

## REVISTA DE LA

ACADEMIA COLOMBIANA  
de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

LA ACADEMIA ES ORGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XVII

MAYO DE 1990

NUMERO 66

PATRONO DE LA ACADEMIA:  
SEÑOR PRESIDENTE DE LA REPUBLICA  
DR. VIRGILIO BARCO VARGASPRESIDENTE DE LA ACADEMIA:  
LUIS EDUARDO MORA-OSEJODIRECTOR DE LA REVISTA:  
SANTIAGO DIAZ-PIEDRAHITA

## SUMARIO

	Págs.		Págs.
Nota Editorial . . . . .	401	<b>Premio Academia Colombiana de Ciencias</b>	
<b>Trabajos Académicos</b>		La convergencia de placas en el noroccidente suramericano y el origen del nido de Bucaramanga por <i>Carlos Coral</i> . . . . .	521
El estado de la ciencia en Colombia en el siglo XIX por <i>Luis Duque Gómez</i> . . . . .	405	Clonaje de fragmentos de ADN de <i>Plasmodium falciparum</i> y su posible uso en el diagnóstico de la malaria por <i>Fernando Angel S., Ana E. López S. y Hernán Acosta D.</i> . . . . .	531
Tres naturalistas del siglo XIX reunidos en torno a una flora por <i>Santiago Díaz-Piedrahíta</i> . . . . .	415	<b>Premio Academia de Ciencias del Tercer Mundo</b>	
Del electrón perdido al electrón solitario por <i>Jose Luis Villaveces Cardoso</i> . . . . .	425	Estudio cladístico de la familia Iguanidae (Sauria-Reptilia) con base en la musculatura del miembro posterior por <i>Julio Mario Hoyos</i> . . . . .	543
Los dinoflagelados como herramienta nueva para el control estratigráfico por <i>Hernando Dueñas Jiménez</i> . . . . .	433	Estudio de mecanismos de conducción en muestras semi- conductoras de Ln, Ba, Cu, O, (Ln = Y, La) cercanas a la transición metal no metal por <i>Mauricio Esguerra Bónitto</i> . . . . .	559
Claves para los pteridófitos de las Islas de Gorgona y Gor- gonilla. por <i>María Teresa Murillo Pulido</i> . . . . .	441	Generación de ultravioleta en sistemas atómicos bombeados por una transición de dos fotones por <i>Angela María Guzmán Hernández</i> . . . . .	567
Estilolitos horizontales como indicadores de presiones tec- tónicas por <i>Adrien Scheidegger y Jairo Mojica</i> . . . . .	445	<b>Contribuciones</b>	
Sobre la determinación de pertenencia de estrellas a cúmu- los abiertos a partir de movimientos propios por <i>Eduardo Brieva y Antonio Uribe</i> . . . . .	461	Magnoliaceae nativas del Brasil por <i>Gustavo Lozano Contreras</i> . . . . .	579
Comportamiento del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas por <i>Josué Quintero Quintero</i> . . . . .	467	Geología de la Hoya Hidrográfica del río Micay por <i>Jaime Galvis, Ricardo de la Espriella, Alberto Fandiño y Hernando Pinto</i> . . . . .	585
Fijación simbiótica de nitrógeno. Estado actual y perspecti- vas por <i>Gerardo Pérez Gómez</i> . . . . .	477	Estudios sobre ostrácodos de Colombia. Nueva especie de <i>Eulimnadia</i> por <i>Ewald Roessler</i> . . . . .	595
Análogos de $F_q[x]$ de conjeturas famosas de la Teoría de los números por <i>Víctor Albis G.</i> . . . . .	489	<b>Informe de Secretaría</b> . . . . .	605
La energía solar, desarrollo y perspectivas por <i>Humberto Rodríguez Murcia</i> . . . . .	505	<b>Palabras de Aniversario</b> por el Dr. <i>Luis Eduardo Mora O.</i> . . . . .	609
La importancia de los cromosomas politénicos en la taxono- mía de simúlidos por <i>Paulina Muñoz de Hoyos</i> . . . . .	511	<b>Notas del Director</b> . . . . .	611
		<b>Constitución de la Academia</b> . . . . .	615



# EL ESTADO Y LA CIENCIA EN COLOMBIA EN EL SIGLO XIX\*

por

Luis Duque Gómez

## Resumen

**Duque, L.:** El Estado y la ciencia en Colombia en el siglo XIX. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 405-414. 1990. ISSN 0370-3908.

Se presenta un recuento de las principales normas oficiales que permitieron el fomento de la ciencia en Colombia durante las cinco primeras décadas de vida republicana. Se transcriben y comentan algunas de estas normas.

En el presente mes de agosto celebra nuestra Academia un nuevo aniversario de su establecimiento, que le señala más de media centuria de fecunda existencia, durante la cual se han congregado en torno suyo prestantes figuras de la ciencia en Colombia, las cuales han encontrado en ella un cálido estímulo para avanzar en la investigación científica en las distintas ramas del saber. En las páginas de su acreditada revista ha quedado el testimonio fehaciente de lo mucho que en tan corto tiempo y con precarios medios se ha logrado para correr las fronteras del conocimiento en varios aspectos de la ciencia teórica y en especial en el estudio y análisis sistemático de nuestra naturaleza ambiente.

Consagremos hoy, una vez más, un recuerdo agradecido a los gestores de su fundación, primero como correspondiente de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la madre patria y luego, su nacionalización, en 1933, los doctores José Joaquín Casas, entonces representante de Colombia en Madrid, y el ingeniero Jorge Alvarez Lleras, su primer Director, creador de su órgano de difusión y a quien la Corporación debe las más señaladas y acuciosas gestiones para el logro de su plena estructuración, además de todo lo que significó la tarea científica de su vida para el prestigio internacional

de Colombia en el campo de la ingeniería, las matemáticas, la astronomía, la geología, como también los méritos invaluable de su labor docente a nivel universitario. Digno y señalado discípulo de Garavito Armero, la ciencia en Colombia tiene con él una deuda incancelable, que obliga a mantener fresca su memoria y a ofrecer su vida como ejemplo indeficiente para las generaciones venturas.

Pero estos logros de más de medio siglo tienen sus antecedentes y hunden sus raíces —justo es recordarlo y reconocerlo— en la alborada del movimiento de Independencia y a todo lo largo de los tiempos republicanos, para no referirnos a los verdaderos orígenes de tales inquietudes, que surgen como refulgentes destellos con la empresa científica mutisiana, en las postrimerías de la centuria del XVIII y en los años iniciales del siglo XIX.

Precisamente hemos escogido como tema para esta conferencia la reseña, así sea sumaria, de lo que fuera el interés oficial por el incremento de la ciencia en las primeras décadas de la República, el cual, no obstante sus soluciones de continuidad y sus repetidos fracasos, contrasta, de cierto modo, con la esquiva responsabilidad del Estado moderno frente a la tarea trascendental e impostergable de asegurar el cumplimiento de los fines sociales de la cultura y para saldar el compromiso de la nación frente a la comunidad científica internacional, que tanto espera de nuestros hombres de estudio y del

---

\* Conferencia de Fondo dictada en el recinto de la Academia Colombiana durante la sesión solemne estatutaria realizada el 17 de agosto de 1988.

inmenso campo que para la investigación ofrece la naturaleza física de nuestro entorno y la experiencia biológica y cultural que implica el contacto de los troncos primigenios que aquí han informado nuestro *ethos*, aún paradójico e imprevisible en sus reacciones y manifestaciones frente a la sorprendente complejidad del mundo moderno. El Estado ha descargado esta responsabilidad en la Universidad, al tiempo que le regatea los recursos materiales para que pueda cumplir tan noble misión y comprometedor empeño que por otra parte sería el mejor estímulo para elevar considerablemente el nivel de la docencia.

Difícil sería superar en este recuento —y no es nuestro propósito ni siquiera intentarlo— el denso trabajo realizado por nuestros colegas Enrique Pérez Arbeláez, Andrés Soriano Lleras y Alfredo D. Bateman y en especial el de Perry Zubieta, cuya memoria lleva por título “Apuntes para la historia de las ciencias básicas en Colombia”, publicada en el número 54 de nuestra Revista, en la que el autor, en admirable síntesis, registra los antecedentes de la evolución cultural y científica en el país, desde la época colonial hasta los tiempos modernos, relevando aquellos momentos en que el establecimiento de un Instituto, la expedición de una Ley o la contribución pública o privada incrementó el afán por el análisis de nuestras raíces o favoreció estudios que aprestigian el esfuerzo cultural en nuestro acontecer histórico.

Sólo queremos insistir hoy en el hecho de que, no obstante la historia tormentosa de la República en la centuria decimonónica, en la que se inicia la lucha por la libertad, seguida luego por un proceso lleno de contradicciones, que no obstante asegura la consolidación de nuestras instituciones republicanas, el Estado, a través de los sucesivos gobiernos, tutela desde un principio el desarrollo de la ciencia y la cultura, como una respuesta adecuada al clamor de los fundadores de la nacionalidad, entre los que se contaron no pocos hombres de ciencia, a quienes el amor a la libertad llevó hasta el sacrificio, a los campos de las grandes batallas que sellaron nuestra Independencia y la naciente república colocó en el foro y en los cuerpos colegiados para estructurar el estado de derecho y asegurar con ello el sello democrático de nuestras instituciones. La república surgía así, para fortuna nuestra, como bien lo anotara José Félix de Restrepo, no bajo el signo de Marte, sino al amparo de la diosa Minerva, dispensadora de los dones de la sabiduría, a pesar de que entonces sólo existía un ambiente propicio para las decisiones marciales, que primordialmente comprometían el propósito y la voluntad de los asociados en la empresa grandiosa de sacudir el yugo varias veces centenario de la dominación española. El edificio de nuestro Observatorio Astronómico se yergue todavía como un símbolo no sólo de la corriente científica renovadora, sino también del solícito alero que acogió con igual entusiasmo y ardentia el espíritu libertario de nuestros hombres de

ciencia, que decretaron una tregua en sus quehaceres científicos hasta tanto aseguraran una patria más grata para todos los colombianos.

En efecto, apenas sí se había extinguido aun el fuego en Carabobo y en las demás batallas preliminares de la gloriosa acción de Ayacucho, cuando ya el Congreso de la Gran Colombia daba el primer paso de trascendencia en el fomento de la ciencia, en 1823 —no obstante los angustiosos compromisos bélicos y la penuria lamentable del fisco— al expedir el Decreto que dio vida legal al Museo Nacional y que garantizó su organización como verdadero centro docente y de investigación en distintos campos del saber.

“Teniendo en consideración: —reza la exposición de motivos del Decreto del 28 de julio—. Primero. Que al paso que han sido ignoradas en estas regiones opulentas las ciencias naturales, por una consecuencia precisa de la pésima administración de su anterior gobierno, son absolutamente necesarias para el adelantamiento de su agricultura, artes y comercio, que son las fuentes productoras de la felicidad de los pueblos. Y segundo. Que ha venido ya la feliz oportunidad de que la República pueda promover y difundir las referidas ciencias naturales, y por este medio logrará la ventaja de que no continúen ocultos en el mismo lugar que los ha producido la naturaleza los ricos metales y otros muchos objetos del reino mineral que abrigan en su seno nuestros valles y montañas;

## DECRETA

Artículo 1o. Se aprueban las contratas celebradas entre el señor Francisco Antonio Zea y los señores Rivero, Boussingault, Roullin, Bourdon y Goudot; y consiguientemente habrán de tener su debido cumplimiento, con declaración de que las asignaciones hechas a dichos profesores no están sujetas a ningún descuento.

Artículo 2o. Para lograr aquel objeto se establecerá en esta capital un museo y una escuela de minería, bajo el reglamento que formará el Poder Ejecutivo para su régimen interior, el cual se presentará a la Legislatura para su resolución, sin perjuicio de que entre tanto tenga la debida observancia.

Artículo 3o. El museo tendrá las cátedras siguientes: de mineralogía y geología, de química general y aplicada a las artes, de anatomía comparada, de zoología, de entomología, de conchología, de botánica, de agricultura, de dibujo, de matemáticas, de física y de astronomía.

Artículo 4o. La escuela de minería tendrá las cátedras siguientes: de matemáticas simples y aplicadas a las máquinas, de física, de mineralogía y geología, de explotación, de química analítica y metalúrgica, de geometría descriptiva y de dibujo . . . . .

Artículo 7o. De cada uno de los departamentos de la República vendrá por lo menos un joven a la escuela de minería . . . . .

Artículo 9o. Los jóvenes serán mantenidos por el término de tres o cuatro años en la escuela de minería, con una pensión de cuatrocientos pesos anuales, que serán pagados por todos los propios de los departamentos respectivos, a proporción de sus ingresos y egresos, y cuya regulación hará el intendente del departamento . . . . .”

En el año de 1826, el Congreso expidió una Ley con el plan de estudios, la cual en la parte pertinente al Museo dice:

### CAPITULO IX

Artículo 6o. Al Museo establecido en la capital de la República por decreto de 28 de julio de 1823, se le dará la extensión necesaria para formar escuela general que abrace las enseñanzas comunes a las escuelas de aplicación.

Parágrafo 1o. Las enseñanzas que comprenderá el Museo son: la geometría descriptiva, con todas sus aplicaciones, la aplicación del análisis a la geometría descriptiva, la general de sólidos y fluidos, la arquitectura civil, la fortificación, la física y química aplicada a las artes, la geodesia y topografía, el dibujo topográfico y de paisaje”<sup>1</sup>.

Hermosas líneas consagra la Gaceta de Colombia en el número 56 del 4 de mayo de 1823, a la memoria de Francisco Antonio Zea, fallecido en la ciudad inglesa de Bath, en noviembre de 1822 pocos meses después de haber cumplido en Europa la importante misión que le confiara el gobierno de la Gran Colombia. La nota necrológica, tomada del periódico “Iris”, de Venezuela, algunos de cuyos párrafos transcribimos como homenaje a la memoria de este prócer y científico neogranadino, dice así:

“Aunque el señor Zea pertenecía a una de las más antiguas familias de su país natal, no era rico en bienes de fortuna; tuvo sin embargo la suficiente para dedicarse a la carrera literaria en que hizo notables progresos, manifestando desde sus primeros estudios que sería algún día benemérito de las ciencias. Sin limitarse a los conocimientos de la escuela en una edad que ya le permitía el uso de la reflexión y desenvolver su propio genio, profundizó los autores latinos, aprendió a escribir con pureza la lengua de Salustio y de Tácito, se formó temprano el gusto fino y sólido que ha distinguido siempre sus escritos. Tuvo la dicha de aprender la filosofía que merece llamarse tal bajo la dirección de uno de nuestros ac-

tuales magistrados a quien debe mucho la ilustración y cuyo nombre callo por no ofender su modestia.

“Zea pasó después contra su inclinación, y según la costumbre, a la clase de derecho civil, porque no presentándose a los americanos otras carreras que el foro y la iglesia, era menester escoger entre la Teología y las Leyes. Sin la bondad del célebre Mutis, protector decidido del mérito, y la pública, los talentos de Zea y su afición a las ciencias exactas y naturales habrían quedado en el olvido; mas, habiéndole procurado su ilustre bienhechor una plaza en el Jardín Botánico de Bogotá, abandonó el colegio y la jurisprudencia, para consagrarse al estudio de la naturaleza, ejemplo que siguió después el estimable Caldas, obteniendo igual protección.

“Mientras el plan de estudios mandado observar por reales órdenes condenaba nuestra razón a la ignorancia y al orgullo, sujetos ilustrados promovían la difusión de las luces, aunque muy pocos tenían valor de explicar sus ideas públicamente. Zea se expuso al riesgo de decir la verdad con intrepidez filosófica en una elocuente oración de estudios pronunciada en el Colegio de San Bartolomé, e impresa en el periódico de Bogotá. En una alocución a la juventud, llena de ideas felices, de mérito oratorio, y de sentimientos patrióticos, él exhorta a los jóvenes al útil saber con las imágenes más propias, y para despertar su aplicación les representa la patria llorosa levantando una mano para ‘señalarles a la bella naturaleza que está convidándolos al examen de sus maravillas’. ‘Si la vida de un despreciable ciudadano, dice en otro lugar, fuese bastante precio, yo correría al patíbulo pidiendo solamente por merced y gracia un momento para inundarme en la alegría de ver a mi amada juventud respirando humanidad y patriotismo, ilustrada y feliz’.

“El continuó con reputación sus trabajos botánicos al lado de su preceptor Mutis, a quien Lineo ha llamado inmortal, concurriendo a las experiencias del guaco, la quina y otras plantas útiles del género humano, hasta que fue envuelto, a fines del último siglo, en la célebre causa de la supuesta conspiración, que hizo enviar a España como reos de Estado a varios sujetos ilustres de Bogotá, a muchos jóvenes de las más lucidas esperanzas. Zea y sus compañeros fueron superiores a este revés que les causó su propio mérito: se indemnizaron en la corte del crimen que se les imputaba; y empleados algunos por el gobierno, él obtuvo colocación en el Jardín Botánico de Madrid, dirigido por Cabanilles. Fue el discípulo predilecto de aquel sabio naturalista, y el que destinó el rey para sucederle después de su muerte, la cual, habiéndose verificado, obtuvo el empleo de director del mismo Jardín.

“El discurso con que abrió sus lecciones es digno de Buffon pintor de la naturaleza, y menos parece por sus imágenes y colorido obra de la pluma que del pincel: muchas memorias sobre diferentes obje-

1. *Codificación Nacional de todas las leyes de Colombia desde el año de 1821, hecha conforme a la Ley 13 de 1912, por la Sala de Negocios del Consejo de Estado*, Tomo III, año 1825. Imprenta Nacional. Bogotá, 1924.



tos de la facultad aumentaron su crédito en ella: su clasificación de la quina, en que expone las ideas de Mutis honra tanto al maestro como al discípulo; su descripción de la cascada del Tequendama, es una pintura acabada de aquel grande espectáculo de la naturaleza; y su cuadro político de la Europa dado en el Mercurio de Madrid, es uno de los trozos más valientes del idioma español.

“Zea fue miembro de varias academias y sociedades de la Europa en las que adquirió una celebridad justamente obtenida, no pudiéndosele disputar su mérito científico sin contradecir a muchos sabios de primer orden, y borrar su nombre de obras dignas de la posteridad.

“Durante la invasión de España por los franceses, que respetaron sus talentos, él siguió el partido de la parte más ilustrada de la nación, disminuyendo en cuanto pudo las calamidades de la guerra, la cual terminada permaneció en París por la intolerancia política del gobierno español, perdiendo así las ciencias naturales muchas de sus tareas por no haber regresado a Madrid, como se habían perdido por la misma causa los doctos manuscritos de Mocho, director de la expedición botánica de Méjico.

“La independencia de su patria abrió al señor Zea una nueva senda de gloria, y habiendo dejado su familia en París se vino a unir a nuestra suerte en tiempo en que era desgraciada.

“El fue uno de los compañeros del General Bolívar e intendente de la expedición formada en los Cayos para libertar la Costa Firme (empresa que hace recordar a Leonidas y a sus 300 espartanos) no influyendo poco su crédito en la protección que nos dispuso el general Pétion, quien le había ofrecido antes un sueldo conveniente para que dirigiese la agricultura en la isla de Haití.

“Nuestros compatriotas saben bien, y los periódicos nacionales y extranjeros han repetido, cuánto ha servido Zea a la noble causa de su patria. El acompañó la retirada de Ocumare a las provincias del oriente que han honrado los talentos militares de los jefes que la dirigieron; se halló en Juncal y otras acciones, animando el valor de los soldados; asistió a la entera libertad de Margarita y a la rendición de Guayana: Fue uno de los que formaron el congreso, y contribuyó más a la organización del país; presidió aquel cuerpo, fue vicepresidente de la República, y últimamente enviado suyo en las cortes de Europa. No es de este lugar la cuestión de sus negociaciones político-económicas cuyo justo concepto depende de datos que no tenemos; pero nos atrevemos a decir, que ha merecido el título que se le ha dado de Franklin de Colombia por sus esfuerzos, crédito científico y consideración personal, que ha refluído en bien de la nación.

“La historia de los conocimientos humanos dará a Zea un lugar distinguido, y los botánicos de nuestro suelo no dejarán de dedicarle una planta, útil monumento que se reproduce; sus escritos no perecerán, porque la elocuencia sobrevive al tiempo, leyendo con placer nuestros descendientes las indelebiles líneas que le dictó el valor del bien público; y

cuando Colombia triunfante vaya creciendo con los siglos como sus grandes ríos con las aguas que lo aumentan, la posteridad siempre justa colocará el nombre de Zea entre los fundadores de su gloria y los primeros héroes de la patria — J. M.S.”.

Tales iniciales parecen corresponder a José María Salazar, uno de los que irían a integrar la Academia Nacional de Colombia, creada durante la primera administración del general Santander en 1826, en la Ley que se expidió entonces sobre educación pública.

También encontramos en la Gaceta, en el número 144, correspondiente al 18 de Julio de 1824, la noticia de la inauguración del Museo, acontecimiento al cual se le dio gran importancia y cuyo acto estuvo realizado con la asistencia del vicepresidente, general Santander y sus inmediatos colaboradores en el gobierno.

“Tenemos el placer de anunciar al público —dice la nota— que el día 4 de los corrientes se abrió el museo de la historia natural. S.E. el vicepresidente con los secretarios del interior y de la guerra y alguna comitiva concurrieron a la apertura.

“El museo en su infancia posee ya algunas cosas raras; las siguientes son las principales: Una colección de minerales, arreglada según el sistema del célebre Hauy en la que se encuentran algunas muestras singulares por su cristalización y escasez. La mayor parte de estos minerales vienen de Europa y de otras partes muy remotas. Tiene algunos pedazos de hierro meteórico, encontrados en diferentes partes de la República y analizados por los señores Rivero y Boussingault.

“Muchos huesos de animales desconocidos, sacados en Suacha que son muy curiosos por su tamaño. Una momia encontrada cerca de Tunja, con su manta bien conservada, y se supone tener más de 400 años. Algunos insectos de extraordinaria hermosura. También posee varios mamíferos, reptiles y peces y algunos instrumentos muy bien hechos; tiene además el establecimiento un laboratorio y sala de dibujo.

