisfactorios, pero en muchos casos no es posible emplear conjuntiva autóloga por daño bilateral. Estos casos son los que presentan peor pronóstico visual y requerirían procedimientos alternativos (Shermer et al., 1986)

Varios autores han sugerido la utilización de células epiteliales madre cultivadas para la regeneración de esta superficie corneal (Linderberg et al., 1993; Ohji et al., 1994; Garcher, 1990). Se han realizado diversas investigaciones y se ha estandarizado la técnica de aislamiento y propagación del epitelio, logrando además trasplantarlo en dermis de ratones (Linderberg et al., 1993). Otra alternativa utilizada es el empleo de matrices de colágeno como sustrato para la realización de dichos trasplantes (Geggel et al., 1991; He & McCulley, 1991); sin embargo no se han efectuado estudios tendientes a la evaluación de estos epitelios reconstituidos respecto a su morfología y a su comparación con el epitelio corneal in vivo. En este trabajo se evalúan los aspectos estructurales y ultraestructurales del epitelio corneal reconstruido *in vitro* y se propone la utilización de estos epitelios con fines terapéuticos, de una manera similar a la metodolo-

gía utilizada para reconstruir piel *in vitro* que se utiliza en trasplantes en pacientes con quemaduras severas de piel (Bell et al., 1981).

Materiales y métodos

Se obtuvieron ojos humanos de donantes de edades entre los 25 y 45 años (total de 12 ojos) y con un tiempo no mayor de 12 horas entre el momento del deceso y la obtención del globo ocular. (Acorde con la reglamentación legal de donación y trasplantes vigente en el país).

Las células corneales se aislaron mediante técnicas de microcirugía descamando las hojas de epitelio del limbo corneo-escleral con un disector romo de córnea; una vez obtenidas estas hojas de células epiteliales se sometieron a un tratamiento con una mezcla de tripsina al 0.1% Sigma St Louis MO) y EDTA al 0.02% en PBS pH 7.4 y luego se incubaron a 37 °C durante 1 hora con el fin para separar las células. Luego se centrifugaron a 1000 rpm durante 10 minutos y se lavaron con medio de cultivo en tres ocasiones.

Las células se cultivaron a razón de 2×10^6 células en pozos de cultivo de 35 mm (ICN Flow, Costa Mesa CA) en el medio Suplementado Hormonal que contiene medio mínimo esencial de Dulbecco, medio de Hams F12 en una proporción de 3:1 respectivamente, suplementándose con Suero Fetal Bovino al 10% (Gibco BRL Gaithersburg MD), Factor de crecimiento epidermal recombinante humano a 10 ng/ml (ICN Flow), Toxina de Colera a 100 ng/ml (ICN Flow), insulina a 5ng/ml (Sigma), mezcla antibiótica (Penicilina, estreptomycin, gentamicina y anfotericina B) a 20 mcg/ml (Sigma), hasta un estadio confluyente a una temperatura de 37 °C, con humedad del 95% y CO₂ al 5%. luego las células se dispersaron con tripsina EDTA al 0.02%. Posteriormente se sembraron en una matriz de colágeno, Bio-cor 24 horas (Baush and Lomb Tampa FL) a una concentración de 6×10^4 células por lente de colágeno.

El epitelio se cultivó durante 3 semanas, cambiando el medio de cultivo cada tercer día (Medio Suplementado Hormonal). La morfología de las células en el cultivo se registro mediante microfotografías en un microscopio de contraste de fase invertido.

Microscopía electrónica y óptica

El epitelio reconstituido en los lentes de colágeno se fijó durante 6 horas a 4°C en una solución de glutaraldehído al 2.5% en amortiguador de Millonig 0.1 M pH 7.4. Después de lavar con la solución amortiguadora

las muestras se postfijaron en una solución de OsO_4 durante 1 hora y luego se deshidrataron en gradientes de etanol. Posteriormente se embebieron en mezcla Epón-Araldita. Las secciones semifinas ($\pm 2\mu$) se colorearon con Azul de toluidina para su observación al microscopio de luz. Las secciones ultrafinas se contrastaron con acetato de uranilo y citrato de plomo y se observaron en un microscopio JEOL 100B. Las imágenes obtenidas fueron fotografiadas y digitalizadas mediante un procesador de imágenes Aldus Fotostar. Con el fin de resaltar detalles de ciertas estructuras se les asignó color .

Resultados

En el análisis microscópico, el epitelio corneal reconstituido después de 3 semanas en cultivo presentó células de forma poligonal organizadas en 2 a 4 capas

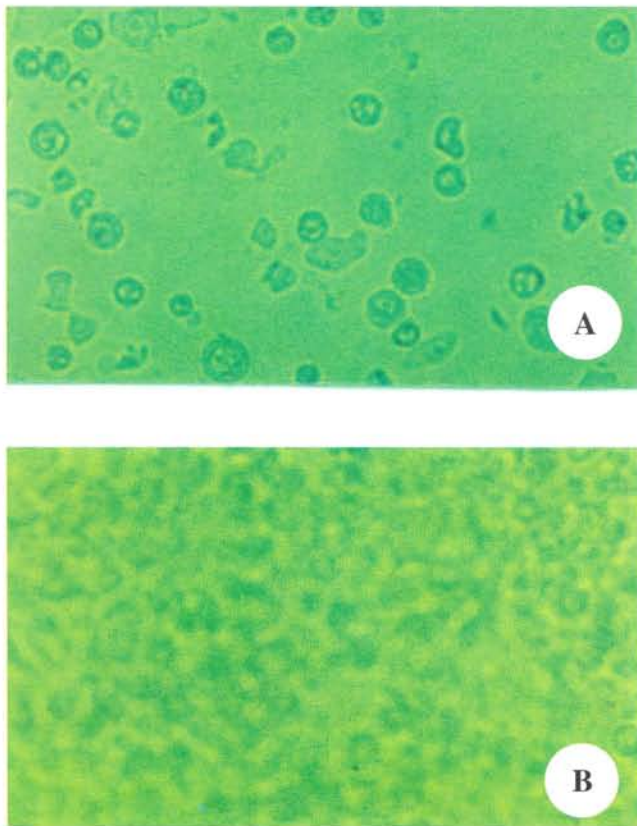


Figura 1. Microscopía de contraste de fase de epitelio corneal cultivado en lentes de colágeno (A) Día 3 de cultivo: Se observan células con figuras de mitosis y múltiples espacios en el área de cultivo. (B) Día 21 de cultivo: Se observa el área de cultivo llena de células, en forma poligonal. Estas células se observan en capas bajo el microscopio de luz, antes de su análisis por M.E.T.

continuas ocupando la superficie de la matrix colágena (Fig 1.). Durante el tiempo del cultivo las células demostraron actividad mitótica, sin cambios degenerativos visibles. El examen de las electromicrografías mostró que las células epiteliales superficiales conservan las microvellosidades características con filamentos de actina, y un glicocáliz pobremente desarrollado. En esta capa se evidenciaron complejos de unión tipo zona ocluyente en el ápice celular, y desmosomas entre células contiguas, y con las células de la capa subyacentes (Fig 2 a). Las células basales presentan proyecciones laterales interdigitadas y unidas entre sí con uniones desmosómicas. (Fig 2 b). La digitalización de las imágenes permite apreciar con mayor detalle la estructura interna de las microvellosidades y los elementos constitutivos de los complejos de unión (Fig 3.)

El citoplasma de las células en las diferentes capas presentó de una manera regular retículo endoplásmico rugoso (RER), tonofilamentos y pocas mitocondrias. Los gránulos de glucógeno se observaron especialmente abundantes en las dos capas celulares más basales (Fig 2.d). También fué evidente la presencia de lámina basal, aunque solo en puntos focales en la interfase epitelio-colágeno (Fig 2.c). En la matrix de colágeno se formaron pliegues ocasionales durante todo el tiempo de cultivo, pero se conservó siempre su integridad.

Discusión

La utilización de células epiteliales cultivadas para trasplantes han sido propuestas para la reconstrucción de la superficie ocular (Linderberg et al., 1993; Ohji et al., 1994; Garcher, 1990). Sin embargo estos cultivos requieren de células nodriza que deben ser irradiadas durante los ciclos del cultivo celular. Las capas de epitelio corneal en estos cultivos epiteliales forman depósitos de componentes de membrana basal después de 2 semanas (Ohji et al., 1994).

En este estudio se observaron las primeras fases de desarrollo del epitelio corneal limbal sobre láminas de colágeno: el epitelio prolifera y se organiza en un número de capas que varía de dos a cuatro estratos. La capa de células más externa presenta microvellosidades sobre su superficie, de una manera similar al epitelio corneal *in vivo* (Nichols et al., 1983). Estas microvellosidades aumentan la superficie de contacto para mantener la película lagrimal y proteger el epitelio subyacente. Son propias de las células jóvenes. (Pfister & Rennen., 1977).

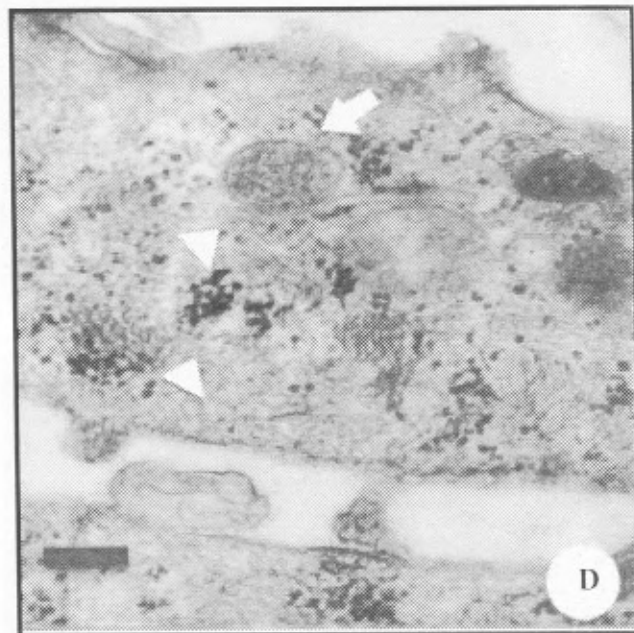
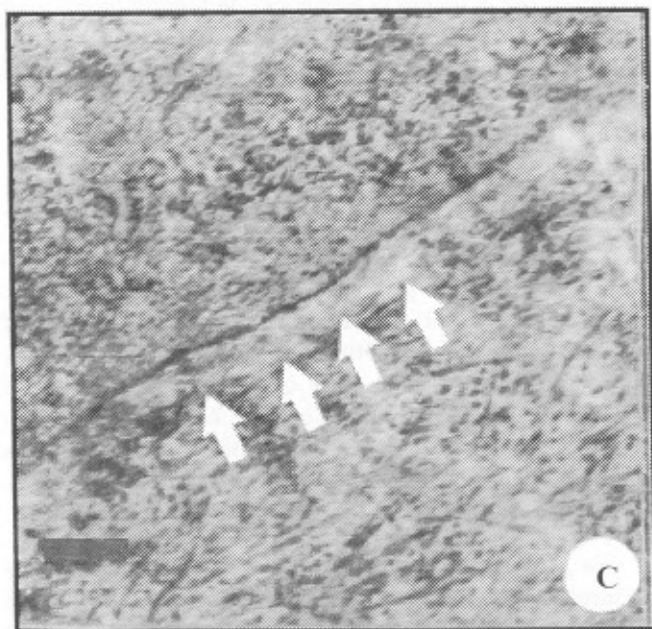
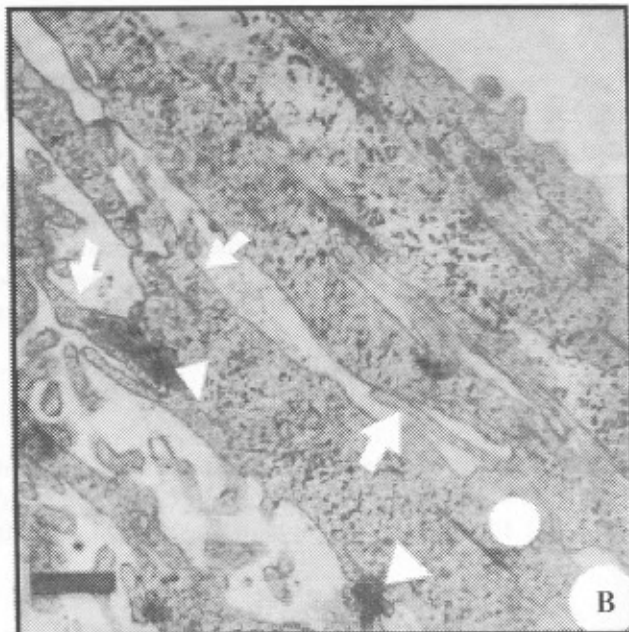
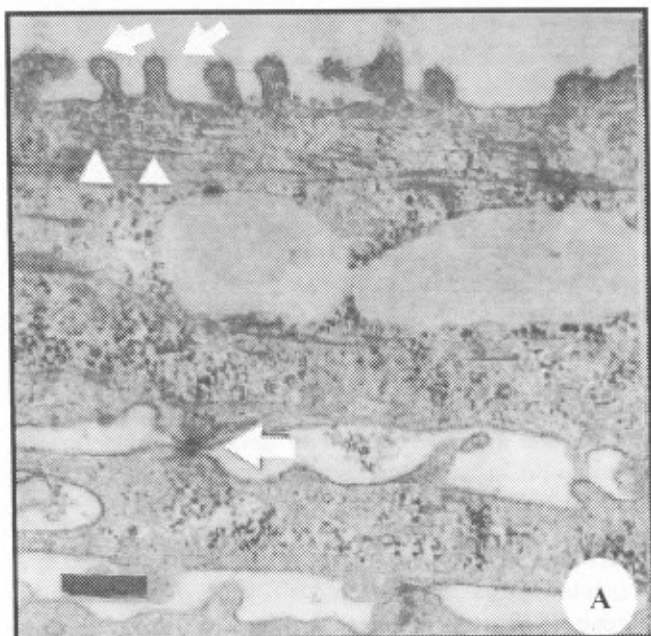


Figura 2. Ultraestructura del epitelio corneal cultivado en lentes de colágeno. **(A)** Microscopia electrónica de transmisión de las células epiteliales superficiales. Microvellosidades en la superficie (flechas pequeñas), las microvellosidades tienen núcleos de actina y los microfilamentos corren paralelos a la membrana celular (cabezas de flecha). Los desmosomas también se indican (flechas grandes). **(B)** M.E.T. Las células adyacentes tienen proyecciones laterales (flechas pequeñas) con uniones GAP (flechas grandes), uniones ocludens (asterisco) y desmosomas (cabezas de flecha). La barra representa una micra **(C)** M.E.T. Una formación focal de membrana basal entre las células basales y el colágeno (flechas pequeñas). **(D)** M.E.T. Elementos intracelulares, mitocondria (flechas pequeña) y gránulos de glucógeno (cabezas de flecha). La barra representa media micra.

La observación de complejos de adhesión tipo ocludens en las células cultivadas confirman un alto grado de especialización de este epitelio y denotan la representación anatómica de la barrera epitelial, demostrada *in vivo* por varios autores (McLaughlin et al., 1985, Kikkawa, 1972). El epitelio reconstituido presentó también las uniones desmosómicas a nivel de las membranas laterales que caracterizan el epitelio normal. Estos complejos de unión proveen estabilidad mecánica a la tracción lateral y mantienen la unión intercelular (Kaufman et al., 1988). En forma ocasional, se observaron uniones comunicantes entre las células, cuya función consiste en permitir el paso de iones y pequeñas moléculas (aminoácidos, monosacáridos y segundos mensajeros)

entre las células a través de arreglos de proteínas de membrana denominadas conexones. Esto significa que el epitelio reconstituido se comporta como un tejido en el que las células presentan una activa interacción funcional. (Hall & Zampighi, 1993).

La presencia de gránulos de glucógeno en las capas basales del epitelio reconstituido *in vitro* se correlaciona *in vivo* con la presencia de estos gránulos en áreas correspondientes de la córnea normal, siendo estas inclusiones indicativas de diferenciación celular. Constituyen una reserva metabólica para ser utilizada en momentos de estrés celular (Kaufman et al., 1988).