“Deseoso el gobierno de fomentar un establecimiento continúa la información que es indispensable para propagar las luces, y ver al mismo tiempo reunidas en la capital todas las producciones de la república, encarga a los intendentes, gobernadores, curas, jueces políticos, y alcaldes remitan todas aquellas cosas curiosas, como minerales, reptiles, peces, etc. etc.; los que puedan venir vivos serán más apreciables; de lo contrario se enviarán del modo posible, teniendo siempre cuidado de remitir los animales con sus cabezas y pies, los reptiles y peces pueden remitirse en aguardiente, y los insectos clavados con alfileres, poniéndoles en cajones muy bien cerrados con los que se pondrá un poco de pimienta o tabaco para que los insectos no dañen los esqueletos.

“Se espera que con la ayuda de dichas personas en algunos años la capital de Colombia podrá rivalizar

con los gabinetes de las naciones europeas, pues son incalculables sus riquezas en estos ramos.

“Se enviarán con las remesas algunos informes que indiquen el nombre que se da a los animales en las provincias de donde vienen y el nombre de las personas que los remiten para que conste siempre en el museo”.

#### Academia Nacional de Colombia

En el número 266 de la Gaceta correspondiente al 14 de noviembre de 1826, se lee:

“Creada por la Ley de educación pública una Academia Nacional compuesta de 21 miembros, y autorizado por el poder ejecutivo para nombrar los miembros por primera vez, el excelentísimo señor vicepresidente de la República, encargado del gobierno ha procedido en unión del concejo de gobierno a hacer los siguientes nombramientos.

El doctor Félix Restrepo, director general de estudios y ministro de la Alta Corte de Justicia.

El doctor Vicente Azuero ídem y catedrático de derecho público en el Colegio de San Bartolomé.

El doctor Estanislao Vergara, director de estudios y ministro de la Alta Corte.

El señor José María del Castillo, Secretario de Hacienda.

El señor José Manuel Restrepo, Secretario del Interior.

El señor José R. Revenga, Secretario de Relaciones Exteriores.

El señor Pedro Gual, actual Ministro Plenipotenciario en el Congreso General de América.

El señor José María Salazar, ministro de la Alta Corte y ministro plenipotenciario en los Estados Unidos del Norte.

El señor Jerónimo Torres, vicepresidente actual del Senado y Director de la Casa de Moneda de esta capital.

El señor Francisco Javier Yañes, Ministro de la Corte de Venezuela.

El señor Joaquín Olmedo, Ministro del Perú en Londres.

El P.M. Fr. Diego Francisco Padilla, agustino calzado.

El canónigo Magistral Dr. Mariano de Talavera.

El Arcediano de Cartagena, Dr. Manuel Benito Rebollo.

El señor Santiago Arroyo, Ministro de Justicia del Cauca.

El señor José Fernández Madrid.

El señor Andrés Bello, secretario de la legación en Londres.

El señor Francisco Soto, catedrático de economía política en el Colegio de San Bartolomé.

El coronel de ingenieros José Lanz.

El primer comandante Pedro Acevedo, oficial mayor de la Secretaria de Guerra.

“El poder ejecutivo llenará la plaza de cualquiera de los nombrados que renuncie con causa su plaza hasta completar los 21. Después de completo el número, las vacantes la llenará la misma Academia Nacional”<sup>1</sup>.

Otra nota de la Gaceta de Colombia, del 31 de diciembre de 1826, informa:

“El 25 del corriente, a las once de la mañana, se instaló solemnemente en la capilla de San Carlos la Universidad Central de Bogotá con asistencia del vicepresidente de la República, los secretarios del despacho y la mayor parte de las autoridades y personas notables de la capital; el Director General de Estudios, Dr. Félix Restrepo recibió en el acto el juramento al Rector nombrado, Dr. Fernando Caicedo, al Vicerector, Dr. José María Castillo y Rada, y al Secretario de la Universidad, Dr. Alejandro Osorio. En seguida el mismo Director de Estudios pronunció un bello discurso análogo a las circunstancias, que publicaremos después.

“Concluido este acto, toda la concurrencia se trasladó al salón en que se hallaba colocada la Biblioteca Pública y allí el Secretario del Interior procedió a instalar la Academia Nacional, con los Miembros que actualmente se hallaban en la capital. En el acto el Secretario pronunció el discurso que publicamos. Instalada la Academia, fue nombrado Director *Pro-Tempore*, el señor Félix Restrepo, y Secretario con la misma calidad el Sr. Pedro Acevedo. La Academia nombró también una comisión compuesta del Director, del Secretario, y del Sr. Jerónimo Torres para presentar a la mayor brevedad posible un proyecto de reglamento orgánico”<sup>2</sup>.

1. Gaceta de Colombia No. 266, 19 de noviembre de 1826.

2. Suplemento de la Gaceta de Colombia, Número 273 de Diciembre 31 de 1826.

**“Discurso que el Secretario del Interior pronunció en el acto de instalar la Academia Nacional de Colombia”**

“Señores”

Un objeto muy interesante, y del cual deben resultar grandes bienes a la instrucción pública de Colombia, nos reúne hoy por primera vez en este lugar destinado al cultivo de las ciencias, la instalación de una Academia Nacional.

“Esta corporación, creada en el presente año por la Ley orgánica de estudios, se halla destinada a establecer, fomentar y propagar en Colombia el conocimiento y perfección de las artes, de las letras, de las ciencias naturales y exactas, de la moral y de la política. ¡Que objetos tan útiles y tan dignos de nuestros más constantes esfuerzos para elevarlos a su última perfección.

“No os desalenteis, señores, al considerar lo arduo de la empresa que la nación confía hoy a vuestro cuidado, y las inmensas dificultades que se os presentan por todas partes.

“Así como principia la Academia de Colombia, comenzaron las de Europa, que tanto han contribuido a perfeccionar las artes, las ciencias y las bellas letras, y que son ahora el honor de las naciones a que corresponden. Con el celo, la constancia, y la reunión de luces de sus miembros, ellas se han elevado a la perfección naciendo de pequeños principios.

“Estos bellos y consoladores ejemplos, el vasto campo que se representa a vuestras meditaciones, deben excitar en vosotros el más vivo entusiasmo. Fijad vuestras miradas sobre las artes, y hallareis que la Academia tiene que sacar de la nada las más importantes, sobre todo algunas que contribuyen inmediatamente a la riqueza, comodidad, y ornato de los pueblos.

“Las bellas letras necesitan perfeccionarse y entenderse en Colombia, que espera este beneficio de la Academia Nacional. Si volveis los ojos a las ciencias naturales y exactas ¡qué sublimes objetos se presentan a vuestra vista! Por do quiera hallais una naturaleza virgen y grandiosa, que os ofrece multitud de fenómenos en sus tres reinos e innumerables riquezas con qué aumentar la gran masa de los conocimientos humanos. La Europa aguarda con ansia de los establecimientos científicos que comienzan a formarse en los nuevos estados de América, la solución de muchas e importantes cuestiones relativas a objetos que nos son peculiares.

“Si os deteneis últimamente en las ciencias políticas y morales, aun son de mayor importancia las materias que se ofrecen a vuestras meditaciones. Instituciones y leyes que reformar, para que hagan la felicidad de los pueblos; hábitos, usos y costumbres que mejorar, para que reine entre nosotros la virtud y se consoliden las instituciones liberales; ignorancia y preocupaciones que combatir; y en fin, establecer, sostener y perfeccionar una educación general, que difunda las luces por todos los ángulos de Colombia; he aquí, señores, en compendio lo que teneis que hacer en las ciencias políticas y morales, que ejercen un tan poderoso influjo sobre la felicidad común.

“Al abrir su carrera la Academia de Colombia, la suerte de sus miembros bajo de otros aspectos, es consoladora. Vosotros, para hacer un gran bien a la humanidad, no necesitais entregaros a las teorías sublimes ni a los cálculos profundos de las matemáticas y de otras ciencias. Las ciencias prácticas, aquellas que influyen inmediata y eficazmente en la felicidad y en las virtudes de los pueblos os brindan abundante materia para vuestras investigaciones y con preferencia deben fijar la atención de la Academia; pueden vuestros esfuerzos reunidos contribuir poderosamente a la felicidad de la patria.

“Habiendo trazado un bosquejo de los varios objetos que la ley pone al cuidado de la Academia, debo también manifestaros mis ardientes votos por su prosperidad y buen éxito; concluyo, pues, declarando, a nombre y con autoridad del poder ejecutivo, que se halla instalada legalmente la Academia Nacional de Colombia”<sup>1</sup>.

En la Gaceta correspondiente al No. 319, del domingo 25 de noviembre de 1827, aparece una nota que lleva por título “Certámenes de la Universidad Central de Bogotá, 1827”.

“Grato y satisfactorio sobre manera es hablar de todo lo que se relaciona con la instrucción pública que como se ha dicho muy bien, es la fuente copiosa de bienes para la sociedad. El gobierno de Colombia que no ha perdido de vista un sólo momento la gloria de la nación, y que conoce que toda la gloria por brillante que sea desaparece en las tinieblas de la barbarie, se ha esforzado desde el principio, y aun en medio del ruido de las armas a derramar las luces en todo el territorio de la República.

“Testigos son de esta verdad el número considerable de escuelas de enseñanza mutua, colegios y otras casas de educación, debidos a su munificencia; los decretos en que ha prodigado mil beneficios y protegido del modo más liberal a la juventud estudiosa; en fin, el plan provisional para la enseñanza de 3 de octubre del año último, formado a consecuencia de la ley y del decreto de autorizaciones del congreso del 10 de marzo del mismo”.

Entra luego el comentario a reseñar los certámenes públicos que se han realizado en las distintas

1. Suplemento a la Gaceta de Colombia Número 273 - Dic. 31 de 1826.

ramas del saber, de acuerdo con el plan de estudios vigente, como la física, la legislación universal, la fisiología, de la cual dice que presidida por el Dr. Benito Osorio, sostuvo el tratado completo de los temperamentos en el hombre, sus relaciones con la edad, la temperatura, el clima, la estación, el régimen, las enfermedades y las pasiones y su influencia sobre el carácter de los que han de desempeñar los destinos públicos". Y más adelante: "Los cursantes de historia natural, teniendo a su frente al doctor Juan M. Céspedes, discurrieron sobre los métodos botánicos, la glosología de algunas plantas, su sinonimia, fructificación y propagación en general y en particular de las que se encuentran en los alrededores de la capital. Fue consagrado al supremo gobierno de la nación colombiana y se dedicaron dos nuevas plantas a los señores presidente y vicepresidente de la república con los nombres de *Bolivaria* y *Santanderia*". Hasta aquí el comentario de la Gaceta.

Años después, el plan de estudios fue reformado en aras de la tranquilidad de los más altos estamentos sociales. Vinieron después la agitación política y los tormentosos días del año de 1828, que culminaron con la noche septembrina, en la que quedaron implicados varios jóvenes y profesores universitarios, lo cual se atribuyó en buena parte a la educación racionalista que inspiraban los planes oficiales de la enseñanza. El Libertador los cambió radicalmente y de paso prohibió las sociedades secretas, que integraban y animaban no pocos de los autores intelectuales del cambio en la enseñanza de la ciencia política y aun de las mismas ciencias naturales. Terminada la égida bolivariana y consumada la desintegración de la Gran Colombia, lo que tuvo su epílogo triste y melancólico con la muerte del Libertador, entraron en colapso también los altos menesteres de la ciencia y de la cultura y con ellos las promisorias instituciones, que, no obstante estar aun casi embrionarias, empezaban sin embargo a dejar entrever un futuro promisorio a través de una juventud anhelante de nuevos conocimientos y de un panorama más amplio en los campos del saber. El País sufrió la dictadura de Urdaneta y el orden constitucional sólo vino a restablecerse en el año de 1831, cuando se inició realmente la República y se recuperó un ambiente propicio para insistir en los buenos propósitos que en materia cultural se habían puesto en marcha en el período comprendido entre los años de 1823 y 1826.

Abonémosle pues al general Santander y a sus colaboradores civiles en su gobierno, su decidido apoyo a la ciencia y al desarrollo de la cultura en general. De regreso del exilio y al asumir el mando como presidente constitucional de la Nueva Granada, en 1832, una de sus primeras medidas fue el restablecimiento de la Academia Nacional que se había pretendido poner en funcionamiento en el año de 1826. El decreto respectivo, que lleva fecha 15 de noviembre de ese año, dice así:

"Francisco de Paula Santander, presidente del Estado de Nueva Granada,

Vista la exposición del secretario del despacho del interior, relativa a informar al poder Ejecutivo que no existe ya la Academia Nacional de Colombia, creada por la Ley 18 de marzo de 1826 e instalada sucesivamente por el Gobierno colombiano;

Que por el artículo 219 de la constitución, la referida ley del 18 de marzo es una Ley de la Nueva Granada, y que es de una importancia reconocida, así para el bien de los pueblos, como para el honor nacional, la existencia de una corporación encargada de promover las ciencias y las artes;

#### DECRETA

Artículo 1o. Se establece la Academia Nacional de la Nueva Granada, con 21 miembros, en los términos prescritos en la ley de 18 de marzo de 1826, y para los objetos que ella determina

Artículo 2o. Se nombran miembros de la Academia Nacional de la Nueva Granada: 1o. a los granadinos que pertenecían a la Academia Nacional de Colombia, a saber: los señores Vicente Azuero, José Manuel Restrepo, Manuel Benito Rebolledo, José María del Castillo, Francisco Soto, Jerónimo Torres, Santiago Arroyo, Pedro Gual, Estanislao Vergara y Benedicto Domínguez; 2o. a los señores Joaquín Mosquera, Diego Fernando Gómez, Rufino Cuervo, Joaquín Acosta, reverendo Obispo de Santa Marta, Joaquín García, Lino de Pombo, Manuel María Quijano, José María Céspedes, general Hilario López y José María Triana;

Artículo 3o. La Academia se instalará el 25 de diciembre próximo, con la posible solemnidad en el modo que se dispondrá sucesivamente.

El secretario del despacho del interior queda encargado de la ejecución de este decreto".

Las complejidades políticas del país al terminar el gobierno del general Santander y la fuerte oposición a su sucesor, doctor José Ignacio de Márquez, desencadenaron la llamada "guerra de los Supremos", que incendió el país por sus cuatro costados, desde 1839 hasta 1841, y que provocó serios perjuicios a la educación y a las instituciones culturales que con tan buenos auspicios se habían puesto en marcha. Restablecida la paz después de cruentas batallas entre los revolucionarios y las tropas legitimistas, un reposo de poco más de diez años permitió al gobierno de Pedro Alcántara Herrán y de Tomás Cipriano de Mosquera impulsar nuevamente estas instituciones y preparar los antecedentes para que durante la administración de José Hilario López culminara el establecimiento de la Comisión Corográfica, que tanto significó para el conocimiento de las realidades patrias. Es la época en que se

registra una notable actividad política y cultural, impulsada por una juventud que románticamente se inspiraba en los postulados de la revolución francesa del 48.

La conmoción del año 54, que convocó al país entero en una acelerada y patriótica marcha sobre Bogotá y que dichosamente dio en tierra con la inquietante dictadura del general José María Melo, significó nuevamente una interrupción en estos planes culturales. No obstante estas dificultades, en 1857 se funda, por tercera vez, una Academia Nacional, por iniciativa del Liceo Granadino. La disposición pertinente dice así:

“El Liceo Granadino en cumplimiento del párrafo 1o. del Artículo 9o. de su reglamento,

#### A C U E R D A

Artículo 1o. Fundar una Academia Nacional que consagrará sus esfuerzos a la propagación y desarrollo de las ciencias, bellas artes, literatura, trabajos industriales y muy especialmente a la creación de nuestra historia y estudio de la lengua nacional.

Artículo 2o. Los miembros de que constará la Academia no pasarán de doce, tomados por elección secreta de entre los miembros corresponsales y activos del Liceo Granadino residentes en la capital de la República” (...)

Artículo 5o. La Academia Nacional será respecto del Liceo un gran jurado científico, artístico y literario y desde la instalación quedará encargada del cumplimiento de la atribución 3a. del artículo 11 del Reglamento del Liceo.

(...)

Artículo 9o. La Academia Nacional tendrá el deber de aceptar las comisiones científicas, literarias o artísticas que se le confíen por las corporaciones o autoridades nacionales y municipales, sea para tomar bajo su inspección y cuidado los establecimientos públicos de enseñanza o estudio; sea para verificar investigaciones de utilidad pública que correspondan a los mismos objetos de la misma Academia Nacional”.

Bogotá 20 de febrero de 1857. El Presidente, José Joaquín Ortiz. Los Secretarios, Lázaro María Pérez, Leopoldo Arias Pérez.

La Ley 18 de 24 de abril de 1865 creó el Instituto Nacional de Ciencias y Artes y destinó local para su establecimiento, así:

Artículo 1o. Destínase el claustro principal del extinguido convento de Santa Inés de Bogotá, para la colocación del Museo, la Biblioteca Nacional, la sala de mineralogía, el gabinete de historia natural, la galería de pintura y la de monumentos patrios.

Artículo 2o. El conjunto de los establecimientos mencionados se denominará “Instituto Nacional de Ciencias y Artes”.

Artículo 3o. Los mismos establecimientos, el observatorio astronómico y el Jardín Botánico (cuya creación contratará el Poder Ejecutivo) estarán a cargo de un director y de los empleados subalternos que pasan a expresarse: un bibliotecario, un inspector del museo, un profesor de historia natural y un jefe de la galería de pinturas”

(...)

Artículo 9o. El director y los cuatro inspectores formarán el núcleo de la Academia de Ciencias y Artes, que celebrará sesiones periódicas y hará todas las publicaciones concernientes a los objetos de su competencia. Esta corporación científica tendrá un secretario y un portero, elegirá miembros natos, honorarios y corresponsales, y se pondrá en relación con las sociedades análogas de otras naciones<sup>1</sup>.

En 1867, Mosquera, a quien debe considerarse como a uno de los grandes impulsores de los estudios antropogeográficos en Colombia, expidió, en las postrimerías de su gobierno y antes de que fuese depuesto del mando, el siguiente Decreto:

“Tomás Cipriano de Mosquera, gran general, Presidente de los Estados Unidos de Colombia, vistas las leyes de 1o. de junio de 1847, de 24 de abril de 1865 y de 7 de marzo último, y el decreto de carácter legal sobre el establecimiento del colegio militar y escuela politécnica; y teniendo en consideración la imposibilidad física que existe de colocar en el edificio de Las Aulas el museo, la biblioteca Nacional, la sala de mineralogía, el gabinete de historia natural, la galería de pintura y el salón de monumentos patrios, cuyo local apenas puede ser suficiente para la colocación de la biblioteca,

#### D E C R E T A

Artículo 1o. El Instituto Nacional de Ciencias y Artes se compondrá:

- 1o. Del colegio militar y escuela politécnica;
- 2o. De la biblioteca nacional;
- 3o. Del observatorio astronómico;
- 4o. Del museo;
- 5o. De la sala de mineralogía;

1. Idem, Tomo XXII. Años 1865 y 1866. Imprenta Nacional. Bogotá, 1929.

- 6o. Del gabinete de historia natural;
- 7o. De la galería de pinturas;
- 8o. Del salón de monumentos patrios, y
- 9o. Del jardín botánico

Artículo 2o. Los edificios que para dichos establecimientos han sido destinados, son, respectivamente: el antiguo convento de la candelaria, el edificio de Las Aulas, el observatorio astronómico y el claustro principal del extinguido convento de Santa Inés.

La creación de la Universidad Nacional en el mismo año, promovida por el general Santos Acosta, después del golpe contra el gobierno de Mosquera, estabiliza relativamente los estudios de educación superior en Colombia y a su amparo continúan algunas de las actividades de los años anteriores, no obstante los avatares políticos y las numerosas luchas intestinas que se desataron en este período, denominado "del radicalismo". En 1881 se dicta la ley más ambiciosa que se expidiera en el siglo XIX en materia de fomento científico;

Dice así esta disposición:

"El Congreso de los Estados Unidos de Colombia

#### D E C R E T A

Artículo 1o. Establécese por la presente Ley una Comisión científica permanente con el fin de que estudie, en todo el territorio de la República, lo concerniente a la Botánica, a la Geología, a la Mineralogía, a la Geografía, y a la Arqueología, en lo que se refiere al país.

Artículo 2o. Dicha comisión estará compuesta de un director, encargado de los trabajos generales y de dos profesores colombianos naturalistas, de un dibujante y de un secretario-redactor.

Artículo 3o. Será obligación del director estudiar por sí mismo y hacer que se estudie por sus adjuntos de una manera metódica, todo lo referente a los ramos científicos mencionados en el artículo 1o. de esta Ley.

Artículo 4o. Será igualmente un deber del director coleccionar todos los objetos interesantes que en los tres reinos de la naturaleza ofrezca el campo de sus estudios y que merezcan ser conservados, principalmente con el fin de que se formen de ellos colecciones con la historia detallada de cada uno de los objetos que contengan; una de estas colecciones será enviada a la exposición que se abrirá en Nueva

York en el año de 1883, y la otra se conservará en el local que con este fin hará preparar en la capital de la Unión el Poder Ejecutivo.

Artículo 5o. Los profesores naturalistas adjuntos a la Comisión, tendrán el deber de coleccionar y clasificar todos los vegetales, rocas, minerales, animales, objetos de cerámica, piedra u otras materias que puedan contribuir al progreso de los estudios naturales y al esclarecimiento de las cuestiones etnológicas relacionadas con la historia universal y con la especial de la República. Estas colecciones se harán de acuerdo con las indicaciones y bajo la dirección del jefe de los trabajos.

( . . . )

Artículo 7o. El secretario-redactor llevará una relación circunstanciada de todos los trabajos emprendidos, de sus efectos inmediatos, de las observaciones más importantes para la utilidad de la República y de todo aquello que pueda ser considerado como trascendental para la civilización del país.