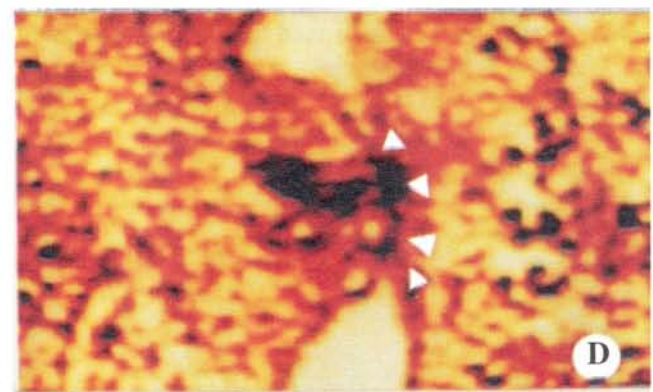
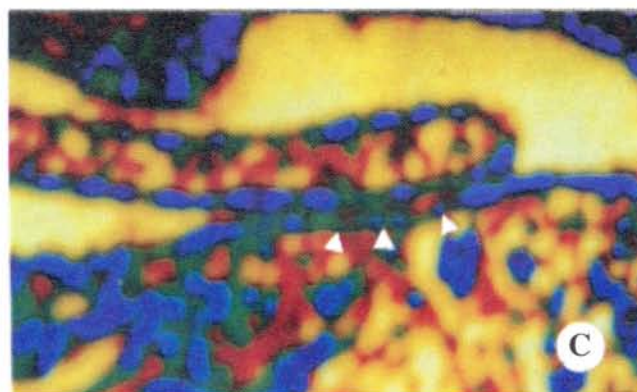
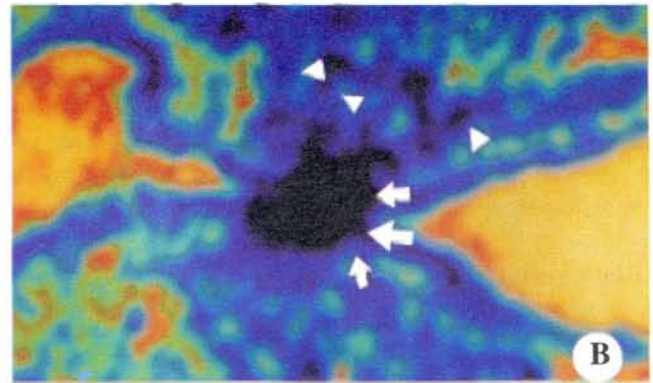
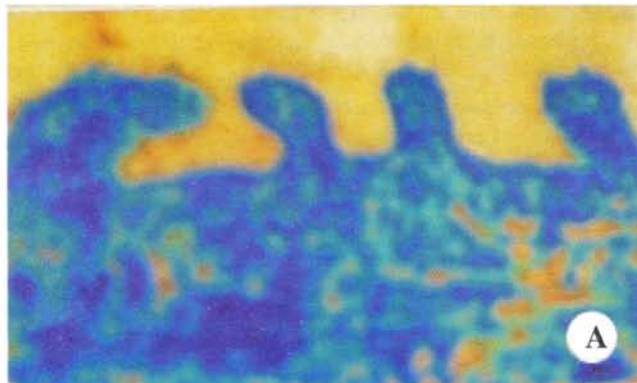


Figura 3. Imágenes de M.E.T. de epitelio corneal reconstruido digitalizadas con asignación de tonos de color a los tonos de grises. (A) Superficie epitelial. Se aprecian con más detalle las microvellosidades con espacios entre ellas y los filamentos de actina paralelos a la superficie. (B) Desmosomas entre dos células cultivadas, se aprecian sus componentes. Nucleo de unión (flecha grande), placas de anclaje (flecha pequeña), fibrillas de anclaje (cabezas de flecha) (C) Uniones GAP, se aprecian zonas de intercambio (cabezas de flecha) entre las dos membranas (D) Uniones Ocludens, se observa fusión de las membranas celulares (cabezas de flecha).

Después de 3 semanas de cultivo fué evidente la formación de la lámina basal. Esta estructura es un elemento fundamental para la organización del epitelio y para su adherencia (Thoft, 1977). Como sucede en los epitelios, en la córnea la lámina basal es esencial para su mantenimiento, permanencia y diferenciación (McLaughlin et al., 1985), y en el éxito de los trasplantes del epitelio corneal (Ohji et al., 1994; Kikkawa 1972; Bell et al., 1981).

En conclusión se demuestra que las células epiteliales corneales humanas cultivadas en matrices de colágeno con la técnica descrita, pueden organizarse de una manera similar al epitelio corneal normal con los elementos celulares y extracelulares. Estos epitelios reconstituídos eventualmente podrían ser utilizados en trasplantes de epitelio corneal *in vivo*, aspecto que no se evaluó en este trabajo. Sería importante determinar la tolerancia inmunológica posterior al injerto de estos epitelios.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Doctor Eduardo Aicady por su generosa colaboración con los medios de cultivo, a la doctora Consuelo de Chávez por su constante apoyo, y a la bióloga Sonia Roa Trujillo por la ayuda técnica.

Bibliografía

- Bell, E., H. P. Ehrlich, D. J. Buttle & T. Naketsuji. 1981. Living tissue formed *in vitro* and accepted as skin equivalent tissue in full thickness. *Science* 211: 1052-1054
- Garcher, C. 1990. Aspects and prospects of human corneal epithelium culture. *Bull. Soc. Fr. Ophthalmol.* 123-126.
- Geggel, H. S., J. Friend & R. A. Thoft. 1985. Collagen gel for ocular surface. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 26: 901-905.

- Hall, J.E., G.A., Zampighi & R.M. Davis. 1993. Progress in cell research : gap junctions. Vol 3. Elsevier Press. New York.
- He, Y.G. & J. P. McCulley. 1991. Growing human corneal epithelium on collagen shield and subsequent transfer to denuded cornea *in vitro*. *Curr. Eye. Res.* 9:851-853.
- Kaufman, H. E., M. McDonald, B. Barron & S. Waltman. 1988. The Cornea . Churchill Livigstone pp., 8-12.
- Kenyon K.R., & S. C. G. Tseng. 1989. Limbal autograft transplantation for ocular surface disorders. *Ophthalmology* 96:709-723.
- Kikkawa Y. 1972. Normal corneal staining with fluorescein. *Exp. Eye Res.* 13: 18-24.
- Lindeberg K., M. Brown, H. Chavez, K. Kenyon & J. Rheinwald. 1993. *In vitro* propagation of human ocular surface epithelial cells for transplantation. *Invest Ophthalmol. Vis. Sci.* 34: 2672-2679.
- McLaughlin B.J., R. B. Cadwell & Y. Sasaky. 1985. Freeze fracture quantitative comparison of rabbit corneal epithelial and endothelial membranes. *Curr Eye Res.* 4: 951-958.
- Nichols B, C.R. Dawson & B. Togni. 1983. Surface features of the conjunctiva and cornea. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 24: 570-574.
- Ohji M., N. Sundar Raj, J. Hasell & R. Thoft. 1994. Basement membrane syntesis by human corneal epithelial cells *in vitro*. *Invest. Ophtalmol. Vis. Sci.* 35: 479-485.
- Pfister R. & M. Rennen. 1977. The Histopatology of experimental dry spots and dellen in the rabbit cornea: a light microscopy and scanning and transmission electron microscopy study. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 16: 1025-1030.
- Shermer A., S. Galvin & T.T. Sun. 1986. Diferentiation related expression of a major 64 Kd corneal keratin *in vivo* and *in culture* suggests limbal localitation of corneal stem cells. *J. Cell Biol.* 103: 49-52.
- Shingleton B. J., P.S. Hersh & K. R. Kenyon. 1991. Eye trauma. Mosby-Year Book:79-93.
- Thoft R A. 1977. Conjuntival transplantation. *Arch Ophthalmol.* 16:14-20.
- Thoft R.A. & J. Friend. 1985. Biochemical trasformation of regenerating ocular surface epithelium. *Invest. Ophthalmol. Vis Sci.* 26:425-423.

PALABRAS PRONUNCIADAS POR EL PRESIDENTE DE LA ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES, DR. LUIS EDUARDO MORA-OSEJO, DURANTE LA SESIÓN SOLEMNE ESTATUTARIA REALIZADA EL 19 DE AGOSTO DE 1998

Ante todo, permítaseme presentar, en nombre de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, el más cordial saludo, a quienes nos acompañan en este acto, con el cual la Academia celebra un nuevo aniversario de su fundación. Todas y cada una de las personas que nos acompañan en este acto, contribuyen a relevar su trascendencia en la vida de la Academia.

Permítaseme, asimismo, expresar, en nombre de quienes hemos recibido el alto honor de ser elegidos como Miembros de la Junta Directiva para el período estatutario que hoy comienza, nuestro más reconocido agradecimiento, por el renovado voto de confianza que ha tenido a bien otorgarnos el plenum de la Academia.

El honor con el cual hemos sido distinguidos, reafirma nuestro compromiso y voluntad de trabajar de consuno, tras el objetivo de engrandecer cada día la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales mediante el fortalecimiento de sus programas, entre ellos, el de contribuir a construir, en nuestro país, una mayor capacidad científica y, el de trabajar, con todo empeño y persistencia, en el mejoramiento de la calidad de la enseñanza de la Ciencia, mediante aportes dirigidos a elevar el nivel en la formación científica de los futuros Maestros. Tarea que habrá de complementarse mediante la elaboración de textos y materiales didácticos, en cuyos contenidos se hagan referencia especial a la realidad natural tropical de Colombia; de suyo tan singular y, sobre todo, tan diferente de la naturaleza de la zona templada de la tierra.

Pero para que los esfuerzos que hagamos para alcanzar estas metas puedan desenvolverse dentro del marco de un sistema educativo que propicie el pensar, el reflexionar, el interpretar y, con ello, el saber inteligente y

crítico, será necesario que el Estado, en estrecha colaboración con las entidades educacionales y culturales del país, entre ellas las Academias que conforman el Colegio Máximo, defina con claridad los objetivos, políticas y estrategias de un nuevo modelo general de Educación que busque el mejoramiento de calidad en todas las líneas y niveles, modelo que debe ser adoptado y puesto en práctica. Lo más pronto, como lo vienen reclamando vastos sectores de la sociedad, desde hace ya varias décadas.

En lo que concierne a los aspectos culturales y en especial, a la convivencia ciudadana, pienso que quizás haya que comenzar por adoptar como un gran propósito común, el fortalecimiento de aquellos rasgos y elementos culturales que configuran nuestra identidad nacional. Así, se fortalecerá la conciencia de pertenecer todos a una misma nación, a una misma patria, no simplemente en razón del lugar de nacimiento, sino justamente por compartir, esa misma identidad cultural.

Pienso que así se promovería también la adopción y la práctica de los valores compartidos por todos los colombianos. Desde luego, no se trataría de menguar y menos aún de suprimir la rica diversidad cultural, propia de nuestro país multiétnico y con su población asentada en uno de los medios geográficos más diversos y complejos del planeta; si no de resaltar, no obstante la diversidad cultural, regional y étnica, aquello que nos une, aquello que nos es propio, en cuanto proviene de un mismo proceso histórico, social y político que dio origen a nuestra nación. Por lo mismo serán esos mismos valores culturales comunes los que nos permitan avanzar solidariamente y con mayor decisión hacia aquellas metas cuyo logro implique el beneficio común.

Pero para que esto no sea un simple enunciado retórico debe estar apoyado por el mejoramiento de la calidad de la educación, tarea prioritaria, no solamente del Estado, sino de toda la sociedad. Tenemos que comenzar por rescatar la figura del maestro, devolviéndole el puesto de preeminencia y el aprecio que otrora le concedía la sociedad, lo mismo al Maestro de la escuela de la pequeña aldea, como al connotado Maestro Universitario. Con razón, en tiempos no muy lejanos, nuestra sociedad solía conceder espontáneamente este título a figuras sobresalientes de los quehaceres educativo, humanístico, literario, científico y artístico, a quienes consideraba paradigmas del alma nacional.

La otra gran tarea que la Academia Colombiana de Ciencias, se propone intensificar es la de contribuir a fortalecer, en nuestro país, la capacidad científica que como es obvio, guarda estrecha relación con la de incrementar nuestros esfuerzos tras el objetivo de mejorar la calidad de la educación. En cuanto que la formación científica de las nuevas promociones de investigadores

supone superar la simple acumulación de información. Como es de todos bien sabido, para alcanzar el saber inteligente y tras ello la creatividad, es necesario complementar y enriquecer la información mediante la interrelación de sus contenidos, de acuerdo con el asunto o problema por dilucidar, a través de la formulación de síntesis conceptuales e hipótesis por comprobar. No podemos olvidar que es el saber crítico el que facilita la captación de fenómenos aún por explicar o problemas por resolver, mediante la formulación de hipótesis, sometibles a la prueba experimental o a la cuidadosa observación y al análisis objetivo de la realidad.

Pero, nuevamente, para que lo expuesto no sea un enunciado teórico y retórico, es necesario comenzar por preparar los Maestros, en cada una de las regiones del país, en las diferentes disciplinas del saber y para los distintos niveles del sistema educativo; de tal modo que puedan llevar a la práctica las orientaciones enunciadas apoyados en su propio saber y experiencia.



Los miembros de la Junta Directiva elegida para el período académico 1998-2000 toman posesión de sus cargos durante la sesión solemne estatutaria realizada el miércoles 19 de agosto. De izquierda a derecha: José Lozano, Secretario, Moisés Wasserman, Vicepresidente, Víctor Albis, Director de la Biblioteca, Luis E. Mora, Presidente, Luis Duque Gómez, Decano de la Academia, Hernando Groot, miembro honorario y Vicepresidente saliente, Santiago Díaz, Director de la Revista e Inés Bernal de Ramírez, Tesorera.

Me he detenido en estas consideraciones, no solamente por cuanto pienso que ellas tienen plena vigencia en la situación por la cual atraviesa el país, sino también, por cuanto dan desarrollo a los enunciados; que en su momento inspiraron a los Fundadores de la Academia, hace ya cerca de 70 años, cuando prospectaban los objetivos y las tareas principales de la Institución.

Por lo mismo quisiera hoy, renovar mi invitación a todos los Miembros de la Academia, Honorarios, Numerarios, Correspondientes y Supernumerarios, a mantener firme nuestro compromiso de participar de una u otra manera, en el empeño de convertir tales principios en realidades, a favor de la juventud, de las nuevas promociones de investigadores colombianos y, en fin, del fortalecimiento de la capacidad científica de nuestro país.

No quisiera concluir estas palabras, sin antes recordar que en el ámbito mundial, es cada vez más firme la convicción y más amplio el consenso, de considerar al conocimiento científico, como factor decisivo, en la solución de los problemas que más afectan a la humanidad.

Asimismo, existe acuerdo en que es con ayuda del conocimiento científico como será posible, algún día, recuperar el equilibrio de los sistemas naturales e intentar remediar los estragos de la crisis ambiental, así como los problemas derivados de la escasez alimentaria y del vertiginoso incremento de la población. A tal punto, que será

la capacidad científica y el nivel de los conocimientos que alcance a desarrollar cada nación, el factor decisivo para su supervivencia y, sobre todo, para lograr un desarrollo conforme con la dignidad de la existencia humana y que preserve, al mismo tiempo, la armonía con la naturaleza.

Desde luego, para Colombia, con un medio natural de los más complejos y frágiles de la tierra, ello implica, un gran desafío, del cual deberían tener clara conciencia, las instancias decisorias del Estado y sectores cada vez más amplios de la población y, en tal medida, lograr que tales instancias estatales establezcan y comiencen a ejecutar pronto políticas, programas, proyectos y acciones estables, persistentes, dirigidas al mejoramiento de la calidad de la educación y a la construcción de una sólida capacidad científica.

La Academia Colombiana de Ciencias, además de cumplir con las tareas a las que ya he hecho referencia, promoverá, en la medida de sus posibilidades, los proyectos de investigación científica que adelanten sus miembros, y continuará fortaleciendo sus programas de difusión del conocimiento a través de su Revista, de sus cuatro Colecciones de libros, de la Gaceta de la Academia y, en fin, de todos los medios que estuvieren a su alcance, en función de enriquecer su labor de difusión del conocimiento que se iniciara con la publicación del primer Número de su Revista, su órgano de difusión y expresión tradicional, hace ya más de sesenta y dos años.

ACTO CELEBRADO EN LA SEDE DE LA ACADEMIA EN HOMENAJE AL INSTITUTO NACIONAL DE SALUD, CON MOTIVO DE CELEBRAR EL OCTAGÉSIMO ANIVERSARIO DE SU FUNDACIÓN:

En nombre de la Academia Colombiana de Ciencias me es muy grato presentar el más cordial saludo a quienes hoy nos acompañan y participan en esta reunión, en la cual se rinde justo y merecido homenaje al Instituto Nacional de Salud, con motivo de celebrar, en este año, el octagésimo aniversario de su constitución como entidad oficial, dedicada a la ampliación del conocimiento científico en el campo de las Ciencias médicas y afines y contribuir así al fortalecimiento del Sistema Nacional de Salud.

Con verdadera complacencia el Plenum de la Academia Colombiana de Ciencias se une a este bien merecido

homenaje de reconocimiento a la eficiente, y fecunda labor científica cumplida por el Instituto Nacional de Salud en beneficio de toda la nación, a lo largo de su existencia meritoria.