( . . . )

Artículo 9o. El Poder Ejecutivo queda encargado de poner en práctica, a la mayor brevedad posible, las disposiciones de esta Ley y autorizado para hacer el nombramiento de director y demás empleados que deban formar la Comisión científica permanente, y para agregar a ésta hasta seis jóvenes ayudantes escogidos de entre alumnos que hayan terminado sus estudios en la Escuela de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional.

Artículo 10o. Queda igualmente autorizado el Poder Ejecutivo para señalar los sueldos que debe gozar cada uno de los empleados, recomendándose por el Congreso el que contrate con el señor José Carlos Manó, distinguido viajero naturalista, la dirección de la Comisión científica, por el tiempo y con las condiciones que tenga a bien estipular.

( . . . )

Artículo 13. Quedan derogadas, en los términos de la presente, Ley quinta, parte primera de la Recopilación Granadina que estableció la Comisión Corográfica; la Ley 29 de marzo de 1849 y la del 27 de marzo de 1852<sup>1</sup>.

Desafortunadamente, la Comisión Científica permanente se disolvió en corto tiempo. Sin embargo, de sus tareas iniciales nos quedaron dos trabajos de mérito, escritos por su secretario, el poeta Jorge Isaacs, el primero sobre las tribus indígenas del Estado del Magdalena, y el segundo sobre las posibilidades económicas de la explotación de los yacimientos carboníferos de El Cerrejón, uno y otro publicados en la serie *Anales de Instrucción Pública*, Vol. III, septiembre. Bogotá, 1884.

1. Leyes de los Estados Unidos de Colombia expedidas en el año.

La tormenta política se caldea nuevamente y el país entero se convulsiona con la “guerra del 85”, seguida de la del 95” y con la más desastrosa de todas, “la de los mil días”. Es el triste epílogo político de la centuria del XIX, que lo arrasa todo, cuya tormenta se prolonga hasta los años iniciales del siglo XX, cuando una nueva tregua en la lucha fratricida permite que surjan nuevamente algunas de las extinguidas instituciones científicas y culturales y con ellas el futuro promisorio de la llamada “generación del centenario”, que consolida y auspicia un clima de interés científico propicio para el establecimiento de entidades como nuestra Academia, las

cuales superviven no obstante el poco interés del Estado en su incremento, una apatía que contrasta con la reiterada y casi podríamos decir tosudez de los gobiernos de la pasada centuria en despertar, aun en medio de la guerra, el interés por la cultura de la ciencia y poner de manifiesto y con ello al menos la intención de continuar la gestión científica de los fundadores de la nacionalidad, de aquellos patricios que lo dieron todo por el fomento de la ciencia, varios de los cuales ofrendaron su vida por defender el espíritu libertario de las instituciones que nos legaron y que nos comprometen para siempre con sus memorias y con su ejemplo.

# TRES NATURALISTAS DEL SIGLO XIX UNIDOS EN TORNO A UNA FLORA\*

por

Santiago Díaz-Piedrahíta\*\*

Díaz-Piedrahíta, S. Tres naturalistas del siglo xix unidos en torno a una flora. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 415-423, 1990, ISSN 0370-3908.

Se proporcionan datos biográficos de J.J. Linden, J.E. Planchon y J.J. Triana y se presenta información acerca de la preparación de las obras *Plantae Colombianae* (1863) y *Prodromus florae Novo Granatensis* (1862-1867).

El 20 de agosto de 1803 se fundó en Santafé de Bogotá, el primer Observatorio Astronómico de América. Establecen los estatutos de esta Academia, que en la semana del 20 de agosto y al culminar un año más de actividades, la Corporación realice una sesión pública y solemne durante la cual un académico designado por la Presidencia debe leer un estudio de fondo.

Agradezco al Sr. Presidente esta honrosa designación. Para dar cumplimiento a la misma he seleccionado como tema de mi estudio un hecho singular; tres conocidos naturalistas, provenientes de tres países, formados en medios académicos diferentes y con actividades algo disímiles, se ven, circunstancialmente reunidos, en torno a un interés común: la publicación de una de las primeras obras que sobre la flora del país se ha escrito. Nos referimos a Jean Jules Linden, Jules Emile Planchon y José Jerónimo Triana.

En el curso de esta charla utilizaremos el vocablo "flora" en dos de sus acepciones; en algunos

momentos, para referirnos al conjunto de plantas del país y en otros para señalar las obras que tratan sobre ellas. Colombia es uno de los países mejor dotados en cuanto a recursos naturales, y dentro de dichos recursos sobresale una de las floras más ricas y variadas del universo. Se debe esta riqueza florística, entre otros factores, a la posición equinoccial del territorio nacional, a los cambios geológicos y climáticos sucedidos en los últimos miles de años y en especial a la presencia de la cordillera andina que recorre el país en tres grandes ramales, aumentando no sólo la extensión, sino produciendo una casi infinita variedad de ambientes. Esta gran diversidad florística y su efecto en la belleza del paisaje siempre han causado admiración, siendo especial el impacto que han producido en la mente de numerosos viajeros y naturalistas, en particular, en la de aquellos que tuvieron la oportunidad de conocer nuestro país antes de que se iniciara el acelerado proceso de deforestación que está acabando con los bosques, los suelos y las aguas de la nación.

Uno de los primeros en sentir la atracción particular de la flora colombiana fue José Celestino Mutis. Innumerables son los testimonios al respecto dejados por el naturalista gaditano. Fue él el primero en querer publicar una flora. Sabemos cuán vasta fue su empresa, qué influencia tuvo en la vida nacional, qué resultados dejó y cuál ha sido su legado a la historia científica colombiana. Hoy no nos referiremos a ello. A su turno, Alejandro de Humboldt señala cómo se sintió atraído por la flora tropical y por la imponencia de los Andes, y cómo pre-

\* Conferencia de fondo dictada en el recinto de la Academia Colombiana durante la sesión solemne estatutaria realizada el 23 de agosto de 1989.

\*\* Miembro de Número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales - Museo de Historia Natural, Apartado 7495, Bogotá, D.E. Colombia.



firió el difícil ascenso de la cordillera, movido por el deseo de conocerla y entenderla y por el interés de conocer a Mutis, a quien Linneo, "Príncipe de los Botánicos", había dedicado generosos calificativos en respuesta a los novedosos envíos de material científico, hecho que le hacía renombrado en el círculo de los estudiosos de la naturaleza.

Tanto al remontar como al descender el Orinoco, Humboldt y Bonpland pisaron varias veces el suelo colombiano, pero su ingreso formal al país se produjo en 1801 frente a la Bahía de Cispatá en la desembocadura del río Sinú, de donde pasaron a la Isla de Barú para fondear en Cartagena el 30 de marzo. Recorridos los alrededores de esta ciudad, tomaron el curso del río grande de la Magdalena hasta llegar a Honda. Luego de explorar la región de Mariquita iniciaron el ascenso a Santafé donde llegaron el 15 de julio. En la capital del Virreinato gozaron de la hospitalidad y buen trato de Mutis y de sus colaboradores, quienes les acompañaron durante sus exploraciones por los alrededores. Cumplida la visita, bajaron hacia el valle del Magdalena por Fusagasugá e Icononzo para pasar a Espinal e Ibagué. Desde allí iniciaron el difícil ascenso de la Cordillera Central siguiendo la ruta del Paso del Quindío por Toche y Salento para caer a Cartago; bordeando el río Cauca llegaron a Cali desde donde se dirigieron a Popayán y Pasto. Tras nueve meses de fructíferos desplazamientos y luego de realizar interesantes colecciones botánicas, abandonaron el territorio colombiano por el camino de Quito; era el 31 de diciembre de 1801.

A pesar de la dimensión del recorrido, es seguro que para Humboldt y Bonpland, la visita a nuestro país se quedó corta y que los intereses e inquietudes de los viajeros no fueron satisfechos. Basamos esta aseveración en el hecho de haber sido el propio Humboldt quien influyó seriamente en el interés de un conocido viajero induciéndole a visitar el suelo colombiano con el fin de que realizase nuevas observaciones y nuevas colecciones en ese territorio que tanto le había impactado, ya por la imponente del paisaje Andino, como por la diversidad de especies. Es así como Jean Jules Linden define el recorrido de su tercer viaje, viaje que llegaría a ser el hecho más importante de su vida como naturalista.

Luego veremos cómo entre los múltiples naturalistas que visitaron nuestro suelo a lo largo del pasado siglo, fue Linden uno de quienes más aportó al conocimiento de la flora nacional y cómo su influencia y sus relaciones con otros naturalistas se centran en el interés por publicar una flora de Colombia. Pero no fue Linden el único en sentir el llamado de la rica flora colombiana. Karl Wilhelm Hermann Karsten sintió la misma atracción y también tuvo como meta la de publicar una flora de Colombia. Es explicable; la pobreza de información botánica era tal, que sobre la Nueva Granada, una muy rica región en especies vegetales, no existía desde la

visita de Humboldt a principios del siglo, publicación alguna, ni siquiera un catálogo de ninguno de los viajeros-coleccionistas en quienes se había despertado el interés por la nación y por su flora.

Karsten, durante su recorrido por Colombia entabló buenos nexos de amistad con Triana, a quien acompañó en sus viajes exploratorios en dos oportunidades, la primera en 1854 cuando recorrieron los alrededores de Bogotá, el suroccidente de Cundinamarca, las llanuras del Tolima y el paso del Quindío, llegando hasta Cartago, desde donde el primero continuó viaje hacia Ecuador. En 1855 hicieron un nuevo recorrido, esta vez en territorio del oriente de Cundinamarca y parte del Meta llegando hasta las llanuras de San Martín. Fruto de esta asociación es la publicación conjunta de varios géneros y especies aparecidos inicialmente en un folleto publicado por Triana en Bogotá y luego redescritos por Karsten en varios artículos publicados en la revista *Linnaea*. Los nexos de amistad entablados entre Triana y Karsten se conservaron con los años; algunas de las cartas cruzadas entre los dos naturalistas cuando Triana residía en París se conservan en los archivos de esta Academia.

El sueño de Karsten se vio coronado con la publicación de las obras "*Plantae columbianae*" (1857), aparecida previamente en fascículos en la revista *Linnaea* y "*Florae Columbiae*" libro publicado en dos tomos editados entre 1858 y 1869.

Jean Jules Linden fue sin duda un hombre importante para la Botánica, no sólo como horticultor de gran calidad, sino como introductor al cultivo de numerosísimas especies, principalmente de orquídeas, razón por la cual fue reconocido en su tiempo como "el Padre de las Orquídeas". En esta oportunidad nos interesa otra de sus facetas, cual es la de viajero, vocación temprana y que le mereció haberse destacado en el primer campo de sus intereses.

Nació Linden en Luxemburgo el 12 de febrero de 1817, pero desde 1830 adoptó la ciudadanía belga. Estudió en la Universidad Libre de Bruselas y recién concluidos sus estudios fue seleccionado para realizar por cuenta de su gobierno viajes exploratorios de índole científica en América. El primero de los mismos se realizó a territorio brasileño entre 1835 y 1837, y al mismo le acompañaron Nicolás Funck y A. Ghiesbreght. Abarcó las provincias de Río, Espíritu Santo, Minas Gerais y São Paulo. En un segundo viaje realizado entre 1837 y 1841 visitó Cuba, México y Guatemala. El tercer y último viaje se llevó a cabo entre 1841 y 1845; en el curso del mismo recorrió Venezuela, Colombia y las Antillas Mayores. Fue este su viaje más exitoso desde el punto de vista científico y hortícola-comercial y el que más satisfacciones le deparó.

En su parte colombiana, el itinerario seguido por Linden e iniciado en la primera mitad de 1842



Figura 1. Jean Jules Linden Luxemburgo 12-febrero-1817  
Bruselas 12-noviembre-1898.

fue el siguiente: ingresa por Cúcuta para seguir a Chinácota, El Chopo y Pamplona. Atraviesa los páramos de San Turbán para caer al Socorro y Vélez y de allí seguir hacia Bogotá donde llega en octubre de 1842; permanece durante dos meses en la Capital explorando sus alrededores, para luego continuar hacia el valle del río Magdalena por la vía de Fusagasugá, Pandi, Icononzo y Melgar; pasa por Espinal, llega a Ibagué y desde allí asciende al Nevado del Tolima; alcanza el nivel de las nieves perpetuas y luego recorre varios páramos de la Cordillera Central tras lo cual regresa a Ibagué para acometer los bosques que rodeaban el Paso del Quindío, el que recorre en varias direcciones herborizando abundantísimo material; concluida esta etapa, desciende hasta Cartago y Buga. El retorno a Bogotá lo hace por Ambalema, Honda y Guaduas. En la Capital coincidió con Carl Theodor Hartweg, quien herborizaba por cuenta de la Sociedad Real de Horticultura de

Londres. En su compañía realizó una excursión a Pacho, localidad donde hallaron por primera vez la *Odontoglossum crispum*, orquídea que produjo millones de francos en los años siguientes, una vez fue comercializada y difundida en Europa. De Bogotá siguió Linden hacia Tunja, atravesó la Provincia de Tundama y por Soatá siguió hacia el páramo de Almorzadero, para luego caer a Pamplona y de allí regresar a Venezuela. Tras unos meses retornó a Colombia por la vía marítima, desembarcando en Riohacha, para desde allí ascender a la Sierra Nevada de Santa Marta por el camino de Dibulla, Santa Ana, Arhuaco y Taquina. Alcanzó la cota de los 4.800 metros de altitud. Regresó nuevamente a Riohacha en donde se embarcó hacia Kingston en marzo de 1844.

Fue a través de Benjamín Delessert que entraron en contacto Linden y el Barón de Humboldt; este último fue quien sugirió y en parte auspició el viaje a Venezuela y Colombia. Fruto del mismo fueron el libro "Plantae columbianae" preparado por Linden y Planchon, y el dar a conocer al mundo y en particular a los horticultores europeos, la riqueza de una flora prácticamente desconocida, deslumbrante y llena de novedades. Como consecuencia de ello, muchas plantas pasaron directamente del anonimato al cultivo y a su propagación comercial. Como excelente horticultor que fue, no solo coleccionaba exsiccados y semillas, sino que obtenía material vivo para propagación, poniendo máxima atención en las condiciones climáticas y ambientales en las que se desarrollaba cada especie. Esta valiosa información permitió la posterior aclimatación y propagación de más de un millar de orquídeas encabezadas por la hoy popular *Odontoglossum crispum* y por la *Masdevalia lindeni*, una de las tantas especies que llevan su nombre. Además de las orquídeas participó en la propagación de abundantes especies de helechos, palmas, cicadáceas, begonias, marantáceas y araliáceas.

A raíz de su visita a Colombia entabló buenas relaciones con el país en donde tuvo tan buena acogida y al cual representó como Cónsul General en Bruselas entre 1853 y 1867. A él se debe la venida a Colombia de numerosos colectores entre los que sobresalen Nicolás Funck, Louis Joseph Schlim, Gustav Wallis y Wagener. Con él, y por sugerencia de Schlim, a quien Triana encontró herborizando en los alrededores de Ocaña, cuando participaba en el primer viaje de la Comisión Corográfica, se estableció un fructífero intercambio de muestras de plantas por obras botánicas. Sobre este punto retornaremos posteriormente. Por ahora baste señalar cómo a Linden le fue encargada por parte del gobierno belga la preparación de una flora de Colombia, obra que contó con innumerables tropiezos; en determinado momento, propuso, con la intención de completarla, que se le proporcionasen las colecciones que Triana había llevado consigo a Europa. La propuesta incluía el pago por parte del gobierno colombiano de la mitad del costo de impresión

de la obra, a cambio de lo cual debía entregar quinientos ejemplares de una edición en español de dicha Flora.

Finalmente, y por razones que analizaremos luego, no se llegó a un acuerdo entre **Linden**, **Triana** y el gobierno granadino. **Linden** publicó los resultados de su viaje a Colombia en asociación con **Planchon** y a través de dos publicaciones: "Preludia florae Columbiana ou matériaux pour servir à la partie botanique du voyage de J. Linden" (1853) y "Plantae columbianae" en "Troisième voyage de J. Linden dans les parties intertropicales de l'Amérique" (1863). La obra botánica de **Linden** es importante sobre todo desde el punto de vista horticultural; en este campo ocupa un lugar sobresaliente por haber rendido grandes beneficios a la investigación, conocimiento, cultivo y propagación de muchísimas especies y por haber innovado muchas técnicas de invernadero. Su fama como experto en orquídeas fue enorme y muchas fueron las especies por él propagadas y por **Lyndley** descritas bajo el título "Orchidaceae Lindenianae" (1864), como las reseñadas en "Pescatorea", publicación en fascículos realizada por **Linden** en compañía de **Planchon**, **Reichembach** hijo y **Ludemann**.

**Linden** ocupó la dirección del Jardín Zoológico de Bruselas por espacio de 10 años, cargo que dejó a **Schlim** para dedicarse al cuidado de sus propios jardines de Gante y Bruselas. Murió en esta última ciudad el 12 de noviembre de 1898.

Para efectos de la publicación de su flora, **Linden** se había asociado con **Jules Emile Planchon**, quien a pesar de su relativa juventud, gozaba de una merecida fama como botánico y tenía a su haber una excelente preparación académica. Era el botánico francés natural de Ganges; nacido el 21 de marzo de 1823, a los 16 años ya había obtenido el bachillerato en letras, tras lo cual se inició como alumno en una farmacia de Montpellier; alternaba esta actividad con los estudios de medicina y farmacia. En 1841 logró el bachillerato en ciencias y pasó a ser discípulo de **Dunal** y **Saint Hilaire**. Obtuvo la Licenciatura a los 20 años y a los 21 el Doctorado en la Universidad de Montpellier. En París se relacionó con **Joseph Decaisne**, notable botánico belga, Profesor, Académico y co-editor con **Brongniart** de los "Annales de Sciences Naturelles" Fue **Decaisne**, con quien entabló una estrecha y profunda amistad que perduró a lo largo de su vida, quien le orientó, protegió y le colaboró, determinando en buena parte su carrera profesional. Por iniciativa y recomendación de **Decaisne** trabajó al lado de Sir **William Hooker** por espacio de cuatro años en la organización del Herbario de los Jardines Reales de Kew en Inglaterra. En este centro de investigaciones hizo sus primeras publicaciones. En 1848 retornó a París y trabajó por un tiempo al lado de **Decaisne** en el Museo de Historia Natural. De nuevo recomendado por este último fue a trabajar a Gante en Bélgica al lado de **Louis van Houtten** y como

profesor del Instituto Agrícola de dicha ciudad; allí también se desempeñó como editor de la "Flore des serres et de Jardins de l'Europe". Es en Gante donde conoce a **Linden**, con quien emprenderá varias investigaciones y publicaciones conjuntas, una de ellas, la que nos sirve de tema central en esta oportunidad. La flora de la Nueva Granada que finalmente aparecerá bajo el título de "Plantae columbianae", tropezó con múltiples dificultades y se difundió con un retraso de veinte años, luego de permanecer, ya impresa, guardada durante diez y nueve.



A handwritten signature in dark ink, which appears to read "J. Planchon". The signature is fluid and cursive, with a long horizontal flourish extending to the left.

Figura 2. Jules Emile Planchon Ganges 21-marzo-1823  
Montpellier 1-abril-1888.

En 1851 obtuvo **Planchon** en Montpellier el grado de Doctor en Medicina y ganó una cátedra en la Universidad de Nancy. Dos años más tarde fue llamado por su antiguo Maestro, el Dr. **Dunal**, para vincularse a la Cátedra de Historia Natural en la Universidad de Montpellier, ciudad donde también fue Director del Jardín de Plantas. Trabajador incansable, sorteaba con éxito la sobrecarga de ocupaciones, desplegando a la vez diversas actividades



y atendiendo varios frentes. Además de la cátedra, la atención al herbario, las actividades investigativas en el campo de la botánica, la historia y los problemas biológicos, se ocupaba de tareas hortícolas y asuntos administrativos como la visita a las farmacias. Célebre es su descubrimiento del pulgón *Phylloxera vastatrix* Pl., plaga que diezaba los viñedos franceses y el posterior combate para controlarla.

A través de Linden y de Decaisne entró en contacto Planchon con José Jerónimo Triana, joven botánico colombiano recién llegado a París, ciudad a donde había viajado con el fin de confirmar en los herbarios europeos las determinaciones de sus plantas y para redactar un libro sobre las plantas útiles de la Nueva Granada. Luego veremos en detalle estos hechos; bástenos por ahora mencionar que Planchon encontró en Triana un socio mejor capacitado desde el punto de vista sistemático, más conocedor, como es obvio, del territorio colombiano, y poseedor de colecciones botánicas más ricas y representativas que las que podía aportar Linden, cuyo mayor interés, como ya hemos señalado, era obtener materiales vivos, especialmente de orquídeas. Dicho de otra manera, Linden se convirtió en puente de unión entre Triana y Planchon. Con el último, además de la amistad, le unía un convenio para publicar una obra sobre las plantas por él colectadas en Colombia, tarea para la cual había suscrito un contrato con la Corte Belga. En forma nada elegante, y al no llegar a un acuerdo con Planchon y Triana, es dejado al margen, y su obra referente a las plantas colombianas, fruto de su tercer viaje al Nuevo Mundo, se queda en un tomo introductorio, muy interesante por cierto, sobre todo en la parte histórica y biogeográfica, pero magro en contenido sistemático. A su turno y en actitud difícilmente justificable, Planchon deja de lado a su viejo socio en la publicación de la Flora de Colombia y se asocia con Triana; surge así un binomio que se hará famoso a lo largo de varias publicaciones que se recopilarán en tres libros. En estos hechos tuvo que actuar como árbitro y conciliador Decaisne, amigo de los tres implicados en la preparación de la flora y gestor indirecto del "Prodromus florae Novo Granatensis".

Triana, el tercero de los naturalistas comprometidos en la publicación de la flora granadina nació en Bogotá el 22 de mayo de 1828. Realizó estudios en el célebre Colegio del Espíritu Santo que regentaba quien luego sería su cuñado, Lorenzo María Lleras. Cursó los estudios de Medicina y Ciencias Naturales y obtuvo en 1852 el título de Médico en el Colegio Médico de Bogotá. Joven aún entabló amistad con Francisco Javier Matís, último superviviente de la Expedición Botánica promovida y dirigida por Mutis, y de él recibió los primeros conocimientos en la ciencia amable. Muchas veces compartió estas lecciones de botánica con Francisco Bayón, de quien también recibió orientación en sus primeras etapas de formación.