No podía ser de otra manera estrechos nexos que se remontan al despertar de las Ciencias Experimentales modernas, en nuestro país, unen a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales con el Instituto Nacional de Salud y, en general, con las instituciones colombianas dedicadas a la investigación en los campos de las Ciencias de la Salud.

Hoy podemos decir que de no haber existido tales nexos, cuán difícil hubiese sido crear y consolidar espacios institucionales para el cultivo de la Ciencia Moderna en nuestro medio. En tal medida, la fundación de la Sociedad de Medicina y Ciencias Naturales, en el año de 1873, marca un hito en el difícil proceso de crear en nuestro país facilidades institucionales para el cultivo de las Ciencias de la Salud y de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y su incorporación a nuestro sistema educativo.

Fue la Sociedad de Medicina y Ciencias Naturales antecesora de la Academia Nacional de Medicina y de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, y en cierta medida, fue también la precursora de los estudios científicos sobre las enfermedades tropicales en Colombia.

Entre las distinguidas personalidades que impulsaron la creación de esta Sociedad y el desarrollo de las Ciencias Naturales y de la Salud en las décadas de los años 70 y 80 del siglo XIX, considero justo destacar, entre otros médicos y naturalistas ilustres, al distinguido médico y científico, Luis Cuervo Márquez, autor, entre otras, de la obra "La Fiebre Amarilla en el interior de Colombia". Cuervo Márquez se vinculó a la Sociedad de Medicina y Ciencias Naturales en 1886, presidió la Academia Nacional de Medicina de 1912 a 1914 y fue uno de los promotores y miembros fundadores de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, al promediar la década de los años treinta del presente siglo.

Dentro de este mismo contexto y motivado por la celebración de este acto de homenaje y reconocimiento a la fecunda labor del Instituto Nacional de Salud en sus 80 años de existencia al servicio de Colombia, se asoman a mi memoria los nombres de figuras ilustres consagradas a la investigación científica, en diferentes disciplinas de las Ciencias de la Salud; entre quienes figuran Miembros Fundadores y Numerarios de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos vinculados también de una u otra forma, al Instituto Nacional de Salud y cuya obra científica, realizada a lo largo de su meritoria existencia, es de todos los presentes bien conocida, en razón de sus excepcionales méritos. Me refiero a Federico Lleras Acosta; a Calixto Torres Umaña, a Luis Patiño Camargo, a Luis López de Mesa, a Augusto Gast Galvis, a Ernesto Osorno Mesa, entre otros, distinguidísimos miembros de esta Academia, todos ya fallecidos.

Pero en esta significativa ocasión, cuando se celebra la ininterrumpida y fecunda labor del Instituto Nacional de Salud, a lo largo de 80 años, de modo alguno puedo dejar de mencionar a quienes comparten con nosotros las

preocupaciones de la hora presente y contribuyen, de una u otra manera, al fortalecimiento del Instituto Nacional de Salud y de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

A tal propósito, permítaseme destacar los nombres de Hernando Groot Liévano, Vice-presidente y Miembro Honorario de la Academia Colombiana de Ciencias, Secretario Perpetuo de la Academia Nacional de Medicina; Moisés Wasserman, Director del Instituto Nacional de Salud, destacado investigador, reconocido nacional e internacionalmente; Profesor Titular de la Universidad Nacional, Miembro de Número de la Academia Colombiana de Ciencias; Gabriel Toro González, Miembro de Número de nuestra entidad y de la Academia Nacional de Medicina, reconocido investigador, Profesor Emérito y Maestro Universitario de la Universidad Nacional. Todos destacados científicos que en razón del alcance de sus contribuciones han merecido el reconocimiento nacional e internacional.

A todos ellos, en nombre de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, quisiera asimismo agradecerles, en la oportunidad de este acto de homenaje al Instituto Nacional de Salud, el mismo que al celebrarse en la sede de la Academia Colombiana de Ciencias, de suyo reconstruye y proclama los antiguos nexos que de tiempo atrás unen e integran las Ciencias de la Salud y las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Cuán positivas han sido las contribuciones de estas distinguidas personalidades, a favor del fortalecimiento de las Ciencias, de su incorporación definitiva al quehacer cultural de la nación y a la formación científica de las futuras generaciones.

Por lo mismo, quisiera hoy concluir, expresando el deseo porque se hagan esfuerzos a favor del acercamiento de los científicos que laboran en diferentes disciplinas, inspirados en nuestra propia historia. Todo bajo el convencimiento de que el trabajo interdisciplinario será cada vez más necesario para abordar y resolver los problemas de nuestra compleja realidad, los mismos que a la vez inciden en todos los campos del conocimiento.

En nombre de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, permítanme expresar con ocasión de celebrar el Instituto Nacional de Salud, su octogésimo aniversario, mis más efusivas felicitaciones a sus Directivas, al personal científico, técnico y administrativo y a todas las personas que de una u otra manera, han contribuido a su desarrollo para bien de Colombia.

INFORME DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS POR LA CORPORACION DURANTE EL AÑO ACADEMICO 1997-1998

A continuación se resumen las actividades adelantadas por la Corporación durante el año académico estatutario comprendido entre el 19 de agosto de 1997 y el 18 de agosto de 1998.

SESIONES

a- Junta Directiva

La Junta Directiva sesionó en once oportunidades, generalmente, los primeros miércoles de cada mes. En estas reuniones tomó las decisiones necesarias para el funcionamiento y orientación de las políticas de la Academia, decisiones que tuvieron que ver, entre otros, con temas tales como publicaciones, autorización de firmas de contratos, participación en eventos y realización de los mismos.

La Junta había autorizado al Presidente y al Secretario a desarrollar las actividades necesarias para lograr la creación del Instituto Colombiano de Alta Montaña. A esta iniciativa han respondido positivamente el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Ingeominas, Colciencias, la Dirección Nacional para la Prevención de Desastres y la Universidad Nacional.

Se firmaron los siguientes contratos:

El 20 de octubre/97 se firmó el contrato de asesoría y servicios con el Ministerio de Educación Nacional por un valor de \$232.355.000.00 correspondiente a 1997, incluidos 23.994.149 que fueron transferidos al Colegio Máximo de las Academias y al Patronato de Artes y Ciencias mediante el contrato No. 01 del 4 de diciembre de 1997.

Con la GTZ, se firmó un convenio para llevar a cabo el proyecto de "Propuestas de medidas de mitigación del efecto causado por gases que producen efecto de invernadero". El proyecto se inició en el mes de enero y finalizará en diciembre de 1998. El investigador principal es el académico de número Don Humberto Rodríguez.

Con la Universidad Nacional se firmó el contrato 095/97, por valor de \$550.000.000.00 pesos, para el manejo de fondos de Vicerrectoría Académica. También con la Universidad Nacional, en mayo/98 se firmó el contrato, por valor de \$3.623.900.000.00 pesos, que tiene por objeto la ejecución general de los proyectos "Adquisición y Renovación del Equipo y Material Educativo", "Adqui-

sición y Renovación Bibliográfica y Documental" "Comunicaciones y Medios" - Unimedios "Mejoramiento y Desarrollo de la capacidad de Investigación" "Mejoramiento, Modernización y Actualización Académica" "Modernización Administrativa y Desarrollo Institucional y Producción y Distribución Bibliográfica - Unibiblos".

Se prorrogaron los contratos del servidor virtual en los Estados Unidos y el mantenimiento de la página electrónica de la Academia.

Se firmó un contrato para desarrollar un motor de búsqueda para la implementación de consultas de la Biblioteca a través de INTERNET y otro para la adecuación y mantenimiento de los computadores.

Se firmaron contratos con la ACAC, APICE y ACOVEZ en los que la Academia se compromete a crear y mantener la página electrónica, en su servidor virtual, para cada una de estas instituciones.

b- Sesiones Ordinarias

En la reunión del 8 de julio de 1998 se eligieron los miembros de la Junta Directiva para el periodo 1998-2000, y en la reunión del 10 de diciembre se eligieron cuatro nuevos miembros correspondientes.

En las restantes ocho reuniones ordinarias celebradas los terceros miércoles de cada mes, entre septiembre de 1997 y junio de 1998, además de examinar los temas académicos del momento, se programaron las siguientes conferencias:

Septiembre 17: Don Santiago Díaz Piedrahita "Aspectos biográficos de Francisco José de Caldas"

Octubre 15: Don Daniel Pabón, subdirector del IDEAM, "El Niño y su efecto en Colombia"

Noviembre 19: Don Luis Eduardo Mora Osejo "Formación para un medio ambiente tropical".