Al ser creada la Comisión Corográfica, su organizador, el coronel Agustín Codazzi, y por insinuación del pintor Carmelo Fernández, le invitó a participar en la misma como responsable de la parte botánica. Se incorporó oficialmente a la Comisión el 10 de diciembre de 1850. Como botánico de ella y a partir de 1851 realizó varios viajes.



*José Triana*

Figura 3. José Jerónimo Triana. Bogotá, 22 -mayo- 1828, París, 31 -octubre- 1890.

Durante 1851 recorrió el norte de Cundinamarca, Boyacá, Santander, Norte de Santander y sur del Cesar. En el curso de este viaje se encontró en Ocaña con Schlim quien colectaba plantas para Linden; en su compañía recorrió los alrededores de esta población y por su insinuación inició con el botánico luxemburgués el intercambio de duplicados de plantas por libros. Parte de los materiales fruto de este primer recorrido se perdió al ser asaltado y robado el correo que transportaba los ejemplares hacia Bogotá. En compañía de Julius von Warscewicz recorrió los alrededores de Bogotá, el suroeste de Cundinamarca, parte del Tolima, el Quindío y el Valle, llegando hasta Buenaventura. Warscewicz prosiguió por vía marítima hacia Guayaquil en tanto que Triana regresó a la Capital.

Durante 1852 y junto con el equipo de la Comisión recorrió el suroeste de Cundinamarca, las

llanuras del Tolima, las montañas del Quindío, Risaralda y Caldas y el sur de Antioquia; el regreso a Bogotá se hizo por la vía de Guaduas. La parte final de este año fue destinada a la organización de las colecciones; no obstante, hizo algunas salidas a los alrededores de la Capital en compañía de Isaac Farwell Holton, quien por la época realizaba un recorrido por el país, tanto en plan de observación como a la búsqueda de plantas.

En el curso de 1853 la Comisión Corográfica llevó a cabo el viaje más largo e interesante desde el punto de vista botánico. El mismo abarcó el suroeste de Cundinamarca, los llanos del Tolima, los Andes del Quindío, el noroeste del Valle, la mitad sur del Chocó incluida la travesía de la Cordillera Occidental, la Costa del Pacífico desde la desembocadura del río San Juan hasta Tumaco, los Andes de Nariño incluyendo las altiplanicies de Túquerres y Pasto y el ascenso a los volcanes Cumbal y Azufral. El regreso a Bogotá se hizo por Popayán y Cali atravesando nuevamente el Paso del Quindío y los llanos del Tolima.

En 1854 recorrió los alrededores de Bogotá en compañía de Karsten, luego de lo cual se dirigieron a los llanos del Tolima y el Paso del Quindío para posteriormente bajar hasta Cartago. Karsten prosiguió su viaje hacia Ecuador y Triana regresó a Bogotá. Hacia la mitad del año debió incorporarse al Ejército del Sur bajo el comando del General José Hilario López, participando así en la contienda civil ocasionada por el golpe de cuartel dado por el General José María Melo. Destinado al Alto Valle del río Magdalena, aprovechó oportunamente los altos de la tropa para herborizar las vertientes del suroccidente de Cundinamarca.

Durante 1855 y ya retornada la normalidad se dedicó con intensidad a herborizar en los alrededores de Bogotá y en las dos vertientes de la Cordillera Oriental en territorio de Cundinamarca y Meta, incluidos el curso del río Sumapaz hasta casi sus fuentes y la provincia del Guavio hasta los Farallos de Medina. La excursión al Meta y zonas aledañas de Cundinamarca fue compartida con Karsten quien ya había regresado de Ecuador.

El año de 1856 se destinó al ordenamiento, clasificación y determinación de las numerosas plantas de su herbario, así como a la preparación de las series de duplicados (algo más de 35.000 exsiccados), que serían llevados a Europa, y a la elaboración de las etiquetas y del respectivo catálogo. El viaje de Triana a Europa se produjo a comienzos de 1857, habiendo sido aprovechadas las primeras etapas del mismo para recoger plantas en las riberas del río Magdalena a partir de Ambalema. En Cartagena se embarcó con destino al Viejo Continente.

Como consecuencia del trabajo adelantado durante los viajes atrás señalados, Triana conformó un riquísimo herbario con cerca de 60.000 exsica-

dos correspondientes a casi 8000 números de colección. El 10. de septiembre de 1856, y en cumplimiento de los contratos suscritos hasta la fecha como botánico de la Comisión Corográfica, hizo entrega formal al Gobierno de una serie del herbario con su respectivo catálogo (el cual tiene fecha de 20 de julio del mismo año). El herbario estaba ordenado en treinta y ocho volúmenes debidamente clasificados de acuerdo con el "Genera Plantarum" de Stephano Endlicher. El Catálogo comprende 196 páginas e incluye información sobre la familia, el género y en muchos casos la especie de cada planta, los nombres vulgares y algunas indicaciones sobre usos y aplicaciones. El Catálogo se guarda con buena parte de sus archivos personales en esta Academia en tanto que la serie de plantas se halla depositada en el Herbario Nacional Colombiano (COL).

Cumplido cabalmente su compromiso y culminados sus estudios y trabajos, resuelve ir a Europa con el fin de perfeccionar sus conocimientos botánicos. Para lograr este fin, suscribe con el gobierno neogranadino un contrato tendiente a realizar en el término de dos años, con base en sus datos de campo y en sus colecciones, y con la ayuda de los herbarios europeos, un libro sobre las plantas útiles del territorio colombiano. Una vez instalado en París, entra en contacto con destacados naturalistas del Museo de Historia Natural, entablando nexos de amistad con varios de ellos. La más importante de estas relaciones es la iniciada con Decaisne, quien además de colaborarle ampliamente influirá en muchas de sus decisiones, entre ellas la de enfrentarse al reto de elaborar una flora de Colombia, requisito previo para poder redactar cualquier libro sobre las plantas útiles.

Como ya se señaló, es a través de Linden y de Decaisne que Triana entra en contacto con Planchon. Una de las primeras cosas que hace el botánico neogranadino una vez instalado en París, es organizar un viaje a Bruselas con el fin de conocer personalmente a Linden; con él ha venido manteniendo un interesante intercambio de plantas por libros y sabe que prepara, como resultado de su viaje, una Flora de Colombia que le es indispensable a Triana para la redacción de su libro sobre las plantas útiles. Allí se entera del retraso sufrido y de los tropiezos y problemas que han impedido la oportuna aparición de la obra de Linden y Planchon. Hace contacto con éste último y entre otros temas plantea la necesidad de contar con una obra general sobre la flora de Colombia, obra esperada por muchos y estrictamente necesaria para la redacción de su trabajo.

Durante sus visitas al Museo de Historia Natural Triana tiene oportunidad de enterarse de los últimos avances investigativos, a la vez que se actualiza bibliográficamente. La expectativa de encontrar en los herbarios y en las bibliotecas las respuestas a todos sus interrogantes se va desvaneciendo, y las

charlas con sus colegas y particularmente con Decaisne, le permiten evaluar el estado del conocimiento acerca de la flora colombiana y la magnitud del problema al cual se ve abocado al no contar con una obra de referencia. En el prólogo del Prodrómus claramente lo señala cuando menciona la ignorancia que tenía en cuanto al número de especies desconocidas que encerraban sus colecciones. Esperaba encontrar en las publicaciones clásicas casi todas las especies, razón por la cual y de buena fe, se había comprometido en la redacción de una obra popular sobre las plantas usuales del país. Los primeros pasos en este estudio le revelan los inmensos vacíos en cuanto a conocimiento de nuestra flora; en lugar de informes publicados y de nociones adquiridas tropezó con lo nuevo y con lo inédito. En los herbarios de París y luego en Kew se encuentra ante nuevas sorpresas que modifican y hacen más complejo el cuadro de su plan original. Hay cosas cuya sola posibilidad las hace obligatorias, y Triana, poseedor de una mente inquieta y con excelentes dotes de investigador, se lanza por la vía más larga y difícil. Acepta el reto de publicar una Flora.

Los primeros contactos entre Triana y Planchon se hacen a través del correo. Luego se reunirán en París, y tras conocerse personalmente harán el análisis de los pros y los contras de la empresa en la cual ya Planchon se halla comprometido. Finalmente deciden enfrentar mancomunadamente la redacción de la Flora, motivo por el cual dejan de lado a Linden. Se trata de una decisión acertada para sus intereses, pero poco elegante y no del todo justificable, actitud claramente perjudicial para el naturalista luxemburgués. Al respecto vale la pena conocer el texto de la carta enviada por Linden a Decaisne el 4 de diciembre de 1858; en la misma anota:

"Mi querido Sr. Decaisne

Recibo a la vez una carta del Sr. Planchon y otra del Sr. Triana anunciándome ambos, que después de haber sometido al arbitraje de Ud. la solución de las dificultades pendientes entre nosotros por el estudio de la Flora Neo Granadina, Ud. ha opinado por el arreglo siguiente:

- 1o. Que el Sr. Triana haría con el Sr. Planchon y sin mi participación la Flora de la Nueva Granada.
- 2o. Que yo haría por mi parte con el Sr. Planchon un "*choix de plantes*"\*.

Soy el primero en reconocer sus intenciones conciliantes en estas proposiciones y estaría muy contento de poder conformarme con ellas para poner término a nuestras eternas tergiversaciones, pero el "*choix de plantes*" no responde desgraciadamente a las condiciones que me han sido impuestas por el Gobierno Belga, estipulando el Decreto Real una obra en tres volú-

menes por lo menos, gran in-octavo de alrededor de 500 páginas y conteniendo la descripción de las plantas recogidas por mí durante mi viaje a Colombia. Después, y como consecuencia de un arreglo convenido entre los señores Planchon, Triana y yo, en París, yo había propuesto la colaboración del Sr. Triana para hacer conjuntamente con sus materiales una Flora completa de la Nueva Granada. Esta proposición había sido aceptada después de ciertas dificultades y no puedo de ninguna manera presentar un tercer cambio.

Aparte de que el "*Choix de Plantes*" no responde a las condiciones que me son impuestas, no podría entenderlo por otro motivo: el de los gastos a que daría lugar el gran número de láminas coloreadas o aún en negro que deberían acompañar a una obra tal.

No había más que un medio de conciliar los intereses de las dos partes, esto es, de reunir nuestros materiales para la Flora Neo Granadina de la cual hubiésemos publicado dos ediciones, una en español y bajo los auspicios exclusivos del Gobierno de la Nueva Granada y sin mi participación, puesto que el Sr. Triana exige esta condición, la otra en francés se habría hecho bajo los auspicios del Gobierno Belga. Los amores propios de los dos gobiernos hubiesen sido satisfechos, yo habría cumplido las condiciones requeridas y el Sr. Triana habría presentado a su Gobierno, con la mitad de gastos, una obra mucho más completa y por consiguiente de un mayor interés científico.

El Sr. Triana no tenía necesidad ni de su Gobierno ni del Ministro Granadino en París para aceptar esta combinación, teniendo en cuenta que ella respondía a todo lo que se esperaba de él.

En mi opinión, las ventajas de un arreglo semejante son tan manifiestas, que el no reconocerlo es rehusarse a la evidencia.

Si el Sr. Triana rehusa esta combinación ventajosa para él, agradable para el Sr. Planchon y deseable para mí, debo reivindicar mis derechos sobre la colaboración del Sr. Planchon; ellos son más antiguos que los suyos y no veo por qué mi publicación sería sacrificada en el interés de la del Sr. Triana.

El Sr. Planchon está comprometido como yo con el Gobierno Belga, él sabe además que la ruptura de estos compromisos me sumergiría en una situación desastrosa. Ya en la actualidad, huyo de todas las ocasiones de encuentro en presencia del Rey, quien me pregunta cada vez por las noticias de esta publicación; por su lado el Ministro del Interior me ha escrito varias cartas insistiendo. Hasta ahora he logrado darle razones aceptables, pero que será de mí si esta publicación llegara a faltar completamente? Reanudarla con otros sería imposible y todo lo que podría hacer sería salvar una parte de mis descubrimientos confiándolos a monógrafos quienes harían inmediatamente la descripción.

Usted ve pues, mi apreciado Sr., que me es imposible sacrificarme en interés de la obra del Sr. Triana y que nuestro primer proyecto debe ser retomado tal cual era en aquel momento, en que con la llegada del último ha venido a entrabarse.

Mis derechos sobre la colaboración del Sr. Planchon son sagrados. Desde hace años ha recibido adelantos y

\* Selección (N. de A.)

tiene mis materiales en sus manos. No podría llegar actualmente a devolverme los unos y los otros para emprender otra publicación que quitara la prioridad aún a los mismos materiales que le han sido confiados desde hace tanto tiempo. Verdad es que el Sr. Triana, que dispone de todo su tiempo podría serle más útil que yo, pero tratando conmigo él sabía de antemano a que se comprometía y en todos los casos la razón no es de naturaleza como para hacer malograr un contrato.

Mis colecciones de la Nueva Granada son por lo menos tan numerosas como las del Sr. Triana; abstención hecha de mis derechos ya antiguos, no veo entonces el menor motivo de dar preferencia a este último, quien comete un gran error al no adoptar la divisa belga "la unión hace la fuerza". Ganaríamos en esto los dos, así como la obra misma, y estoy convencido que el Sr. Planchon verá la adopción de esta combinación con el más grande placer.

Usted conoce ahora las respectivas posiciones y está en mejor situación para pronunciarse que anteriormente.

Reuniendo nuestros materiales, todo el mundo y la ciencia ganarían, el Sr. Triana el primero, porque los gastos se reducirán considerablemente.

Rechazando mis proposiciones, el Sr. Triana no gana absolutamente nada, y si llega a obtener la colaboración del Sr. Planchon, dejo a usted el evaluar la acción de este último, así como la extensión de la situación en la cual me encontraré frente al Gobierno Belga y frente al país.

El interés que usted me ha testimoniado siempre me hace esperar que empleará su ascendencia sobre nuestros dos amigos para hacerles comprender que nuestro interés reside en un "entendimiento cordial".

Perdóneme, mi apreciado Sr. Decaisne, el importunarle con esta larga carta y le ruego crea en mi eterna gratitud, si tiene a bien emplear su influencia en el interés general como tengo lugar a esperarlo.

En todo caso, sea lo bastante amable para hacerme conocer su opinión y aceptar los afectuosos saludos de su muy devoto servidor

J. Linden"

Retomando el hilo, debemos señalar como al tiempo que surgen nuevas especies, fruto del estudio de las colecciones, se dilata la preparación del libro sobre las plantas útiles y se acorta el tiempo estipulado en el contrato. Simultáneamente cambian las condiciones políticas en Colombia y cambia la meta de Triana, quien decide modificar sus planes originales y propone al Gobierno la realización de una Flora de Colombia, obra que más tarde, y como muestra de la madurez intelectual adquirida llevará el epíteto de "Prodromus". Para dar cumplimiento al compromiso de elaborar esa flora "preliminar" es conveniente asociarse con algún botánico europeo. Los contactos tendientes a lograr un trabajo conjunto entre Triana y Linden no tienen éxi-

to, en buena parte por la dificultad y demora de las comunicaciones entre París y Bogotá. Al no producirse una pronta definición gubernamental acerca de las propuestas hechas por Linden, y al preferirse enfrentar la Flora como una obra de carácter nacional, se da lugar a la situación que se plantea en la carta atrás transcrita.

Finalmente Triana y Planchon llegan a un acuerdo e inician la preparación de la Flora. Los intempestivos cambios de gobierno y la agitada situación política de Colombia dilatan la definición del contrato para la publicación del Prodromus. Entre tanto, los dos botánicos deciden iniciar la revisión taxonómica de las Gutíferas, obra que aparecerá entre 1860 y 1862 bajo el título de "Memoire sur la famille des Guttiferes" en los Anales de Ciencias Naturales y recopilada en forma de libro en octubre de 1861. Otra interesante publicación conjunta de Triana y Planchon es la referente a las brácteas de las Marcgraviáceas publicada en 1862.

Con admirable tenacidad se van superando diferentes problemas; se resuelven simultáneamente aspectos relativos al contrato, al presupuesto y a las pautas editoriales, así como a la definición de especies, al establecimiento de los sinónimos y al esclarecimiento de la nomenclatura. Triana debe resolver sus problemas domésticos y tratar de mantener una condición económicamente estable que se agrava año por año al proliferar su descendencia; al mismo tiempo debe enfrentar los trámites oficiales para definir su situación y dar cumplimiento a sus contratos. Paralelamente tiene la responsabilidad de consultar los herbarios y las bibliotecas de París y de Kew, acopiar información taxonómica y determinar los exsiccados del herbario. Entre tanto, Planchon debe atender la cátedra universitaria, hacer periódicamente las visitas a las Farmacias del sureste de Francia, regentar el Jardín de Plantas de Montpellier y cuidar de sus intereses de viticultor; en lo que hace a la Flora y demás trabajos conjuntos, tiene a su cargo el análisis morfológico, participa activamente en la determinación de especies y tiene a su cargo la redacción de los manuscritos.

Gracias a un abundante intercambio epistolar y a los desplazamientos de uno y otro, ya fuesen hacia París, ya hacia Montpellier, se logra el éxito final de esta empresa mancomunada. La lectura de las cartas intercambiadas pone de manifiesto el gran respeto y la mutua confianza que compartían los dos investigadores. El primer tomo del "Prodromus florae Novo Granatensis" y relativo a las fanerógamas, finalmente apareció, primero en forma de fascículos en los Annales des Sciences Naturelles y luego como libro en 1862. La parte referente a las criptógamas, en la cual Triana sólo hace las veces de coordinador y editor salió a la luz entre 1863 y 1867.

Para concluir este relato dedicado al encuentro entre estos tres naturalistas que se vieron reuni-

COMMISSION CHOROGRAPHIQUE DE LA NOUVELLE-GRENADE.

PARTIE BOTANIQUE.

PRODROMUS

FLORÆ NOVO-GRANATENSIS

PAR

JOSÉ TRIANA,

D. M., Membre de la Commission chorographique de la Nouvelle-Grenade, etc., etc.

ET

J. E. PLANCHON,

D. M., Professeur à la Faculté des sciences et Directeur de l'École de pharmacie à Montpellier.

PARIS

VICTOR MASSON ET FILS,

PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE.

1862

Figura 4. Carátula del primer volumen del *Prodromus*.

dos no sólo por las circunstancias, sino por el interés en la preciosa flora colombiana debemos señalar como Linden y Planchon finalmente publicaron el libro "Plante columbiana", el cual por el retraso en su aparición y por los problemas ya mencionados con que tropezó, no llegó a ser la gran obra profusamente ilustrada y en varios tomos que se había planeado, sino un pequeño tomo de carácter introductorio, carente de ilustraciones. El tipo de obra a

la que Linden aspiraba la produjo Karsten al publicar "Plantae columbiana" (1857) y "Flora Columbianae" (1858-1869). A pesar del aparente fracaso con la flora, Linden fue un hombre importante para la botánica y para Bélgica, su patria adoptiva. Murió en Bruselas el 12 de noviembre de 1898.

Publicados el *Prodromus* y la Memoria sobre las Gutíferas, Triana y Planchon dejaron de trabajar conjuntamente aunque siempre conservaron la amistad que les unió en torno a la Flora. Ambos sobresalieron en sus respectivos campos de actividad. Planchon vio coronada su carrera académica y su obra es ejemplar para su época. Murió en Montpellier el 1o. de abril de 1888.

Triana también logró el éxito en todas las actividades que emprendió. Como botánico se hizo grande y su obra como naturalista es considerable tanto cuantitativa como cualitativamente. Aparte de las publicaciones ya señaladas y de numerosos artículos, elaboró una excelente revisión de la familia de las melastomatáceas aparecida preliminarmente con el título de "Dispositio Melastomatacearum" en 1865 y ampliamente complementada en 1871 con el título de "Les Melastomacées". Con esta publicación culminó su obra en el campo sistemático y se hizo acreedor a una importante distinción. Antes, y en parte subsidiado por el quinólogo inglés Clement Markham, había publicado un interesante libro titulado "Nouvelles études sur les quininas" el cual está ilustrado con facsímiles de las láminas de la Expedición Botánica de Mutis. En 1881 obtuvo permiso para clasificar, determinar y publicar por su cuenta la colección iconográfica de la Expedición. Nunca logró los medios para publicar las láminas, pero sí las clasificó en familias, tribus y géneros siguiendo el Sistema de Endlicher. Además de catalogarlas, elaboró un índice de las mismas y determinó a nivel de género o especie quizás más del 35% de ellas. A partir de 1874 se desempeñó como Cónsul General de Colombia en París, ciudad donde murió el 31 de octubre de 1890.

#### BIBLIOGRAFIA

- DIAZ, S. & A. LOURTEIG, 1989. Génesis de una Flora. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Enrique Pérez Arbeláez 2. Bogotá, 400 pp.



# DEL ELECTRON PERDIDO AL ELECTRON SOLITARIO

## Veinte años de Química Cuántica en Bogotá\*

por

José Luis Villaveces Cardoso \*\*

### Resumen

Villaveces, J.L.: Del electrón perdido al electrón solitario. Veinte años de Química Cuántica en Bogotá. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 425-432, 1990. ISSN 0370-3908.

Se explica el origen de la Química Cuántica en la Universidad Nacional destacándose la influencia del Dr. Marcel Ewert. Se hace un recuento histórico de su desarrollo, se destacan los avances logrados a partir de 1965 y se presentan algunas investigaciones, en particular los procesos de formación de coque a partir de carbones y la aplicación de la espectroscopia de resonancia paramagnética en la interpretación de estos procesos y en la definición del grado de anisotropía.

### I — Marcel Ewert y los electrones perdidos

La Química Cuántica en Bogotá comenzó merced a los esfuerzos de un profesor luxemburgués llegado a Colombia, para radicarse, al terminar la primera mitad del siglo.