Febrero 18: Don José A. Lozano "Formación para un medio ambiente tropical- segunda parte- esquema de capacitación.

Marzo 18: Don Ovidio Simbaqueva del IDEAM "Índices de radiación ultravioleta en Colombia y concentración de ozono en la columna atmosférica".

Abril 15: Don Hernando Dueñas "Paleoclimas en la cuenca del bajo Magdalena desde el año 8000 AP sobre la base de los registros de polen y niveles lacustres".

Mayo 20: Don Jorge Reynolds "Nuevas tecnologías en el mar"

Junio 17: Don Cristian Samper, Director Instituto von Humbolt "La Biología de la extinción".

c- Sesiones Especiales

Durante la Sesión Solemne Estatutaria del 19 de agosto tomaron posesión como Miembros Honorarios Don Luis Duque Gómez y Don Hernando Groot Liévano, y el estudio de fondo estuvo a cargo de Don Jorge Arias de Greiff quien dictó la conferencia "La nomenclatura del nuevo sistema solar".

En sendas sesiones especiales tomaron posesión seis nuevos académicos correspondientes, quienes presentaron los respectivos trabajos científicos preparados especialmente para la ocasión:

Septiembre 10: Don Luis Alejandro Barrera "La enfermedad morquio, un modelo para el estudio de la estructura y función de las proteínas y los genes en los errores innatos del metabolismo".

Octubre 8: Don José F. Escobar "Algunos problemas isoperimétricos"

Octubre 22: Don Dimas Malagón "El recurso suelo (tierra) en Colombia: Factores y procesos que lo afectan y sus consecuencias".

Abril 22: Don Gerardo Gordillo "Conversión fotovoltaica de la energía solar".

Mayo 27: Doña Angela María Guzmán "Optica atómica. La Optica del 2000?".

Junio 24: Don Jairo Antonio Charris Castañeda "Algunas Observaciones sobre la arco-conexidad local de compactificaciones por un número infinito de puntos".

El Colegio Máximo de las Academias continuó la celebración de reuniones de sus Juntas Directivas. Estas se llevan a cabo, cada mes, en la sede de las diferentes corporaciones que lo constituyen. El presidente del Colegio Máximo, Don Jaime Posada, está promoviendo llevar a cabo, con la colaboración de todas las academias, lo que ha llamado la "Expedición de la Ciencia y la Cultura".

PARTICIPACION EN ACTIVIDADES NACIONALES E INTERNACIONALES

La Academia Colombiana de Ciencias continuó su afiliación a y participación en el Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU), el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP), la Federación Latinoamericana de Academias de Ciencias (FELAC), el Comité sobre Ciencia y Tecnología en países en Desarrollo y Red Internacional de Biociencias (COSTED-IBN), el Comité Científico de Biotecnología (COBIOTECH), la Academia de Ciencias del Tercer Mundo (TWAS), la Red del Sistema de Organizaciones de Ciencias del Tercer Mundo (TWONSO), y el Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP). La Academia solicitó su ingreso a la Unión Internacional para la Investigación del Cuaternario (INQUA) y a la Fundación Internacional para la Ciencia (IFS). Estas dos últimas contestaron favorablemente, pero la aceptación solamente será oficial cuando se celebren las Asambleas Generales respectivas durante el año de 1999.

La Academia presentó su candidatura para ser sede de la reunión del Interacademy Panel que se llevará a cabo en el año 2.000. El Interacademy Panel evaluó los diferentes ofrecimientos y finalmente decidió celebrar esta reunión en Tokio, Japón.

La Academia es miembro de la Junta Directiva del Instituto Colombiano de Cultura Hispánica, la representa Don Santiago Díaz. También es miembro del Consejo Directivo de la Red de Formación Ambiental, la representa Don José A. Lozano.

Fue invitada a participar en el grupo Institucional Colombia UNISPACE II y quedó adscrita al primer grupo de este Comité creado por el Ministerio de Relaciones Exteriores. Está representada en este Comité por Don Humberto Rodríguez.

Durante este periodo varios miembros participaron en su carácter de académicos o de representantes oficiales de la Academia en los siguientes eventos internacionales y nacionales:

Don Luis Eduardo Mora participó en la VI Asamblea General de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo (TWAS) que tuvo como tema central "la Ciencia para la América Latina y el Caribe" y en la reunión de la Red del Sistema de Organizaciones de Ciencias del Tercer Mundo (TWONSO) que tuvieron lugar en Río de Janeiro, entre el 5 y el 12 de septiembre.

Don José María Rincón asistió a la 9ª "International Conference on Coal Science" que se celebró en Essen.

El grupo que dirige el académico Rincón presentó varios trabajos.

Don Gonzalo Correal participó en III Congreso Mundial de Estudios sobre Momias. En Tarapacá - Arica-Chile.

Don Gerardo Pérez participó en la Decimoséptima Reunión Internacional sobre Lectinas (INTERLEC 17) que se realizó en Wurzburg (Alemania).

Don Alberto Cadena participó en el "Seventh International Theriological Congress", realizado en Acapulco, México, entre el 6 y el 11 de septiembre.

Don Humberto Rodríguez y Don Fabio González participaron en el "Seminario-Taller sobre Estudios de Mitigación en América Latina" que se realizó en Quito-Ecuador.

También asistieron al "National Assessment Results of Climate Change Impacts and Responses" en Costa Rica y visitaron varios centros de investigación en Europa, todo esto dentro de las actividades propias del Proyecto sobre Opciones de Mitigación, financiado por la GTZ.

Doña Margarita Perea participó en el Congreso "Cellular Biology and Biotechnology, Including Mutation Techniques for Creation of New Useful Banana Genotypes", realizado en Kuala Lumpur, Malasya y en el "IX Congreso Internacional Sobre Biotecnología de Plantas en la ciudad de Jerusalem, del 14 al 19 de junio.

Por invitación de la Universidad Nacional, Don Luis Eduardo Mora presentó en Manizales una propuesta de creación de un Instituto de Biología Tropical Andina que sirva de soporte a una carrera universitaria caracterizada por la integración de la investigación y la docencia y la relación entre el cronograma de actividades y el currículo.

También participó en una serie de reuniones promovidas por el Departamento de Planeación Nacional y el Ministerio de Agricultura sobre aprovechamiento del campo y apoyo al desarrollo del mismo, que tuvieron como punto culminante el Seminario sobre "El papel estratégico del sector rural en el desarrollo de América Latina" que se realizó en Cartagena entre el 8 y el 10 de julio.

Así mismo participó en Santa Marta en el Foro sobre Desarrollo Sostenible de la Sierra Nevada, donde sustentó la tesis del concepto de la integralidad y asistió, en Medellín a la instalación del Observatorio de Ciencia y Tecnología en el cual la Academia participará como Institución Asociada.

Don Luis Eduardo Mora y Don José A. Lozano asistieron al tercer Seminario Nacional sobre "Universidad y Me-

dio Ambiente" organizado por el Ministerio del Medio Ambiente y la Red de Formación Ambiental. Presentaron la ponencia: "Formación para un medio ambiente tropical". También participaron en los talleres convocados por la Sociedad Geográfica para estudiar el tema de las Geociencias.

Don Víctor Albis asistió al V Encuentro Regional de matemáticas en Popayán.

Seminarios

En desarrollo del Programa de Mitigación se realizaron dos seminarios - taller sobre "Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Colombia y Opciones de Mitigación". El primero tuvo lugar en el mes de Abril y el segundo en el mes de Julio. El primero fue de carácter general y el segundo se restringió al tema de Energía

COMISIONES Y GRUPOS

Dentro del Grupo de Ciencia Teórica se dictaron las siguientes conferencias:

Agosto 21: José Vicente Rubio "Pedagogía del Caos"

Septiembre 18: Octavio Guzmán "¿Existen grados de libertad selectivas en los sistemas físicos complejos?"

Octubre 16: Guillermo Páramo "Mito, complejidad y Simplificación".

Noviembre 20: Camilo Floréz "Los sistemas microbianos y la complejidad"

Diciembre 11: Mesa Redonda sobre Complejidad y Ciencia, moderadores Luis Eduardo Mora Osejo, Guillermo Páramo y Alicia Guerrero de Mesa.

Febrero 12 Don Fernando Zalamea "Relevancia de Peirce en las Ciencias Naturales"

Junio 2: Juan Ramón Lacadena "Manipulación genética y bioética"

En este año se creó el grupo de Bioinformática que es coordinado por el Dr. Luis Alejandro Barrera.