Marcel Ewert S. nació en Bruselas en 1910. Estudió química en la Universidad Libre de la misma ciudad e hizo su doctorado en físico-química, en el grupo del profesor Timmermanns. Llegó a Colombia en 1948 y, después de varias vicisitudes, se vinculó en 1962 como profesor de tiempo completo a la Universidad Nacional, donde inició una renovación de la físico-química que dejó profundas huellas y marcó en cierta forma toda la química que en la Nacional se ha hecho desde entonces.

Unos tres años después llegó al convencimiento de que era necesario que en Colombia se estudiara la Química Cuántica y, con un vigor y un entusiasmo inusitados, comenzó a ofrecer cursos electivos en este tema. Cursos en los cuales, con frecuencia, él llevaba tan sólo unas páginas de ventaja a sus alumnos, que pronto formaron un círculo pequeño pero entusiasta a su alrededor.

En el verano de 1969 viajó a Uppsala a participar en el Summer Institute of Quantum Chemistry and Solid State Physics, bajo la dirección del Profesor Per-Olov Löwdin. Este sería el primer y único curso formal de Química Cuántica que recibiría Marcel Ewert durante su vida. A su regreso a Colombia, diseminó las ideas traídas de Suecia, aumentando aún más el entusiasmo y haciendo que otros jóvenes colombianos participaran en el Instituto de Verano en años sucesivos.

Marcel Ewert no era sólo un difusor de ideas nuevas. Era sobre todo un líder de la investigación, un promotor del trabajo científico, un investigador auténtico él mismo. Por esto, si en 1965 dictó el primer curso de Química Cuántica a un reducido

\* Discurso de fondo pronunciado en el recinto de la Academia Colombiana el 25 de mayo de 1988, en sesión pública y solemne, con ocasión de su posesión como individuo de número de la Corporación.

\*\* Grupo de Química Teórica, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

grupo de estudiantes, en 1969 ya estaba en Costa Rica presentando en el Congreso Latinoamericano de Química los resultados del primer trabajo de investigación en el tema, realizado bajo su dirección en Bogotá.

El ejemplo cundió y cuando murió, a finales de 1975, podía mostrar con orgullo una serie de trabajos realizados bajo su inmediata o mediata dirección que mostraban que la Química Cuántica había comenzado a ser una rama activa de la química en la Universidad Nacional de Colombia.

La siguiente lista muestra los trabajos que se presentaron en Congresos y las publicaciones que se hicieron de las investigaciones realizadas en Química Cuántica y áreas relacionadas bajo la dirección de Marcel Ewert.

#### TRABAJOS PRESENTADOS EN CONGRESOS

Febrero de 1969: HERNANDEZ, G., VILLAVECES, J.L. & EWERT, M. "Aplicaciones de la Aproximación  $PI$  a algunos Derivados del Bifenilo" X Congreso Latinoamericano de Química. San José de Costa Rica.

1974: MONZON, M. & VILLAVECES, J.L. "Complejos moleculares entre los nitrofenoles y el bifenilo". I Congreso Nacional de Química Pura y Aplicada. Bogotá.

1974: POVEDA, F.M., DIAZ, J.M. & EWERT, M. "Estudio espectroscópico del hexatiocianoferrato III de amonio" I Congreso Nacional de Química Pura y Aplicada. Bogotá.

Enero de 1975: VILLAVECES, J.L. "Sobre un modelo de las interacciones Solutio-Solvente". Seminario de Química Estructural UIS. Bucaramanga.

Julio de 1976: POVEDA, F.M. & DIAZ, J.M. "Estudio por ESR del hexatiocianoferrato III de amonio". II Simposio Latinoamericano de Resonancia Magnética e Interacciones Hiperfinas. Bogotá.

Septiembre de 1976: VILLAVECES, J.L. & MONZON, M. "Estudio de Complejos Moleculares entre el Bifenilo y los Nitrofenoles por Espectroscopia U.V.". XII Congreso Latinoamericano de Química, Quito.

Julio de 1977: VILLAVECES, J.L. "Forma Simplificada de obtener Polinomios seculares en el método de Huckel". II Congreso Nacional de Química Pura y Aplicada Bogotá.

#### PUBLICACIONES

1971: EWERT, M. "Estudio de Configuraciones Electrónicas mediante la Teoría de Grupos". Rev. Col. Qca. 1, 31.

1971: EWERT, M., NIÑO, L.C., TREJUS DE K.A. & AYUSO, E. "Síntesis, Separación y Purificación de las Fenil-Piridinas". Rev. Col. Qca. 1. 56.

1971: HERNANDEZ, G., VILLAVECES, J.L. & EWERT, M. "Niveles de Energía en algunos compues-

tos del Bifenilo". Rev. de Quim. e Ing. Quim. Costa Rica. 1, 99.

1972: EWERT, M. "Aplicación de la Teoría de las Perturbaciones al Bifenilo y a las Fenilpiridinas". Rev. Col. Qca. 2, 24.

1973: DE LA ZERDA, J., DE MILLERI, P. & VILLAVECES, J.L. "Influencia del Solvente en el Espectro Ultravioleta del 4-Nitrobifenilo". Rev. Col. Qca. 3, 17.

1973: EWERT, M. "Obtención del Punto de Equilibrio de Reacciones en Fase Gaseosa". Rev. Col. Qca. 3. 39

1974: BLUME, C. & EWERT, M. "Aplicación de los métodos mecanocuánticos al espectro de emisión del  $CaI$ ". Rev. Col. Qca. 4, 41.

1974: VILLAVECES, J.L. "Justificación de las fórmulas del método de Huckel para sistemas conjugados". Rev. Col. Qca. 4, 63.

1975: DE LA ZERDA, J., DE MILLERI, P. & VILLAVECES, J.L. "Precise Determination of Absorption in Wide Bands". J. Chem. Educ. 52, 415.

1979: POVEDA, F.M., EWERT, M. & BLANCO, L.H. "Contribución al estudio de la estructura molecular del hexatiocianoferrato III de amonio", Scientiae 1, 63.

#### ¿En qué consiste, pues, esta Química Cuántica?

Desde tiempo inmemorial, la Química aprendió a considerar a las sustancias químicas como formadas por moléculas que a su vez están compuestas por átomos. De la unión de los átomos en las moléculas y de su separación y recombinación en nuevas moléculas nace toda la complejidad de la materia. Esta teoría atómica se convirtió en paradigma dominante durante el siglo XIX, después de Dalton, Gay-Lussac, Cannizaro y Mendeléef entre otros. Sin embargo, quedaban abiertas preguntas tales como cuál era la fuerza que mantenía unidos a los átomos. Por qué ciertos átomos se unen preferencialmente con otros. Por qué ciertas estructuras y ciertas geometrías moleculares son preferidas a otras.

Al llegar el siglo XX, con el descubrimiento del electrón como partícula fundamental, constituyente de todos los átomos, se replanteó la necesidad de entender la estructura atómica. Se hizo evidente ahora que la intuición genial de Prout un siglo antes era correcta, que los átomos estaban formados por partículas más fundamentales que los dotaban de una estructura interna de la cual dependían las propiedades atómicas y por ende de la materia. Al terminar la segunda década de este siglo se había generalizado bastante la concepción de que una molécula puede considerarse como un conjunto de núcleos y electrones y no simplemente como un conjunto de átomos. Los núcleos cargados positivamente y los electrones cargados negativamente interactúan y de este juego de atracciones y repulsiones debe resultar el equilibrio.

Los químicos aceptaban estas ideas y las racionalizaban mediante los fecundos modelos postulados por Lewis entre 1902 y 1923. La tendencia a adquirir ocho electrones —la “regla del octete”— y la tendencia de los electrones a aparearse eran dos reglas cualitativas de gran poder heurístico aunque no pudieran volverse cuantitativas ni parecieran enteramente compatibles con las ideas de los físicos. Estos, por su parte, hacían enormes progresos en el desarrollo de una teoría atómica que explicara los espectros, pero, atrapados en las concepciones primitivas del átomo como un sistema planetario no lograban hacer avances que sirvieran de base real a la química o que explicaran —y esto aún con enormes dificultades— algo más de los átomos que sus espectros de energía.

Al nacer la mecánica cuántica entre 1925 y 1926, alumbrada por los esfuerzos de Heisenberg, de Dirac y de Schrödinger, se dispuso —por fin— de una teoría mediante la cual estudiar correctamente las interacciones entre cargas eléctricas como las que conforman las moléculas.

Al año siguiente, 1927, nacía la Química Cuántica, cuando Heitler y London, estudiando la molécula de Hidrógeno como un conjunto de dos protones y dos electrones interactuando eléctricamente entre sí, lograron explicarla por primera vez.

¿En qué consiste este tipo de explicación? Tomemos el ejemplo de la bien conocida molécula de agua. Todo el mundo sabe que su fórmula es  $H_2O$ , lo cual quiere decir que la molécula está formada por dos átomos de H y uno de O. O mejor, está formada por tres núcleos: dos de carga + 1 y uno de carga + 8 y por diez electrones, de manera que la carga total sea nula. Si se estudia la energía resultante de todas las atracciones entre núcleos y electrones y de todas las repulsiones entre partículas de la misma carga eléctrica, se encuentra que existen ciertas posiciones de las cargas, a corta distancia unas de otras, con energías totales menores que la que se obtendría si estuvieran alejadas a una distancia enorme. En particular, una disposición angular, con los dos hidrógenos separados  $0,957 \text{ \AA}$  del O del vértice y con los dos H formando un ángulo de  $104,5^\circ$  tiene la mínima energía.

Este cálculo —factible sólo utilizando las leyes de la Mecánica Cuántica—, explica muchas cosas de la molécula de agua. Indica, en primer lugar, que es una molécula estable, pues si no lo fuera, la energía para cualquier distancia pequeña sería mayor que la energía de los átomos muy separados. En segundo lugar, el hecho de que la configuración privilegiada sea angulada y no en línea recta, implica que la molécula se comportará como un diminuto dipolo, puesto que las cargas no están repartidas isotrópicamente. En el vértice del oxígeno hay más carga que en el costado donde están los hidrógenos. Así, las moléculas tenderán a atraerse unas a otras en conglomerados. Formarán a temperatura normal

un líquido que requerirá cierta cantidad de energía para que los conglomerados se disocien pasando al estado gaseoso. *Explicamos* así que el agua sea estable y que sea líquida.

Un estudio cuidadoso de las ecuaciones de equilibrio entre las cargas que forman la molécula de agua permite llegar a predicciones cuantitativas de enorme exactitud sobre el comportamiento del agua, llevándonos a *explicar* muchas otras de sus propiedades. Si en un compuesto tan conocido como el agua, la exactitud de estos cálculos sirve sobre todo como verificación de la teoría, el método puede utilizarse para calcular las propiedades de sustancias desconocidas, escasas o muy costosas, de manera que, haciendo los cálculos se puedan conocer en forma más rápida, ágil y barata que en el laboratorio. Se puede, sobre todo, entender el origen de estas propiedades y las relaciones entre ellas. Así se ha ido desarrollando un nuevo tipo de química menos costosa, menos peligrosa, sujeta a reglas más precisas y confiables que las viejas generalizaciones del tipo de la regla del octete. Igualmente, se ha ido haciendo posible “explicar” la química, es decir, reducir la vasta complejidad de las “propiedades químicas, físicas y físico-químicas” de la materia a una sola idea fundamental: *las interacciones eléctricas entre los núcleos y electrones que conforman la molécula, que pueden calcularse mediante la teoría cuántica, lo cual coloca a la Química en el camino de tornarse en una ciencia exacta.*

El desarrollo ha sido, sin embargo, lento por dos razones principales: la primera porque los cálculos implicados en la resolución de las ecuaciones de la energía son suficientemente complejos desde el punto de vista numérico, como para que sólo con el advenimiento de la etapa comercial de los computadores en la década de los sesenta se hubieran podido generalizar. La segunda porque la mayor parte de los químicos tiene una formación en física poco adecuada para entender el formalismo de la mecánica cuántica y, por esta razón a muchos de ellos les parece el lenguaje de la Química Cuántica hermético y esotérico.

La química en Colombia nació del esfuerzo de industrialización que caracterizó a los años treinta y cuarenta. Los químicos se formaron como profesionales liberales de vocación industrial. Cuando, en los años sesenta, los cambios internos y externos de la política nacional hicieron empezar a pensar en la investigación química, esta vocación impuso la exigencia de que las investigaciones pudieran ligarse de manera inmediata con la producción. Con la producción industrial, con la producción agropecuaria o con la producción de resultados que “sirvieran para resolver los grandes problemas del país”.

A los químicos, formados en el lenguaje del laboratorio, acostumbrados a los resultados empíricos y pragmáticos, les parecía extraño el pequeño grupo que estaba más interesado en entender que

en producir y que, guiado por el Dr. Ewert, abandonaba los laboratorios para enfrascarse en el estudio de intrincadas ecuaciones que hablaban de electrones que ya ni siquiera se encontraban en las órbitas en que ordenadamente los habían colocado los científicos de la "belle époque". Para ellos, estos eran despistados "buscadores de electrones perdidos". Con este remoquete, a veces amistoso, con frecuencia burlón, de vez en cuando despectivo, fuimos denominados los primeros discípulos de Marcel Ewert. Por eso, al recordar ya con algo de nostalgia aquellos días, quise recordar en la primera parte de esta conferencia que así comenzamos a hacer Química Cuántica en Bogotá: buscando electrones perdidos.

## II — La formación del Coque y los electrones solitarios

Colombia tiene las mayores reservas conocidas de carbón en Sur América pero mucho de él es de bajo rango, es decir, de difícil utilización en la producción de coque metalúrgico, lo cual plantea un reto a los químicos interesados en sus usos tecnológicos, reto que se agudiza, pues el carbón es una sustancia de composición compleja, formada principalmente por hidrocarburos o derivados de ellos, con una fracción aromática relativamente importante.

Durante el proceso de coquización es sometido a calentamiento en ausencia de oxígeno, con lo cual sufre diversos cambios que se manifiestan inicialmente por el desprendimiento de gases y el paso a una fase semifluida, llamada la *Mesofase*. El calentamiento posterior conduce a una nueva solidificación, que produce los llamados *Semicoques* o, a mayor temperatura, los *Coques*. Eventualmente, si se alcanzan temperaturas del orden de los 3 000°C, se obtiene el grafito.

La estructura del carbón puede ser representada aproximadamente por una "fórmula" global tal como se ve en la Fig. 1, donde zonas aromáticas alternan con zonas alifáticas, incorporando algunos heteroátomos, sin ningún patrón regular. Es un "polímero aperiódico" cuyas fracciones se unen en forma más o menos aleatoria, dependiente del origen y de la historia del material. Los distintos carbones tienen porcentajes variables de fracción aromática, longitudes variables de cadenas alifáticas y cantidades variables de heteroátomos o de metales. Aun carbones provenientes de la misma mina pueden presentar variaciones importantes en estas características.

El grafito, por el contrario, es un cristal molecular altamente ordenado, formado enteramente por capas de anillos aromáticos condensados en una red bidimensional cuya extensión es la del cristal, en el cual se superponen muchas capas de estas, en la forma mostrada en la Fig. 2. El proceso de coquización puede ser visto así como un proceso de ordenación que conduce desde el polímero aperiódico

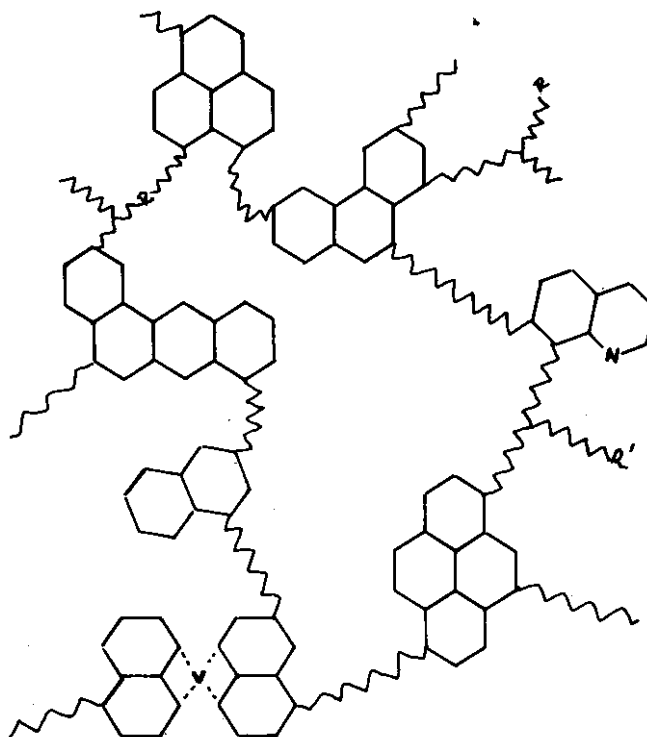


Figura 1. Estructura de la "molécula" de carbón.

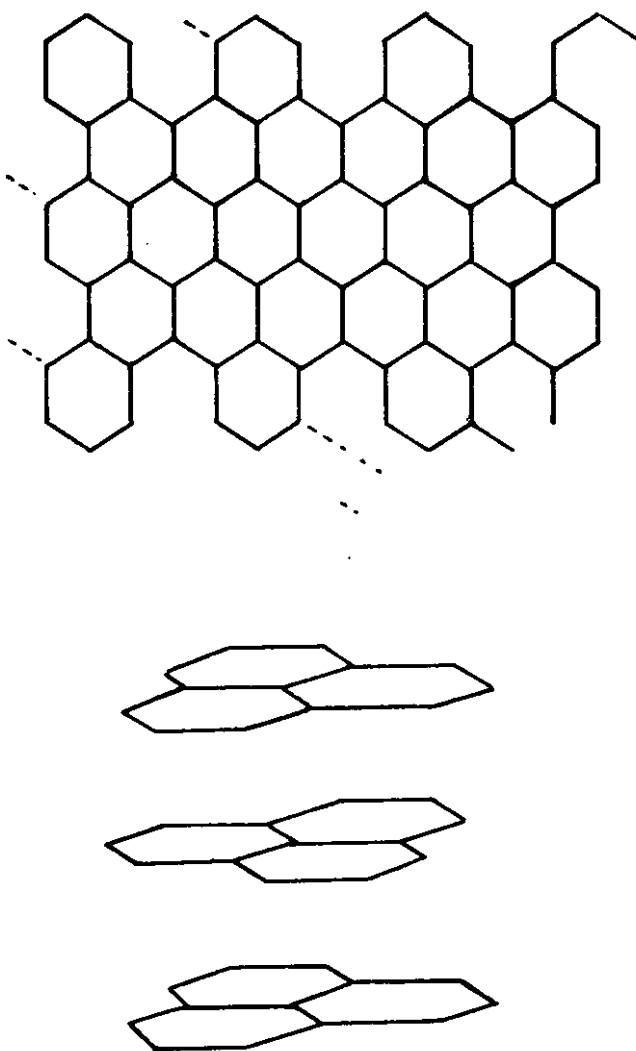


Figura 2. La estructura del grafito.

dico hasta el cristal molecular, como se sugiere en la Fig. 3.

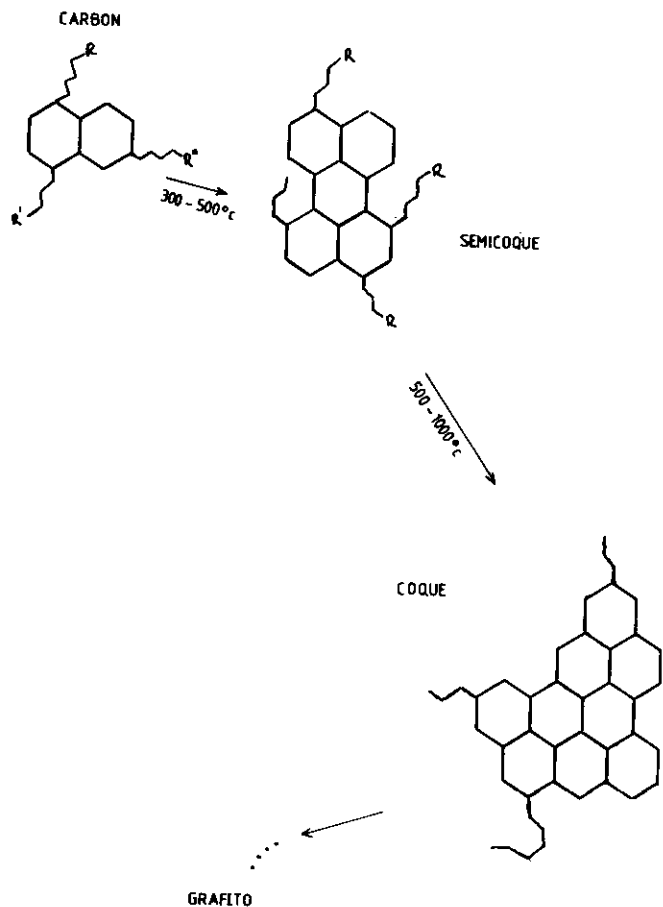


Figura 3. Cambios de estructura en el proceso de coquización.

Los procesos químicos que se presentan al calentar el carbón son extremadamente complejos. Envuelven pérdida e intercambio de hidrógeno, ruptura de enlaces carbono-carbono y formación de nuevos enlaces; pérdida de oxígeno, nitrógeno y azufre, crecimiento de la estructura aromática, copolimerización en múltiples posibilidades, etc., etc. De entre estos procesos nos interesarán, al pensar en la coquización, aquellos que llevan al crecimiento ordenado de las "islas aromáticas", que pueden ser las que eventualmente conduzcan a la formación de coques grafitoides. La mayor o menor facilidad con que el carbón al ser calentado produzca islas de éstas dependerá de su "estructura" original. Aquellos que las produzcan con facilidad y además logren ordenarlas en planos paralelos, serán "carbones fácilmente coquizables".

Si entendiéramos los complejos procesos químicos involucrados, podríamos mejorar la coquizabilidad de los carbones, controlando la físico-química del proceso o adicionando aditivos apropiados. Mucha investigación sobre este tema se ha desarrollado en el mundo en los últimos años, pero estamos aún lejos de entender y por lo tanto de controlar estos procesos en su totalidad, aunque la anisotropía resultante de la ordenación y la formación de radicales libres producidos durante este proceso

se han constituido en dos claves de enorme importancia.

Cuando se tiene un sólido completamente desordenado, formado al azar, sus propiedades en todas las direcciones serán en promedio iguales, mientras que en un sólido altamente ordenado, como los coques esquematizados anteriormente, las propiedades no serán las mismas si se las mide en sentido perpendicular a los planos o en sentido paralelo a ellos. La formación de orden se evidencia en estos sólidos cuando, observados con luz polarizada en el microscopio, aparecen zonas de birrefringencia características de anisotropía. La forma en que se desarrollan estas zonas de anisotropía y su comportamiento con la temperatura es una buena indicación del desarrollo de orden a nivel molecular. De hecho, los coques de buena calidad tienen grandes zonas de anisotropía, mientras que la isotropía es indicio de coques de baja calidad.

Estas observaciones con el microscopio se han relacionado con los resultados de espectroscopia de Resonancia de Espín Electrónico, también llamada de Resonancia Paramagnética de Electrones, nombres ampulosos detrás de los cuales se esconde una noción relativamente simple: Los electrones en la mayoría de las moléculas orgánicas se encuentran apareados (recuérdense los pares electrónicos de Lewis), pero ocasionalmente se encuentra algún electrón desapareado, confiriendo propiedades paramagnéticas al material. El estudio detallado de estas propiedades magnéticas, en particular, la respuesta a una onda electromagnética de frecuencia apropiada cuando el material se encuentra en un campo magnético externo, permite conocer la concentración de electrones desapareados y la posible estructura química con la cual se encuentran asociados. Los materiales carbonáceos tienen siempre electrones desapareados cuya concentración aumenta rápidamente al elevar su temperatura hasta 400 ó 500°C para luego volver a decaer a temperaturas superiores. Varios autores han estudiado detalladamente este fenómeno, colocando los hornos de carbonización en la zona de muestras del espectrofotómetro de espín electrónico.

El Grupo de Química de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia, bajo la dirección de José María Rincón, se ha interesado por esta concentración de "radicales libres", como suele llamarse en química orgánica a los compuestos que tienen electrones no apareados, llegando, gracias a nuestras limitaciones técnicas, a un descubrimiento de singular importancia: mientras que muchos de los radicales libres producidos al calentar desaparecen rápidamente al cesar el calentamiento, una cierta fracción permanece durante horas y aún días después de interrumpir el calentamiento, contra todas las expectativas, pues estas sustancias deberían ser muy inestables. Rincón y sus colaboradores han llamado "atrapados" a estos radicales libres. Su hipótesis es que los electrones desapareados deben estabilizarse en la matriz del carbón de alguna manera,

y que los radicales libres así formados pueden ser en buena medida los promotores del ordenamiento molecular que conduciría a la buena coquización.

Medidas hechas de la cantidad de anisotropía observada en función de la cantidad de radicales libres atrapados formados mostraron que, para concentraciones bajas de radicales libres, había una proporcionalidad casi directa entre la cantidad de radicales atrapados y la anisotropía desarrollada, dando así una formidable corroboración a la hipótesis de la importancia de estos radicales en el proceso de ordenación. (Rincón y colaboradores, 1985).

Ante esta evidencia se hacía indispensable entender el mecanismo de formación de los radicales libres atrapados y su estructura molecular y con este fin entramos en colaboración el Grupo de Química Teórica y el Grupo de Química de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia, combinando los métodos de la Química Cuántica con la observación experimental, para tratar de explicar en qué forma se estabilizan estos radicales, es decir, cómo pueden mantenerse estables los electrones no apareados. Literalmente, nos lanzamos "en busca del electrón solitario"

### III —Carbonización y Química Cuántica: La búsqueda del electrón solitario

El primer ejemplo de aplicación de métodos de Química Cuántica al estudio de procesos de carbonización que hemos encontrado en la literatura es el publicado por Yokono y sus colaboradores en 1979, quienes, a partir de cálculos tipo Hückel (ver, p. ej., Streitwieser, 1961 o Roberts, 1962), proponen un índice para estimar la reactividad de un compuesto en los procesos de carbonización. De acuerdo con ellos, un compuesto carboniza, es decir, deja un residuo sólido negro cuando es calentado, si tiene un índice de valencia libre superior a 0,53 en por lo menos una posición. El índice de valencia libre es un parámetro relacionado con la distribución de los electrones en la vecindad de un átomo dado, que mide el grado de saturación de un átomo de carbono en una molécula orgánica.

Un índice de valencia libre cercano a cero indica un carbono muy saturado y por lo tanto muy poco reactivo. A medida que el índice aumenta, la reactividad del carbono frente a los radicales libres lo hace también. En este sentido, el criterio de Yokono respaldaba la hipótesis de que la reactividad frente a los radicales libres es importante para iniciar la carbonización, pero no decía nada sobre el tipo de radicales libres involucrados o sobre cómo se forman.

Comúnmente se supone que los radicales se producen por ruptura de enlaces C—H o C—C, proceso que debe conducir a la formación de radicales SIGMA, altamente inestables y muy reactivos, que una vez formados reaccionan inmediatamente, dan-

do lugar a polimerizaciones desordenadas que no conducirían a la aparición de anisotropía. Parece más factible que en los radicales atrapados, los electrones desapareados tengan carácter PI, que si conduce a estabilización cuando el electrón puede delocalizarse sobre una estructura espacial relativamente extendida.

Varios mecanismos de formación de radicales se sugieren al pensar el tipo de moléculas involucradas, tal como se muestra en la Fig. 4. De estos, los principales candidatos a ser responsables de radicales libres atrapados eran los formados por ionización, puesto que el electrón que se pierde o gana con la ionización debe ser un electrón PI, susceptible de localizarse.

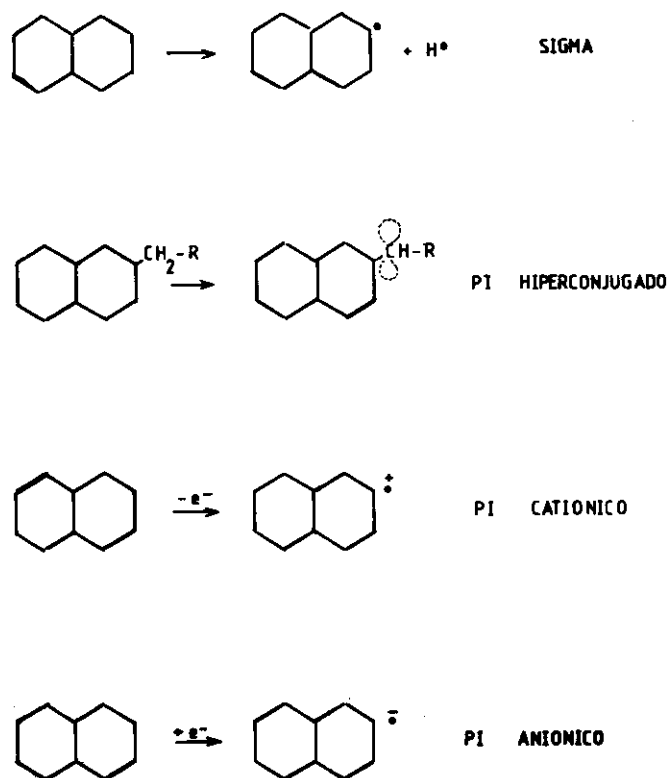


Figura 4. Tipos de radicales libres formados a partir de Hidrocarburos.

Hicimos cálculos de Orbitales Moleculares para estudiar estos radicales ionizados usando el criterio de Yokono, tanto en el nivel elemental Hückel utilizado por ellos como con cálculos más refinados, usando la técnica Doble-Omega de Castro y colaboradores. (Castro y Fernández, 1980; Barberic, Castro y Fernández, 1983a, b).

Los primeros resultados (Castillo, Rojas, 1987; Zárate, 1988; Villaveces, Castillo, Rojas, 1988) fueron halagadores pero no sorprendentes: la mayoría de los compuestos que son reactivos según Yokono forman también radicales ionizados reactivos. Más interesante era constatar que las posiciones reactivas eran las mismas que Yokono predecía, porque ahora podía ser que las conclusiones que él había derivado sobre la reactividad de las moléculas correspondieran igualmente a los iones.

El resultado más interesante fue el concerniente al Criseno que no debe ser reactivo según Yokono y, sin embargo, según nuestro criterio sí debe serlo. En otras palabras, mientras que la molécula neutra no es reactiva, nuestra teoría indicaba que sus iones sí debían serlo. Propusimos a los experimentadores del Grupo de Carbones hacer estudios con esta molécula, tratando de carbonizarla en presencia de catalizadores que indujeran la ionización para confirmar las predicciones teóricas pero, antes de realizar el experimento, encontramos una publicación de Mochida y sus colaboradores (Mochida et al, 1975) quienes habían hallado que el criseno y el pireno, cuando se carbonizan en presencia de  $AlCl_3$ , dejan residuo carbonáceo, con texturas anisotrópicas y evidencia clara de cristales líquidos. No habíamos hecho una predicción, sino una postdición. Sin embargo, lo que ellos consignan apenas como un hecho empírico, en nuestro modelo resulta explicado de manera simple: el tricloruro de aluminio es un conocido ácido de Lewis muy fuerte, es decir, una sustancia que captura electrones con mucha facilidad, por lo cual es fácil que promueva la formación de radicales catiónicos como los que suponemos que intervienen en los procesos de carbonización.

Si los radicales que intervienen en la formación de anisotropía son PI, el crecimiento de la fracción aromática debe efectuarse colocando un anillo SOBRE EL OTRO y no a su lado, para formar un complejo de transferencia de carga, del tipo llamado "Sandwich", (Fig. 5).

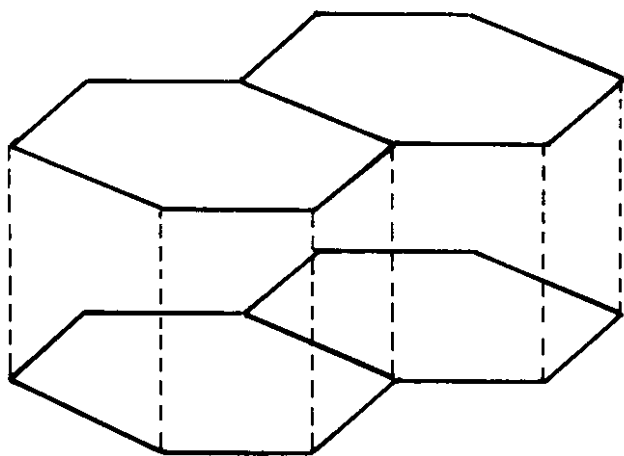


Figura 5. Formación del dímero PI.

Aunque no hemos encontrado en la literatura concerniente a la carbonización ninguna mención explícita a este tipo de complejo, es bien sabido que se forman y, en particular, Sato y Aoyama, encontraron evidencia de formación de complejos de transferencia de carga al calentar en llama abierta algunos hidrocarburos aromáticos. (Sato y Aoyama, 1973). Más interesante aún, estudios muy recientes, basados en observaciones con el microscopio electrónico por Oberlin, indican que, durante la grafitización del antraceno, el orden se va produ-

ciendo por formación de estructuras columnares que crecen a medida que la temperatura aumenta. Las estructuras columnares son un producto muy natural de la polimerización dentro de nuestro esquema de apilamiento de radicales PI, mientras que se explican difícilmente si se piensa en polimerización colateral, (Fig. 6).

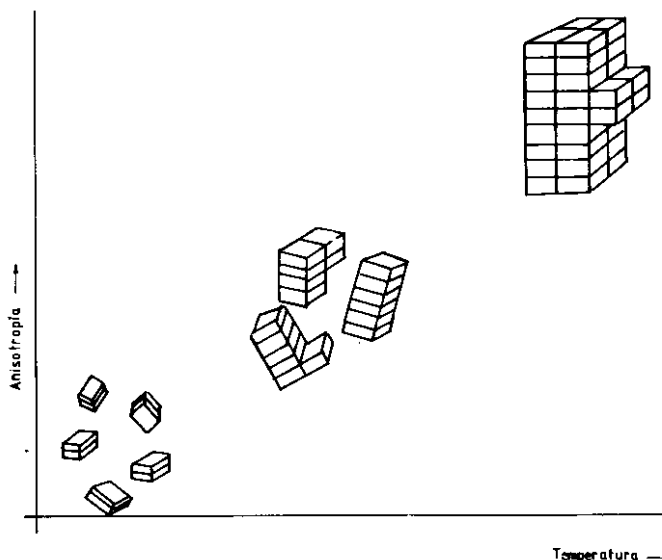


Figura 6. Crecimiento de estructuras columnares.

El estudio teórico del fenómeno de la carbonización nos ha llevado así a postular que en las etapas iniciales de la carbonización, el orden se va produciendo a través de la producción de por lo menos un radical ionizado. Este radical, que tiene una cierta estabilidad, podría formar un complejo de transferencia de carga, dando lugar a un dímero tipo sandwich, en el cual la carga esté más delocalizada y por lo tanto sea más estable. El proceso puede reiterarse para dar un trímero, etc. de manera que se vaya formando una columna que correspondería con las detectadas por microscopía electrónica o que, al crecer más, explicarían las estructuras de mosaico observadas al microscopio de luz polarizada. La carga eléctrica delocalizada sobre toda esta columna sería sumamente estable y no sorprendería encontrar a uno de estos "radicales iónicos columnares" horas y aún días después de haber sido formados. Tenemos así una hipótesis plausible para explicar la estructura de los radicales libres atrapados. Más aún, esta hipótesis explica fácilmente la acción catalítica de los ácidos de Lewis, cuyo papel sería favorecer la formación del ión inicial. (Castillo, Rojas, 1987, Villaveces, Castillo, Rojas, 1988).

En posesión ahora de un modelo que correlaciona una cantidad de información empírica, hemos continuado haciendo cálculos para refinarlo, desarrollarlo y someterlo a prueba. En particular, hemos aplicado la teoría de Fukui del Orbital Fronterizo, (Fujimoto y Fukui, 1980) para comparar diversas parejas de moléculas desde el punto de vista de la facilidad con que darían lugar a la formación de complejos sandwich. Así, hemos llegado a la pre-

dicción (Fuentes, 1988) de que algunas parejas de hidrocarburos al ser mezclados y sometidos a pirólisis, sólo o con catalizadores que promuevan la ionización, deberían producir con facilidad complejos de transferencia de carga.

La Tabla indica cuáles son las parejas de hidrocarburos que, si nuestro modelo es bueno, deberían producir sólidos carbonáceos con bastante anisotropía. Toca ahora a los experimentadores poner a prueba este resultado.

TABLA 1

## COMPUESTOS CON ALTA POSIBILIDAD DE COCARBONIZACION

Catalizador: Base de Lewis					
	Naftaleno	Antraceno	Fenantreno	Naftaceno	Penteno
Naftaleno	V		V		
Antraceno	V	V	V	V	V

Catalizador: Acido de Lewis							
	Naftaleno	Antraceno	Naftaceno	Pentaceno	Benzo-e-Pireno	Benzo-a-Pireno	Perileno
Naftaleno	V		V			V	V
Antraceno		V	V	V	V	V	
Fenantreno	V						
Pireno		V			V		V
Naftaceno		V	V	V	V		

## BIBLIOGRAFIA

- BARBERIC, D., CASTRO, A., & FERNANDEZ, F. 1983a. Rev. Col. Qca. 12, 13.
- BARBERIC, D.; CASTRO, A., & FERNANDEZ, F. 1983b. Rev. Col. Qca. 12, 17.
- CASTILLO, E., & ROJAS, J.A. 1987. Tesis de Grado en Química, Universidad Nacional de Colombia.
- CASTRO A. & FERNANDEZ, F. 1980. Revue Roumaine de Chimie 25, 635.
- FUENTES, M.M. 1988. Tesis de M. Sc. Universidad Nacional de Colombia.
- FUJIMOTO, H., & FUKUI, K. 1980. "Molecular Interactions through Orbitals" en Ratajczak H., Orville-Thomas WJ. (eds) "Molecular Interactions" J. Wiley.
- LEWIS, G.N. 1923. "Valence and the Structure of Atoms and Molecules" The Chemical Catalog Co. Citamos de la reimpression hecha en 1966 por Dover Publications Inc., Nueva York.
- MOCHIDA, L., KUDO, K., FUKUDA, N., TAKESHITA, K. & TAKAHASHI, R. 1975. Carbón 13, 489.
- RINCON, J.M., CARVAJAL, R., & PACHECO, L.A., 1985. FUEL 64, 119.
- ROBERTS, J.D. 1962. "Notes on Molecular Orbital Calculations" Benjamín, Nueva York
- SATO, K., & AOYAMA, Y., 1973. Bull. Chem. Soc. Japan 46, 631.
- STREITWIESER, A. 1961. "Molecular Orbital Theory for Organic Chemists", J. Wiley, Nueva York.
- VILLAVECES, J.L. 1975. "Marcel Ewert: in memoriam". Rev. Col. Qca. 5, 7.
- VILLAVECES, J.L. CASTILLO, E. & ROJAS, J.A. 1988. Fuel, aceptado para su publicación.
- YOKONO, T., MIYAZAWA, K., SANADA, Y. & MARSH, H. 1979. Fuel 58, 692.
- ZARATE, M.J. 1988. Tesis de Grado en Química, Universidad Nacional de Colombia.



# LOS DINOFLAGELADOS, UNA NUEVA HERRAMIENTA PARA EL CONTROL BIOESTRATIGRAFICO DE SEDIMENTOS DEL CRETACEO MEDIO Y TARDIO\*

por

Hernando Dueñas J. \*\*

## Resumen

**Dueñas, H.:** Los dinoflagelados, una nueva herramienta para el control bioestratigráfico de sedimentos del Cretáceo medio y tardío. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 17 (66): 433-440, 1990. ISSN 0370-3908.

Se plantea la utilidad de los quistes fósiles de dinoflagelados en la interpretación de sedimentos de origen cretácico y en la resolución de problemas estratigráficos. Se complementa esta información con una tabla que muestra el estado actual del conocimiento sobre dinoflagelados cretácicos en Colombia.

## Introducción

Las rocas sedimentarias cretácicas en Colombia, presentan sus principales afloramientos a lo largo de la Cordillera Oriental. También afloran en la Sierra de la Macarena y en la Serranía del Perijá. En el subsuelo las rocas cretácicas forman parte importante de los rellenos sedimentarios de las Cuencas del Cesar-Ranchería, Valle Medio y Superior del Magdalena, Putumayo y Llanos Orientales.

La mayoría de los sedimentos cretácicos en Colombia, fueron depositados en ambientes Marinos o Costaneros Bajos. Al examinar bajo el microscopio estos sedimentos es posible observar ricas asociaciones microfaunísticas y microflorísticas (palinológicas) cuyas composiciones varían dependiendo del ambiente en donde los sedimentos fueron depositados y de la edad relativa de los mismos.

En sedimentos depositados en ambientes continentales, las asociaciones palinológicas se caracterizan por abundante presencia de polen y de esporas. A medida que nos acercamos a la costa, disminuye el dominio del polen y las esporas, aumentando la presencia de elementos tales como microforaminíferos, dinoflagelados y acritarcos.

Desde el punto de vista geológico se entiende por palinomorfo todo organismo presente en las preparaciones palinológicas no importando si su origen es animal o vegetal, y por Palinología la ciencia que estudia los palinomorfos.

Los dinoflagelados son organismos unicelulares acuáticos, los cuales en las preparaciones palinológicas aparecen como formas translúcidas de morfologías y tamaños diversos.

Sólo unas pocas especies de dinoflagelados recientes se encuentran en aguas dulces. La mayoría vive en aguas salobres y en ambientes marinos en donde junto con las diatomeas, constituyen la masa principal del fitoplancton. El tamaño de estos organismos unicelulares varía entre 7 y 2.000 micrones, sin embargo, son pocos los dinoflagelados que su-

\* Discurso de fondo pronunciado en el recinto de la Academia Colombiana el 17 de mayo de 1989 en sesión pública y solemne, con ocasión de su posesión como individuo de número de la Corporación.

\*\* BIOSS LTDA., Apartado Aéreo 52514, Bogotá, D.E.

peran los 100 micrones. La mayoría son organismos autótrofos fotosintetizadores.

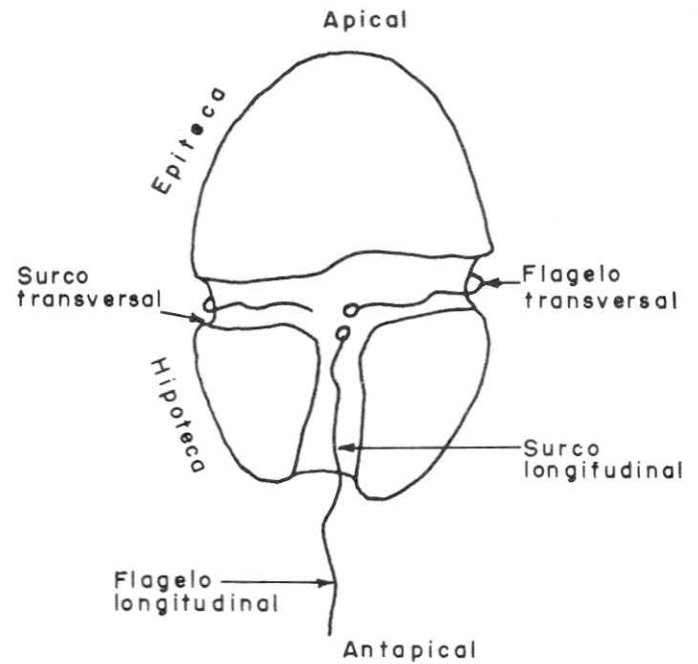
Los dinoflagelados presentan una amplia distribución alrededor del globo terrestre. Sin embargo, su mayor concentración se encuentra en los mares tropicales. El fenómeno natural denominado mareas rojas (red tide), causante de grandes desastres ictiológicos, se debe a grandes concentraciones (más de  $6 \times 10^6$  organismos por un litro de agua) de dinoflagelados tales como *Gymnodinium brevis*, los cuales poseen un color rojo y liberan al agua un veneno letal para los peces (paralytic shell fish poison) ya sea como subproducto del metabolismo, o como un producto de la descomposición de las células muertas. Algunos géneros tales como *Noctiluca*, *Gymnodinium* y *Peridinium* producen secreciones luminiscentes y son responsables de los resplandores nocturnos que observan los marinos en sus travesías.