Por solicitud del Ministerio del Medio Ambiente, la Academia, con base en los informes preparados por la Comisión Permanente de Parques Naturales emitió concepto sobre la propuesta para la redelimitación del Parque Nacional Natural Cordillera de los Picachos.

Por solicitud del Director del IDEAM, Dr. Pablo Leyva, el Comité de Cambio Climático de la Academia

emitió concepto sobre el Inventario preliminar de Gases de Efecto Invernadero preparado por el IDEAM.

En nombre de la Academia, el señor Presidente dirigió una carta al Ministro del Medio Ambiente, expresando la preocupación de la Academia por la posibilidad de que se autorizara a la compañía BioAndes para usar la biodiversidad de los parques naturales nacionales. Posteriormente también llamó la atención del Sr. Ministro sobre la exportación de anuros que producen alcaloides de utilidad farmacéutica a Europa y Estados Unidos.

La Comisión para el Fomento de la Investigación Científica viene trabajando en varios frentes entre los que se destacan, primero, un análisis del perfil de la Academia, con el objeto de determinar las áreas en que los académicos tienen sus fortalezas, con el fin de organizar grupos y programas alrededor de estas áreas y segundo la organización, en colaboración con el IDEA de la Universidad Nacional, de un Seminario-taller sobre metodología de la investigación en el área de medio ambiente.

La Comisión para el Mejoramiento de la Enseñanza ha orientado sus esfuerzos hacia la creación y activación de un "Comité Nacional para la Construcción de la Capacidad Científica", que le permitirá ofrecer soluciones para nuestro país e integrarse al programa mundial "Capacity Building in Science", promovido por la ICSU.

PREMIOS

Con el objetivo de premiar la consagración de una vida a la investigación científica y de promover las vocaciones de jóvenes científicos, se convocó a concurso nacional para los premios de la Academia.

En la Sesión Solemne, realizada el 19 de agosto, se entregó el Premio a la Obra Integral de un Científico, correspondiente al año de 1997, a Don Rubén Antonio Vargas Zapata, físico de la Universidad del Valle y el Premio Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Academia de Ciencias del Tercer Mundo (ACCEFYN-TWAS) para motivar a jóvenes investigadores, en el área de biología, a Doña Gladys Estella Montoya por su trabajo presentado en el artículo: "The Evolution of *Plasmodium* *ssrRNA* genes: The *ssrRNA* genes from *Plasmodium knowlesi*".

La Academia presentó candidatos para los premios de TWAS y TWONSO así:

Química: José María Rincón

Física: Pedro Prieto Pulido

Ciencias Médicas básicas: Angela Restrepo Moreno

Agricultura: (TWONSO) Marco Quijano

También presentó la candidatura de Don Humberto Rodríguez al Premio Australia 1999 en el campo de Ciencia y Tecnología de la Energía.

Distinciones a académicos

Varios académicos fueron objeto de distinciones, se mencionan a continuación algunas de ellas:

El 2 de octubre, Don Luis Eduardo Mora, presidente de la Academia, recibió el "Premio a la Vida y Obra de un Científico" versión 1997, otorgado por la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia (ACAC). Don Luis Eduardo Mora fue presentado al concurso por la Universidad Nacional. Posteriormente fue condecorado por la Universidad de Nariño y recibió un homenaje especial de la Alcaldía de Pasto y la Gobernación del Departamento.

En la misma sesión del 2 de octubre, Don Moisés Wasserman recibió el galardón de "Investigador de Excelencia" por parte de la ACAC.

Don Hernando Groot, vicepresidente de la Academia, recibió la "Medalla Donald Mackay" 1997, por trabajo sobresaliente en salud tropical. Esta medalla es entregada alternativamente por la Sociedad Real de Medicina Tropical e Higiene (RSTMH) y la Sociedad Americana Medicina Tropical e Higiene (ASTMH).

La Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional creó el premio Juan Herkrarth, en tributo a nuestro miembro honorario, para profesores asociados y titulares que cumplan 25 años al servicio de la Universidad.

Trece académicos recibieron sendos premios durante la celebración del día de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional.

BIBLIOTECA LUIS LOPEZ DE MESA

La Academia mantiene su biblioteca "Luis López de Mesa" cuyos volúmenes se incrementan principalmente a través del canje que recibe por las publicaciones propias. La Biblioteca cuenta con 610 títulos de publicaciones periódicas de las cuales 156 están activas.

Además la Academia continúa suscrita a doce títulos de revistas.

En este año se adquirieron más de 100 nuevos libros, la mayoría por donación o canje. Se completó la colección Flora Neotrópica, publicada para la Organización Flora Neotropica por el New York Botanical Garden.

Actualmente se tiene sistematizado el canje en un 100% y el registro de libros en un 30%. Este registro se actualiza a medida que los nuevos títulos van llegando a la Biblioteca.

PUBLICACIONES

La Academia publicó y distribuyó los números 81, 82 y 83 de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, que desde el año calendario de 1998 se publica trimestralmente. Esta se envía a 432 instituciones, 339 de ellas fuera del país.

Se encuentra en proceso de elaboración el Diccionario Biográfico de la Academia de Ciencias.

La Academia participó en la Feria Internacional del Libro que tuvo lugar en Santafé de Bogotá entre el 22 de abril y el 4 de mayo. Expuso sus publicaciones en el área contratada por la Fundación de Ecosistemas Andinos (ECOAN).

La Academia publicó y distribuyó tres libros en dos de sus cuatro colecciones así:

Colección Enrique Pérez Arbeláez, sobre historia de la ciencia.

“La Investigación de las dolencias infecciosas en la historia”, de Arturo Romero Beltrán

Está por publicar el libro “Historia del Comité Interamericano para Educación Matemática”

Colección Julio Carrizosa Valenzuela de Textos universitarios.

“Mecánica Newtoniana”, de Carlos López Tascón.

Reedición del libro “Análisis de Alimentos” de doña Inés Bernal de Ramírez.

Publicaciones en medio electrónico

En la página electrónica de la Academia se encuentran la Revista, la Gaceta y tres libros en versión electrónica. Hay una página para los servicios de Biblioteca, sin contar todavía con un motor de búsqueda. Se han creado páginas para los académicos, los grupos de trabajo y proyectos de investigación, incluyendo el grupo de Neurociencias del Hospital Militar.

El Académico de Número Don Víctor Albis, es el responsable de las publicaciones en medio electrónico.

SEDE DE LA ACADEMIA

Con el fin de trasladar la Biblioteca, que continúa funcionando en el tercer piso del edificio de la Academia de la Lengua, la Academia de Ciencias adquirió el inmueble vecino (transversal 27 No. 39ªA-79) al que ocupa su sede administrativa. Ha habido problemas con la autorización para adecuar este inmueble para alojar la biblioteca Luis López de Mesa, que han hecho necesario aplazar la iniciación de las obras y la reunificación de nuestra sede.

José A. Lozano Iriarte
Secretario

ACTA DEL PREMIO ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES A LA OBRA INTEGRAL DE UN CIENTÍFICO CONVOCATORIA CORRESPONDIENTE A 1998

El discernir el premio a la Obra Integral de un Científico es un compromiso de inigualable monta para cualquier jurado cuando a él se presentan personas de tantos méritos y ejecutorias como los que tuvimos que considerar en esta oportunidad por honrosa designación que nos hizo el Sr. Presidente de la Academia.

La tarea fue punto menos que imposible, razón por la cual tuvimos que reunirnos en dos oportunidades y revisar cuidadosamente tanto las excelentes hojas de vida como los trabajos publicados *in extenso* que tuvimos a nuestra disposición.



El presidente hace entrega del "Premio a la obra integral de un científico", convocatoria de 1998. Recibe el galardón la Dra. Margarita Perea D.

Guiaron nuestra discusión varios criterios: el primero fue la definición de un científico adoptada por el jurado de los premios de 1995 y que reza: "*Es aquel que con devoción, con perseverancia y capacidad, aplicando metodología rigurosa, con sana autocrítica y con sincera modestia dedica su vida a la búsqueda de la verdad y logra enriquecer el conocimiento preexistente de una manera ejemplar e inobjetable*". A este criterio añadimos los siguientes: el galardonado debe ser alguien con una trayectoria de toda una vida y no quien todavía se encuentra en plena y activa producción científica que augura un porvenir aún más brillante que la actividad acumulada hasta ahora; debe haber creado una escuela de pensamiento en un área específica del conocimiento en la que se hayan formado estudiantes que hayan consolidado su obra a través de sus propios trabajos y ejecutorias y no sólo quien como profesor haya tenido estudiantes de una materia de pre o posgrado; debe haber publicado sus hallazgos en revistas de circulación nacional e internacional y haber sido reconocido por sus pares colombianos y extranjeros y, finalmente, su trabajo debe

tener un impacto especial en el mejoramiento de las condiciones de vida de los habitantes de nuestro país.

Estos criterios nos permitieron poco a poco aproximarnos a la decisión consensual de otorgar el premio a la Doctora Margarita Perea Dallos. En efecto, la Doctora Margarita, Profesora del Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional, Sede de Santafé de Bogotá, desde 1976, lideró desde esa época el establecimiento en Colombia de lo que, para ese entonces, era una nueva área del conocimiento: la Biotecnología Vegetal.

Para 1980 tenía funcionando el laboratorio de Cultivos Vegetales y había logrado introducir en el plan de estudios una asignatura electiva en la que comenzó a formar un grupo muy importante de biotecnólogos que en sus respectivos campos han venido prestando servicios al país. Dos años después estableció un programa de educación continuada que ha venido ofreciendo cursos nacionales y latinoamericanos en áreas tales como la aplicación de los cultivos "in vitro" a la agricultura, biología molecular de plantas e ingeniería genética. Bajo

su égida se formó en 1984 la Asociación Colombiana de Cultivos Vegetales "in vitro" que publica su propia revista científica con circulación nacional y latinoamericana.

La Dra. Perea ha dirigido más de veinte trabajos de grado, muchos de los cuales han recibido la mención de meritorios, y por lo menos tres de sus estudiantes se encuentran ahora realizando estudios de doctorado en universidades extranjeras en biología molecular e ingeniería genética de plantas.

Sus intereses investigativos la han llevado a conformar grupos de investigación con la participación de agremiaciones tales como Augura en el área del cultivo del banano y con entidades como Corpoica y universidades regionales en lugares donde la agroindustria es importante.

Los resultados de sus esfuerzos han sido conocidos a nivel internacional a través de sus más de 50 publicaciones científicas y capítulos de libros especializados los que le ha valido el estatus de experto para el asesoramiento de otros países y culturas en los tópicos de su competencia. También sirvió como miembro del comité editorial de *International Plant, Cell, Tissue and Organ Culture*, de Holanda, dirige la *Revista de la Asociación Colombiana de Cultivos Vegetales "in vitro"* y represen-

ta en Colombia a la *International Association for Plant Cell and Tissue Culture*.

Sus logros más importantes, por el impacto social que representan, son el haber obtenido un clon de banano a través de mutaciones inducidas cuyas características principales son la precocidad, el vigor de la planta y el sabor de la fruta que se encuentra en evaluación en plantaciones de diferentes países; la obtención de embriogénesis somática en diploides a partir de granos de polen y el establecimiento de técnicas de propagación clonal y saneamiento de los cultivos para plantas tropicales.

La vida de la Dra. Perea se ha caracterizado por su entrega al trabajo sistemático, silencioso, sin buscar otro premio que la formación de sus estudiantes y los logros científicos con un fuerte contenido de utilidad social. Por todas estas características que la enaltecen llegamos a la decisión unánime de escogerla como ganadora del Premio a la Obra Integral de un Científico.

Luis Caraballo

Carlos Corredor

Angela María Guzmán

Guillermo Restrepo

ACTA DEL PREMIO ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS - ACADEMIA DE CIENCIAS DEL TERCER MUNDO (TAS), PARA MOTIVAR A JOVENES INVESTIGADORES. CONVOCATORIA CORRESPONDIENTE A 1998

Santafé de Bogotá, julio 22 de 1998

Señor

Dr. Don LUIS EDUARDO MORA OSEJO
Presidente
Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales
Ciudad

Respetado Señor Presidente:

Como Jurados del "Premio Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Academia de Ciencias del Tercer Mundo (ACCEFYN -TAS), para motivar a jóvenes investigadores", área de Física, versión 1998, nos reunimos el día 21 de julio en la sede de la Academia

con el propósito de considerar los siguientes trabajos que se presentaron para el concurso citado:

- T1. A. Rivera y F. Chejne
Stability analysis of thermoacoustic engines
- T2. A. Sánchez
Efecto de la sustitución de Cu por Si en muestras superconductoras de (Bi,Pb)SrCaCuO.
- T3. Jaime E. Gómez, Clara Rojo Ceballos, Javier Morales Aramburo y Nicolás A. Gómez
Determinación de la distribución de campo eléctrico en aceite de transformador de potencia usando la técnica electro-óptica de Kerr



Margarita Perea Dallos, ganadora del premio "A la obra integral de un científico" y Adriana Sánchez, ganadora del premio "Academia Colombiana de Ciencias, Academia del Tercer Mundo, para motivar a jóvenes investigadores".



El Ministro del Medio Ambiente, señor Juan Mayr felicita a la física Adriana Sánchez Lotero, al hacer entrega del premio "Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Academia de Ciencias del Tercer Mundo (TWAS) para motivar a jóvenes investigadores.

- T4. A. Avila y J.E. García
Diseño e implementación de un microscopio de efecto tunel para ser utilizado en el aire
- T5. Augusto Antonio Gómez
Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio Colombiano.

En los trabajos citados el concursante es el primer autor.

Los miembros del Jurado estudiaron con anterioridad a la reunión, de manera individual, cada uno de los trabajos previamente enumerados. El Jurado tuvo en cuenta igualmente la documentación que recibió del Señor Secretario de la Academia, Dr. Don José A. Lozano.

Una vez instalada la reunión, el Jurado estableció por unanimidad los siguientes CRITERIOS para la selección y evaluación de los trabajos:

1. Participarán los trabajos que cumplan con el reglamento de la convocatoria. Este reglamento fue promulgado en el plegable que repartió la academia al convocar el concurso. Se anota que, en particular, los trabajos deben ser presentados "de acuerdo con las normas usuales de un artículo científico".

2. Asignar a cada trabajo un puntaje según las siguientes categorías:

- a) Originalidad de la contribución. Máximo 40 puntos

- b) Presentación del estado actual del tema teniendo en cuenta el desarrollo del área o de la disciplina. Máximo 20 puntos.
- c) Desarrollo integral del tema teniendo en cuenta que se concursa en el área de la Física. Máximo 30 puntos.
- d) Tradición investigativa del concursante y del grupo, evaluada a la luz de las referencias citadas en el trabajo que concursa y en la documentación entregada por la Secretaría de la Academia al Jurado.

3. Declarar desierto el concurso si la totalidad de los trabajos obtiene un puntaje inferior a los 60 puntos.

4. Orogar el premio entre aquellos trabajos que alcancen un puntaje superior o igual a los 60 puntos. En este caso se procederá a un segundo estudio comparativo de los trabajos que cumplan este requisito.

5. El Jurado excluyó del concurso el trabajo titulado "Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio Colombiano" presentado por Augusto Antonio Gómez, debido a que no se presentó en forma de artículo científico.

6. Después de un estudio cuidadoso de cada uno de los trabajos, por unanimidad los miembros del Jurado acordamos asignar los siguientes puntajes:

	T1	T2	T3	T4
a/40	25	20	10	20
b/20	15	15	05	10
c/30	15	15	15	10
d/10	00	10	00	00
Total	55	60	30	40

7. Con base en el procedimiento acordado, en la evaluación cuantitativa realizada y en una nueva verificación sobre las características sobresalientes del trabajo que alcanzo el puntaje de 60 puntos, los miembros del Jurado decidimos por unanimidad declarar el siguiente ganador del concurso:

Autor: Adriana Sánchez

Trabajo: Efecto de la sustitución de Cu por Si en muestras superconductoras de (Bi,Pb)SrCaCuO.

Institución : Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física, Bogotá.

8. El Jurado se permite aclarar que una versión modificada del trabajo que ha sido declarado ganador fue aceptado por la Revista Mexicana de Física según la siguiente identificación:

Autores: A. Sánchez, A. Mariño y H. Sánchez

Título: Effects of Si doping on structural and superconducting properties of (Bi,Pb)SrCaCuO.

En constancia de lo antes expuesto y como miembros del jurado para el Premio para motivar a jóvenes investigadores, firmamos.

Dr. Augusto López
Universidad Industrial de Santander

Dr. Rubén Antonio Vargas
Universidad del Valle

Dr. Diógenes Campos
Universidad Nacional de Colombia