El nombre dinoflagelado se deriva por la presencia de dos flagelos, los cuales con su movimiento imprimen a estos organismos unicelulares un desplazamiento independiente de forma helicoidal. Uno de los flagelos envuelve el cuerpo central en sentido ecuatorial y recibe el nombre de flagelo transversal. El segundo, se extiende hacia abajo del cuerpo central, casi perpendicular al primer flagelo y recibe el nombre de flagelo longitudinal. El flagelo transversal con su movimiento produce un giro del cuerpo central alrededor del eje longitudinal. El flagelo longitudinal actúa como impulsor (Fig. 1).

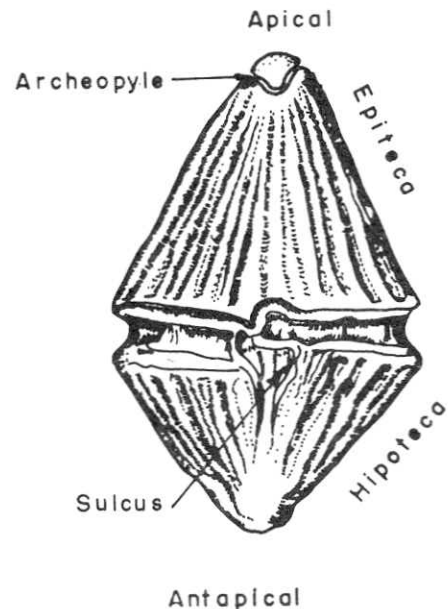
El hecho de ser organismos con movimientos de desplazamiento independientes, entre otras características, es la base para que los zoólogos incluyan a los dinoflagelados dentro del reino animal (Protozoarios). Para los botánicos, el hecho de ser organismos autótrofos fotosintetizadores con presencia de clorofila (clorofila a y clorofila c) en el protoplasma, es base suficiente para incluirlos dentro del reino vegetal (Pyrrophyta). Por tal motivo, el estudio de los dinoflagelados recientes se incluye tanto en tratados de Botánica como de Zoología. Hoy en día, la tendencia generalizada, es la de considerar a los dinoflagelados como algas unicelulares (Cronquist, 1974, Strasburger et al, 1974, E. Salvat 1968, 1978).

Los dinoflagelados recientes poseen un complejo y aún no bien entendido ciclo de vida, el cual incluye estados vegetativos, popularmente denominados estados de movilidad (motile stage) y estados de inmovilidad en los cuales los organismos se enquistan (encysted stage). En este último estado, las paredes de los dinoflagelados son muy resistentes, lo cual favorece su conservación como fósiles dentro de los sedimentos.

Los dinoflagelados que aparecen en las preparaciones palinológicas son en realidad quistes fósiles. Dinoflagelados fósiles se han reportado desde el



*Gymnodinium* sp.



*Dinogymnium acuminatum*  
Cretácico

(Adaptado de Evitt, 1969)

Silúrico (400 millones de años). Durante el Cretáceo Tardío (Campaniano-Santoniano) alcanzan su máxima expansión.

La pared de los quistes fósiles puede resistir sin que se produzca daño en la morfología de las células, el ataque en caliente del Acido Nítrico, del Acido Clorhídrico, y del Clorato de Potasio. Todos estos reactivos químicos son utilizados en la preparación de las muestras palinológicas.

Al igual que las otras herramientas bioestratigráficas, el estudio de los dinoflagelados permite asignar edades relativas y ambientes de depósito a los sedimentos. El estudio de los dinoflagelados fósiles ha demostrado ser de gran valor en la resolución de problemas estratigráficos y ha contribuido a un mejor conocimiento de la geología de los sedimentos marinos, y a la correlación de estos sedimentos con los sedimentos depositados en ambientes continentales.

En áreas tales como las cuencas de los Llanos Orientales, sólo es posible estudiar la secuencia sedimentaria cretácica, analizando en el laboratorio las muestras provenientes de las perforaciones que forman parte de los trabajos de exploración petrolera. En esta cuenca, las secuencias cretácicas se depositaron en ambientes marinos someros y los sedimentos presentan recobros muy pobres o nulos de foraminíferos y ostracodos, mientras que se caracterizan por presentar buenas asociaciones de palinomorfos, especialmente de dinoflagelados, lo cual ha convertido a la palinología en la única herramienta bioestratigráfica que permite asignar edades relativas a estos sedimentos, y al mismo tiempo correlacionar bioestratigráficamente las secuencias cre-

tácicas perforadas por los pozos petroleros con las rocas aflorantes en la Cordillera Oriental.

### Generalidades de los Dinoflagelados

La terminología empleada en la descripción de dinoflagelados fósiles, es básicamente la misma empleada en la descripción de dinoflagelados recientes. (Evitt et al,1977).

En la descripción de los dinoflagelados, muchos términos hacen relación a la orientación de los quistes. Los dinoflagelados poseen un cuerpo central que en la mayoría de los casos es esférico u ovalado y dos flagelos que parten de poros localizados en la parte ventral del cuerpo principal. Uno de los flagelos envuelve el cuerpo en forma ecuatorial (flagelo transversal o ecuatorial) y el segundo, partiendo de la parte central se dirige hacia abajo en forma perpendicular al primer flagelo. Juntos flagelos siguen depresiones en el cuerpo central que reciben los nombres de surco ecuatorial (*cingulum*) y surco longitudinal (*sulcus*) respectivamente (Fig. 2).

El *cingulum* divide el cuerpo central en dos partes, la superior o Epitheca y la inferior o Hypotheca. La dirección del *sulcus* señala la parte inferior de la célula (hypotheca). La cara en donde se encuentra el *sulcus* se conoce como cara ventral y su opuesta como cara dorsal (Figs. 1 y 2).

Los dinoflagelados comúnmente se dividen en dos grupos principales:

1. Dinoflagelados desnudos (Naked dinoflagellates) en los cuales la célula se encuentra envuelta por una película muy fina. Estas formas son comunes en los elementos oceánicos (Fig. 1).

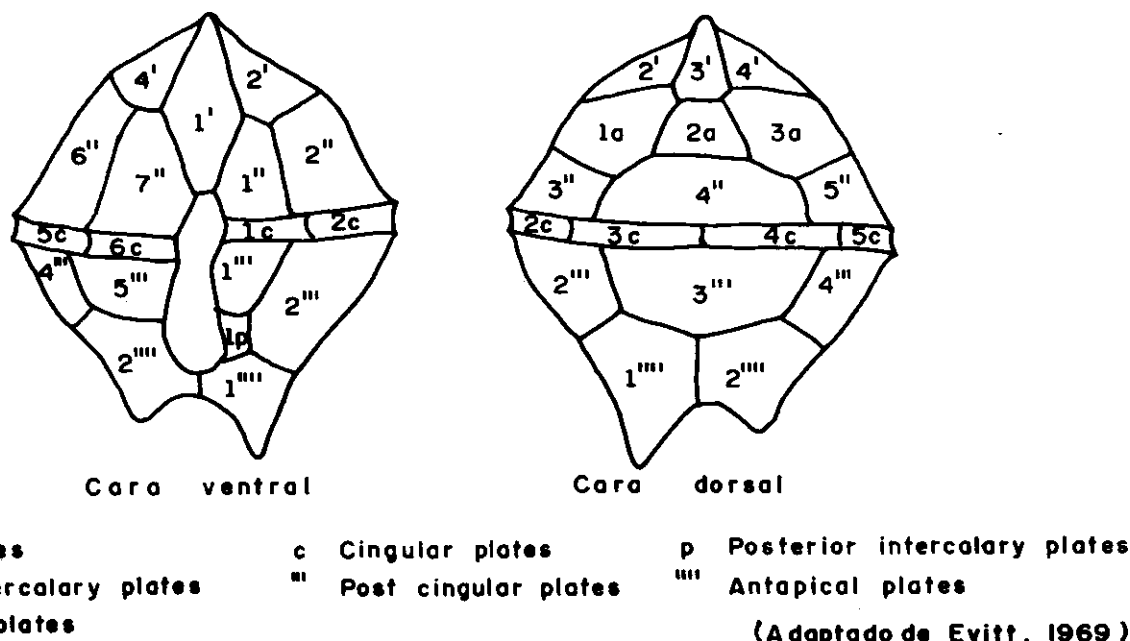


Figura 2. Representación hipotética de un dinoflagelado tecado ilustrando la terminología empleada para las placas que conforman la teca y los símbolos correspondientes. La fórmula de la tabulación para este dinoflagelado es 4', 3a, 7'', 6c, 5''', 1p, 2'''.

2. Dinoflagelados con caparazón o teca (thecate dinoflagellates) en los cuales la célula se encuentra protegida por una capa exterior de naturaleza celulósica más o menos rígida, la cual se encuentra dividida en placas poligonales. Los organismos neríticos por lo general presentan estos caparazones. En muchos casos, tanto los límites entre placas, así como la parte inferior de las mismas, presentan ornamentaciones (Fig. 2).

En la mayoría de los dinoflagelados fósiles es posible observar una apertura de forma regular y siempre localizada en la Epitheca. Esta apertura resulta de la remoción de una o más de las placas poligonales que forman la teca y recibe el nombre de archeopyle (del griego *archoe* = antiguo, *pyle* = apertura). (Evitt, 1961 y 1967).

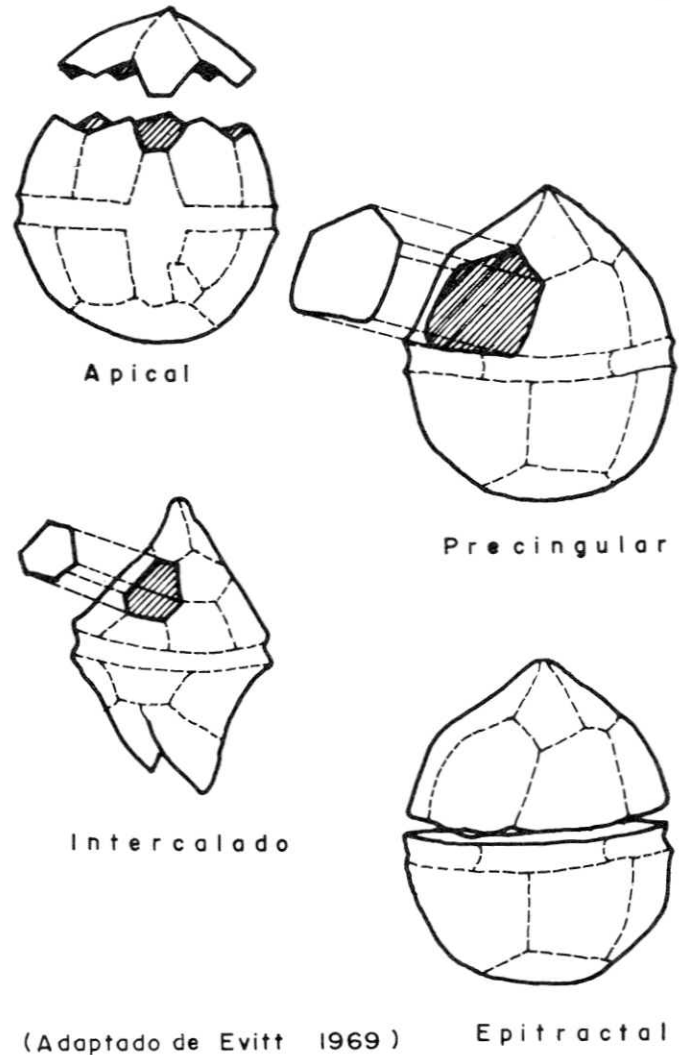
La posición del archeopyle en la Epitheca, así como el número de placas que lo conforman es una característica a nivel de géneros y una de las bases principales para la clasificación de dinoflagelados fósiles. En los dinoflagelados desnudos, aunque no se observan placas definidas, es posible observar que el archeopyle conserva una forma definida que vagamente refleja un patrón de placas.

Dependiendo de su posición en la epitheca, los archeopyle presentan cuatro categorías principales: Apical, Intercalados (Intercalary), Precingular y Epittractal. En esta última categoría el archeopyle está conformado por la totalidad de la epitheca (Fig. 3).

Las placas que conforman la teca presentan un arreglo especial que recibe el nombre de tabulación. La tabulación es considerada como un importante rasgo taxonómico. Las placas se presentan formando círculos paralelos al *cingulum*. Las placas localizadas en la epitheca en contacto con el *cingulum* reciben el nombre de precingulares (precingular plates). Las placas en contacto con el ápice reciben el nombre de apicales (apical plates), y las que no presentan contacto ni con el ápice ni con el *cingulum*, reciben el nombre de intercaladas (intercalary plates). Similar clasificación reciben las placas en la hypotheca en donde es posible encontrar placas Postcingulares, Intercaladas (posteriores) y Antapicales. El *cingulum* también puede encontrarse subdividido en placas, las cuales reciben el nombre de placas cingulares (Fig. 2).

La combinación del número de placas, da como resultado una fórmula, la cual caracteriza a las diferentes especies. Para el caso de la Figura 2, la fórmula es 41, 3a, 7", 6c, 5"', 1p, 2''''

La tabulación es fácilmente apreciable en muchos de los dinoflagelados recientes. En los dinoflagelados fósiles, debido a las alteraciones que sufren las células durante los fenómenos diagenéticos, no siempre es posible observarla y sólo en unos pocos casos se conserva una tabulación completa.



(Adaptado de Evitt 1969)

Figura 3. Diferentes tipos de archeopyle, dependiendo de su posición en la epitheca.

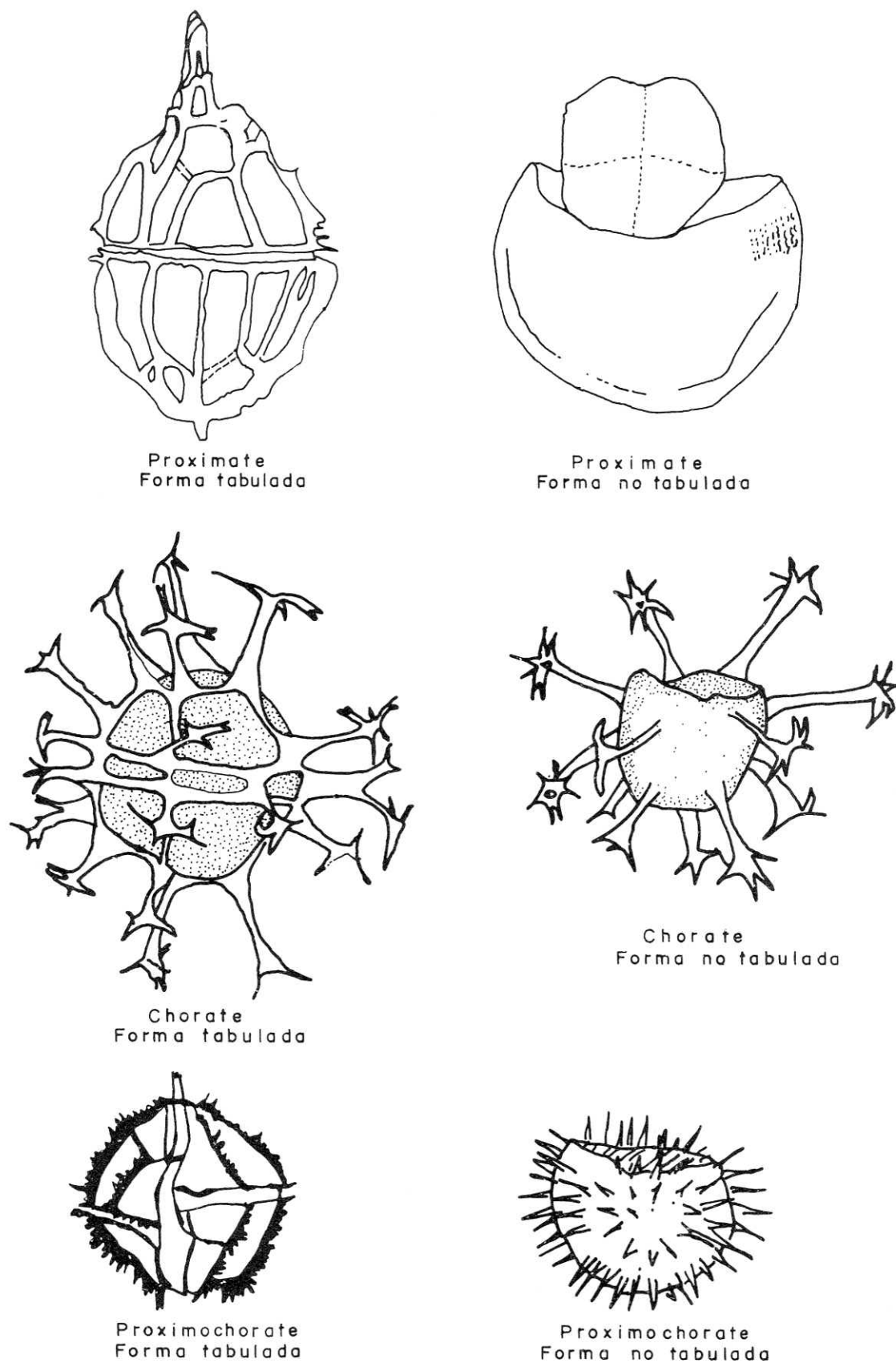
La relación entre el cuerpo principal y el diámetro total, incluyendo la ornamentación, ha recibido el nombre de relación de contracción a la cual se le atribuye un gran valor taxonómico. (Downie & Sarjeant 1966). Teniendo en cuenta la relación de contracción, los dinoflagelados pueden ser divididos en (Fig. 4):

Chorate: quiste en donde la relación de contracción es igual o menor de 0.6

Proximate: quiste en donde la relación de contracción es igual o mayor de 0.8

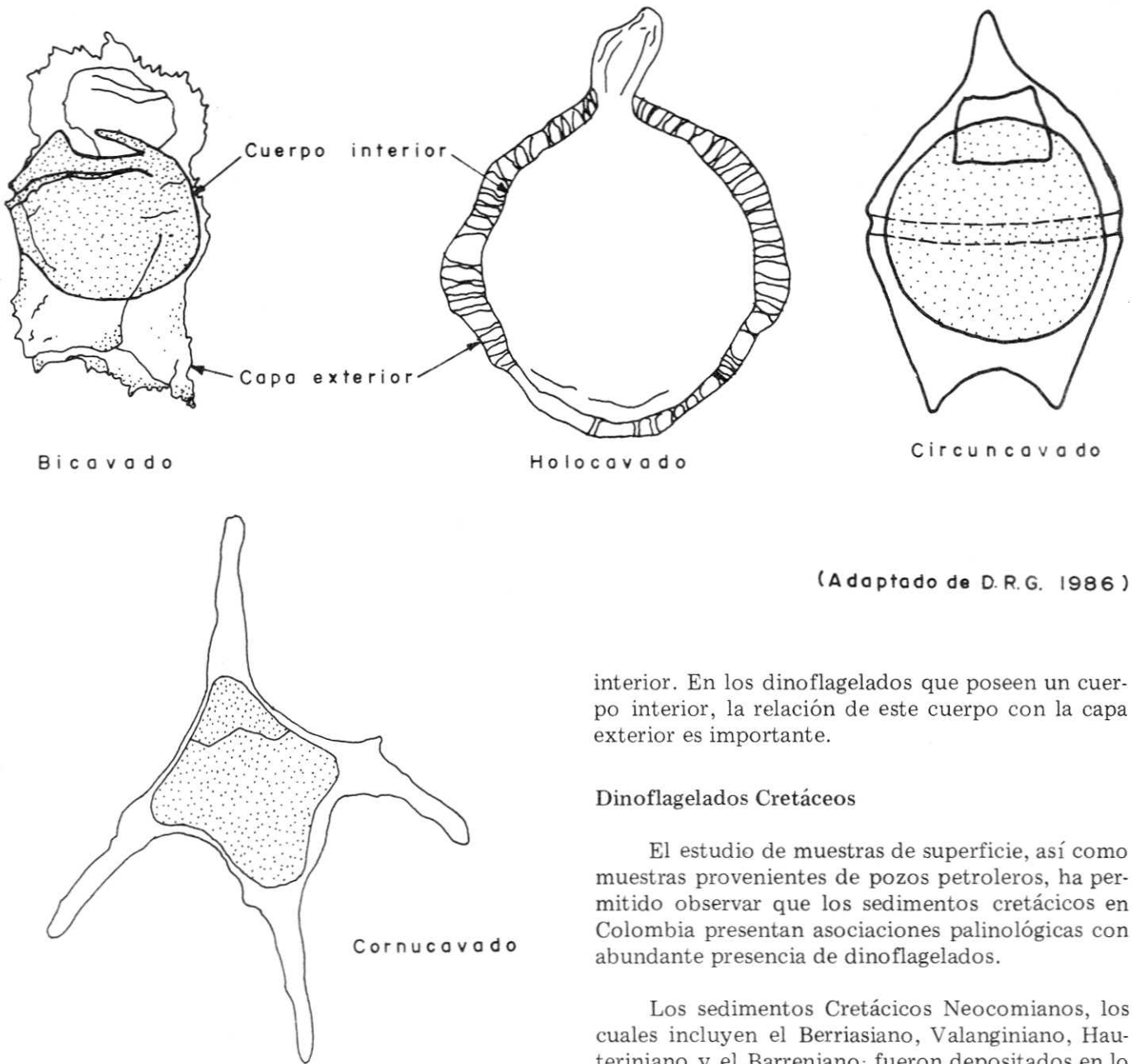
Proximochorate: quiste en donde la relación de contracción está entre 0.6 y 0.8

En algunos dinoflagelados es posible observar la presencia de un cuerpo interior el cual puede estar en contacto o no con la capa exterior. Cuando se presentan espacios intermedios entre el cuerpo interior y la capa exterior, se habla de dinoflagelados cavados (cavate). La forma del cuerpo interior y la localización de los espacios intermedios son la



(Adaptado de D.R.G. 1986)

Figura 4. Clasificación de los dinoflagelados de acuerdo con la relación de contracción.



(Adaptado de D.R.G. 1986)

interior. En los dinoflagelados que poseen un cuerpo interior, la relación de este cuerpo con la capa exterior es importante.

#### Dinoflagelados Cretáceos

El estudio de muestras de superficie, así como muestras provenientes de pozos petroleros, ha permitido observar que los sedimentos cretácicos en Colombia presentan asociaciones palinológicas con abundante presencia de dinoflagelados.

Los sedimentos Cretácicos Neocomianos, los cuales incluyen el Berriasiano, Valanginiano, Hauteriviano y el Barreniano; fueron depositados en lo que se ha denominado la Cuenca de Bogotá, la cual involucra arealmente gran parte de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, y parte del departamento de Santander. Estos sedimentos Neocomianos presentan extensos afloramientos a lo largo de la Cordillera Oriental, siendo los más estudiados geológica y paleontológicamente aquellos que se encuentran a lo largo de las carreteras Tunja-Villa de Leyva y Bogotá-Villavicencio, los cuales se caracterizan por el abundante recobro de megafauna y megaflore. La diversidad de megafauna y en especial la excelente preservación de los Ammonites, han hecho famosos estos sedimentos a nivel mundial.

Palinológicamente, estos sedimentos Neocomianos han sido encontrados estériles, debido principalmente al hecho de haber sufrido una gran diagénesis, lo cual ha producido la carbonización de la materia orgánica y la destrucción de los palinomorfos. Sólo unas muy pocas muestras provenientes de Santander, en donde aparentemente se presentaba el borde de cuenca, arrojaron muy pobres y mal preservadas asociaciones palinológicas en donde sólo

Figura 5. Clasificación de los dinoflagelados cavados teniendo en cuenta la relación que existe entre el cuerpo interior y la capa exterior.

base para una subdivisión entre los dinoflagelados cavados (Downie & Sarjeant 1966) (Figura 5).

Algunos de los dinoflagelados se caracterizan por presentar apéndices mayores que reciben el nombre de cachos (horns) los cuales permiten diferenciarlos a nivel genérico y específico (Fig. 5d). Un gran número de dinoflagelados presenta apéndices menores (processes) los cuales pueden tomar formas varias tales como espinas y cilindros (Fig. 4c y d). El número y la distribución de estos apéndices son de gran valor taxonómico.

La clasificación de los dinoflagelados se basa en su tabulación, en su relación de contracción, forma y posición del archeopyle, forma del cuerpo central, número y posición de los apéndices menores (processes) y presencia o ausencia de un cuerpo





lo era posible observar la presencia de algunas esporas Triletes psiladas sin gran valor estratigráfico.

El control palinológico del Cretáceo en Colombia realmente comienza en el Aptiano. Sedimentos aptianos conforman la base de los sedimentos cretácicos en las cuencas del Putumayo, Valle Superior y Medio del Magdalena, y en la cuenca del Catatumbo, correspondiendo el Aptiano con el inicio de un ciclo transgresivo.

Sedimentos Aptianos-Albianos presentan asociaciones palinológicas caracterizadas por la presencia de *Subtilisphaera perlucida* acompañada de *Spiniferites* sp., *Oligosphaeridium complex*, *Gonyaulacista* sp., *Criboperidinium diaphane* y *Aptea polymorfa* entre otros dinoflagelados. Esta asociación palinológica se complementa con la presencia de *Exisipollenites tumulus* (sedimentos Aptianos), *Callialasporites* gr., *Cicatricosisporites venustus* y la abundante presencia de esporas Triletes psiladas del género *Cyathidites*. Las esporas predominan sobre los granos de polen.

El Albiano-Cenomaniano presenta como dinoflagelados característicos *Xenascus ceratoides*, *Criboperidinium* sp., *Hystrichosphaeridium tubiferum*, y *Microdinium* sp. entre otros. La presencia de *Ephedripites* gr., *Classopollis* gr., *Afropollis jardinei* y formas elateres complementan la asociación palinológica. Aunque el dominio de las esporas triletes continúa, se incrementan en forma notoria las angiospermas. A esta edad, pertenecen los sedimentos cretácicos más antiguos reportados hasta el momento en la cuenca de los Llanos Orientales.

Durante el Turoniano-Coniaciano y parte del Santoniano, se incrementa el número de las especies de dinoflagelados. De estos sedimentos se reporta la presencia de *Canningia* sp. *Chatangiella* sp. *Coronifera oceanica*, *Cyclonephelium distinctum*, *Histrichodinium pulchrum* y *Lejeunecysta* sp., entre otros. El polen más característico de este intervalo es el *Droseridites senonicus*.

El grupo *Dinogymnium* domina las asociaciones de dinoflagelados del Santoniano-Coniaciano. Este grupo lo conforman *D. acuminatum*, *D. cretaceum*, *D. denticulatum*, *D. digitus*, *D. euclaensis*, *D. heterocostatum*, *D. nelsonense*, *D. pustulicostatum* y *D. undulosum*. El género *Dinogymnium* presenta una muy amplia distribución alrededor del mundo. La mayoría de las especies de este género se extinguieron en Colombia al finalizar el Campaniano.

El Campaniano corresponde al período de máxima transgresión del mar Cretáceo en Colombia. Finalizando el Campaniano, se produce una muy rápida regresión.

El Maastrichtiano se caracteriza por la asociación de *Ceratiopsis striata*, *Andalusiella mauthei* y *Palaeocystodinium gabonense* entre otros. En las cuencas del Putumayo, Llanos Orientales, Cesar-Ranchería y Valle Medio y Superior del Magdalena, el Maastrichtiano corresponde a un período regresivo caracterizado por la presencia de sedimentos lagunares marinos y paludales.

La tabla anexa corresponde a la carta provisional de distribución estratigráfica de los principales dinoflagelados Cretáceos. Esta tabla reúne la información estratigráfica disponible hasta el momento por el autor sobre los dinoflagelados cretácicos en Colombia. Es necesario resaltar el hecho de que parte de los rangos estratigráficos asignados a varias especies se basan en información de muestras de pozos petroleros (muestras de zanja), y que por tal motivo, por efecto de material caído, es posible que algunos de estos rangos se encuentren exagerados.

Con esta tabla se pretende solamente mostrar el estado actual de conocimiento sobre los dinoflagelados cretácicos en Colombia. En ningún momento es nuestra intención pretender establecer una zonificación con base en dinoflagelados.

#### BIBLIOGRAFIA

- CRONQUIST, A. 1974. Introducción a la Botánica 4a. Impresión. Compañía Editorial Continental, S.A. México, 800 p.
- DINOCYST RESEARCH GROUP 1986 (D.R.G.). Dinocyst Practical Course. State University of Utrecht. Laboratory of Paleobotany and Palynology.
- DOWNIE, CH., and W.A.S. SARJEANT 1966. The morphology terminology and classification of fossil dinoflagellate cysts, in Studies on Mesozoic and Cainozoic dinoflagellate cysts. British Mus. Nat. History, Bull., Suppl. 3, p. 10-17, Figs. 1-4.
- ENCICLOPEDIA SALVAT De las Ciencias. 1968. Tomo I - Vegetales. Salvat, S.A. de Ediciones, Pamplona, España.
- ENCICLOPEDIA SALVAT. Diccionario. 1978. Tomo 4. Coqui-elec. Salvat Editores, S.A., Barcelona, España.
- EVITT, R.W. 1961. Observations on the morphology of fossils dinoflagellates. *Micropaleontology*, 7 (4): 385-420.
- 1967. Dinoflagellate studies. The archeopyle. Stanford Univ. Pubs. Geol. Sci. 10 (3) 1-83.
- 1969. Dinoflagellates and other organisms in palynological preparations in Aspects of Palynology Edited by Tschudy, R.H. and Scott, R.A. Wiley-Inter-Science.
- EVITT, R.W., J.K. LENTIN, M.E. HILLIQUOD, L.E. STOVER and G.L. WILLIAMS. 1977. Dinoflagellate cyst terminology. Geological Survey of Canada Paper 76-24: 1-11.
- STRASBURGER, E., F. NOLL, H. SCHENCK y A.F.W. SCHIMPER 1974. Tratado de Botánica, Sexta ed. Editorial Marin, S.A. Barcelona, 799 p.



# CLAVES PARA LAS FAMILIAS DE PTERIDOFITOS DE LAS ISLAS DE GORGONA Y GORGONILLA

por

María Teresa Murillo-Pulido\*

## Resumen

Murillo, M. T.: Clases para las familias de Pteridófitos de las islas de Gorgona y Gorgonilla. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 441-444, 1990. ISSN 0370-3908.

Se presentan claves para identificar las familias y géneros representados en estas islas del litoral pacífico colombiano.

## Introducción

Con el fin de ampliar el conocimiento acerca de los helechos y afines (Pteridófitos) que crecen en las islas de Gorgona y Gorgonilla, y de hacer más útil la lista publicada en la anterior entrega de esta Revista (Vol. XVII, No. 65: 277-286, julio de 1989), he creído conveniente publicar las claves para las familias y géneros correspondientes; para aquellas familias representadas por un solo género no se presentan claves a este nivel. Las claves han sido elaboradas de acuerdo con el sistema propuesto por Tryon y Tryon (1982).

### Clave para las familias *Pteridófitos* de las Islas Gorgona y Gorgonilla

- a. Hojas muy pequeñas con respecto al tallo, uninervias.
- b. Plantas heterospóricas ..... 2  
*Selaginellaceae*
- b. Plantas isospóricas ..... 1  
*Lycopodiaceae*
- a. Hojas muy grandes con respecto al tallo, con nervios numerosos.

- c. Esporangios concrecentes, formando sinangios ..... 3  
*Marattiaceae*
- c. Esporangios individuales, reunidos en soros.
- d. Esporangios en involucros bivalvos o urceolados generalmente exertos; frondas regularmente translúcidas, de una célula de grosor ..... 5  
*Hymenophyllaceae*
- d. Esporangios en soros dorsales o submarginales; hojas opacas, de varias células de grosor.
- e. Lámina dicótoma o subdicótoma, pinnas pectinadas ..... 4  
*Gleicheniaceae*
- e. Lámina simple, pinnatisecta, pinnada o más ramificada.
- f. Plantas de porte arborescente, tallo aéreo de 1-6 m alto ..... 7  
*Cyatheaceae*
- f. Plantas de porte herbáceo, rizoma epífito o terrestre, reptante, suberecto o si erecto, hasta ca. 0.50 m alto.
- g. Rizoma veloso con tricomas de 1-2 cm largos ..... 6  
*Metaxyaceae*
- g. Rizoma escamoso, y si veloso los tricomas de menos de 1 cm largos.

\* Académica de Número, Profesora Especial Instituto de Ciencias Naturales - Museo de Historia Natural, Apartado 7495, Bogotá D. E.

- h. Esporas monoletes.
- i. Soros paralelos a lado y lado de la nervadura central de las pinnas o pinnulas ..... 14  
*Blechnaceae*
- i. Soros dispuestos en forma diferente.
- j. Lámina pinnado-pinnatífida o pinnado-pinnatisecta; si simplemente pinnada con venación meniscioide y soros sin indusio; y si 2-3 pinnado-pinnatífida con soros sin indusio .... 10  
*Thelypteridaceae*
- j. Lámina simple, o ramificada en forma diferente.
- k. Rizoma veloso; soro e indusio marginal (*Hypolepis*) frondas 3-4 pinnadas ..... 9  
*Dennstaedtiaceae*
- k. Rizoma escamoso; soro no marginal, con o sin indusio.
- l. Frondas dimórficas; lámina simple, flabelada, pinnada o pinnado-pinnatisecta; las fértiles completamente cubiertas por esporangios ..... 11  
*Dryopteridaceae*
- l. Frondas monomórficas; lámina simple, pinnatisecta, bipinnada, pinnada, o pinnado-pinnatífida.
- m. Lámina simple.
- n. Soros más o menos redondos con o sin indusio.
- o. Con nervios contiguos paralelos o con numerosas aréolas entre las venas primarias, y lámina prolífera en el ápice. .... 11  
*Dryopteridaceae*
- o. Con nervios no contiguos pinnados, o con aréolas, pero entonces lámina no prolífera. .... 15  
*Polypodiaceae*
- n. Soros largos con indusio. .... 12  
*Aspleniaceae*
- m. Lámina pinnada, pinnatisecta o bipinnada.
- p. Soros con indusio, esparcidos.
- q. Venas libres, furcadas; rizoma con numerosos y fuertes estolones ..... 13  
*Davalliaceae*
- q. Venas anastomosadas, con varias venillas incluidas; rizoma sin estolones ..... 11  
*Dryopteridaceae*
- p. Soros sin indusio ..... 15  
*Polypodiaceae*
- h. Esporas triletes.
- r. Esporangios en soros marginales.
- s. Con indusio verdadero extorso ..... 9  
*Dennstaedtiaceae*
- s. Con indusio falso o verdadero introrso ..... 8  
*Pteridaceae*
- r. Esporangios no marginales.
- t. Lámina pinnado-pinnatífida a bipinnado-pinnatífida con esporangios hundidos en indumento ceráceo, o lámina pinnada con esporangios cubriendo todo el envés de pinnas fértiles ..... 8  
*Pteridaceae*
- t. Lámina pinnatisecta; con esporangios situados en el ápice y envés de la lámina o en soros redondos, sin indusio ..... 15  
*Polypodiaceae*

## CLAVE FAMILIA (1) LYCOPODIACEAE

- a. Tallos de ramificaciones iguales; esporas fo-veolado-fosuladas .....  
*Huperzia*
- a. Tallo con ramificaciones diferentes; esporas rugadas .....  
*Lycopodiella*

## FAMILIA (2) SELAGINELLACEAE)

(Un género)

## FAMILIA (3) MARATTIACEAE

(Un género)

## CLAVE FAMILIA (4) GLEICHENIACEAE

- a. Rizoma y axilas de las ramificaciones vellosos .....  
*Dicranopteris*
- a. Rizoma y axilas de las ramificaciones escamosos .....  
*Gleichenia*

CLAVE FAMILIA (5) *HYMENOPHYLLACEAE*

- a. Involucro bivalvo, con receptáculo generalmente incluido .....  
*Hymenophyllum*
- a. Involucro urceolado, con receptáculo regularmente más largo que el involucro .....  
*Trichomanes*

FAMILIA (6) *METAXYACEAE*  
(Un género)FAMILIA (7) *CYATHEACEAE*  
(Un género)CLAVE FAMILIA (8) *PTERIDACEAE*

1. Soros marginales.
2. Soros continuos, protegidos por indusio verdadero .....  
*Pteris*
2. Soros interrumpidos cubiertos por indusio falso .....  
*Adiantum*
1. Soros no marginales
3. Frondas dimórficas o subdimórficas; esporangios cubriendo en su totalidad el envés de las pinnas fértiles .....  
*Acrostichum*
3. Frondas monomórficas; esporangios en soros dorsales, hundidos en indumento ceráceo ....  
*Pityrogramma*

CLAVE FAMILIA (9) *DENNSTAEDTIACEAE*

1. Lámina pinnada o bipinnada, soros con indusio extrorso .....  
*Lindsaea*
1. Lámina 3-4-pinnada, soros con indusio introrso .....  
*Hypolepis*

FAMILIA (10) *THELYPTERIDACEAE*  
(Un género)CLAVE FAMILIA (11) *DRYOPTERIDACEAE*

1. Lámina entera.
2. Frondas dimórficas .....  
*Elaphoglossum*
2. Frondas monomórficas

3. Nervadura libre, furcada; nervios paralelos muy unidos .....  
*Oleandra*
3. Nervadura anastomosada, aréolas con venillas incluidas .....  
*Tectaria*

1. Lámina pinnatisecta, pinnada, bipinnada o flabelada y dicotómicamente dividida.
4. Frondas monomórficas.
5. Lámina pinnatisecta o bipinnada; nervadura anastomosada. ....  
*Tectaria*
5. Lámina pinnada; nervadura meniscioide ...  
*Stigmatopteris*
4. Frondas dimórficas; nervadura libre, furcada.
6. Lámina fértil pinnada.
7. Lámina estéril pinnado-pinnatisecta a pinnado-pinnatífida .....  
*Polybotrya*
7. Lámina estéril simplemente pinnada ....  
*Lomariopsis*
6. Lámina fértil entera; la estéril flabelada y dicotómicamente dividida .....  
*Peltapteris*

FAMILIA (12) *ASPLENIACEAE*  
(Un género)FAMILIA (13) *DAVALLIACEAE*  
(Un género)CLAVE FAMILIA (14) *BLECHNACEAE*

1. Planta herbácea; lámina pinnatisecta .....  
*Blechnum*
1. Planta trepadora; lámina bipinnada .....  
*Salpichlaena*

CLAVE FAMILIA (15) *POLYPODIACEAE*

1. Lámina pinnatífida o pinnatisecta; esporas triletes .....  
*Grammitis*
1. Lámina simple, pinnatisecta o pinnada; esporas monoletes.
2. Frondas subdimórficas .....  
*Micrograma*
2. Frondas monomórficas .....  
*Polypodium*

## BIBLIOGRAFIA

- COPELAND, E.B. 1947. *Genera Filicum, the Genera of Ferns*, Waltham, Mass. U.S.A. Published by the Chronica Botanica Company.
- STOLZE, ROBERT, G. 1976. Ferns and Fern allies of Guatemala, Part I Ophioglossaceae through Cyatheaceae, *Fieldiana Botany* 39.
- 1981. Ferns and Fern allies of Guatemala, Part II Polypodiaceae, the Genus *Elaphoglossum* by John T. Mickel, The genus *Thelypteris* by Alan R. Smith. *Fieldiana Botany New Series*, No. 6.
- TRYON, R. et TRYON A. 1982. *Ferns and allied Plants with special Reference to Tropical America*. Springer — Verlag New York Heidelberg Berlin.

# ESTIOLITOS HORIZONTALES COMO INDICADORES DE PRESIONES TECTONICAS PRETERITAS EN LA PARTE MEDIA DE LA CORDILLERA ORIENTAL COLOMBIANA

por

Adrian E. Scheidegger\* y Jairo Mojica\*\*

## Resumen

Scheidegger, A. & J. Mojica: Estiolitos horizontales como indicadores de presiones tectónicas preteritas en la parte media de la Cordillera Oriental Colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 445-459, 1990. ISSN 0370-3908.

Se establece la orientación de estiolitos horizontales pre a sincinemáticos en unidades silíceas del Cretácico; se deduce un eje de máxima compresión  $\sigma_1$  entre  $311^\circ - 330^\circ$ , congruente con información obtenida del estudio de diaclasas recientes. Los datos conseguidos permiten señalar cómo entre Bogotá y Tunja no se han producido variaciones sustanciales durante el Cenozoico, en tanto que entre Tota y Sogamoso, al parecer, ocurrió una rotación dextral del eje durante el Neogeno.

## Abstract

Horizontal stylolites (H-S) are secondary, intrastratal and directional structures generated by pressure-solution processes under compressional tectonic conditions. H-S resemble small needles whose axis are supposed to develop (to grow) parallel to the direction of maximal tectonic compression ( $\sigma_1$ ). Thus H-S are useful to determine paleo-stress directions; when the age of the horizontal stylolite-bearing rocks and the age of the H-S are known, it is possible to time different compression phases.

The orientation of H-S has been measured at 25 points distributed around the Bogotá-Tunja-Sogamoso Plains (middle Colombian Eastern Cordillera). The H-S occur in several siliceous units of Middle to Upper Cretaceous age, but specially in those made up of cherts and siliceous siltstones (e.g. "Plaeners" of the Guadalupe Group and the La Luna, Hiló and San Rafael Formations).

Comparison of attitudes of the bedding planes and orientation of H-S indicates that last are pre-cinematic to syncinematic, that means prior to or approximately contemporaneous with the "final" andean uplift during Miocene-Pliocene times. However the most part of the H-S may have been generated during earlier Andean compressional phases than those recognized at several places at the late Paleocene.

---

\* Universidad Tecnológica de Viena. Gusshausstr. 27-29. A - 1040 Viena - Austria.

\*\* Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias. Apartado 14490, Bogotá.

In the area of Bogotá-Tunja, the H-S show a very consistent orientation (expressed in azimuths N-E) of  $128^{\circ}$  to  $132^{\circ}$ ; between Sogamoso and Tota, the average H-S orientation turns to  $101^{\circ}$ . Joint measurements conducted some years ago in the northern half of the country indicate a present orientation of  $\sigma_1$  between  $129^{\circ}$  to  $150^{\circ}$ , which approximately corresponds with that obtained from H-S observations in the Bogotá-Tunja region. Consequently, it seems probably that the stress field orientation in this region has not change during Cenozoic times. Otherwise, it could be postulated that during the Neogene the orientation of  $\sigma_1$  in the Sogamoso-Tota area has undergone a dextral rotation from  $101^{\circ}$  to  $130^{\circ} - 150^{\circ}$ .

### Introducción

Los estilolitos son estructuras penetrativas, secundarias e intraestratales, en forma de agujas, conos truncados o pequeñas columnitas (de escala micro a macroscópica) que se desarrollan, ante todo, en rocas sedimentarias, por efectos de disolución diferencial (y concentración simultánea de residuos insolubles) bajo presiones dirigidas —vale decir por causa de fuerzas tectónicas—. Detalles al respecto, cuya discusión está fuera de los alcances de este trabajo, se encuentran en Heald (1955), Wagner (1964), Park & Schot (1968), Trurnit (1968 a y b), Trurnit & Amstutz (1979), Nelson (1983), Bayly (1986), entre otros. Según sea la posición de los estilolitos en relación con los planos sedimentarios, se diferencian dos tipos principales: *verticales* cuando son perpendiculares a la estratificación, *horizontales* cuando son aproximadamente paralelos a ella (v. Mojica 1985: Fig. 5). El eje de los estilolitos ha de ser paralelo a la dirección de máxima compresión ( $\sigma_1$ ); el acortamiento producido en el caso de los estilolitos verticales puede llegar a 8%, mientras en el de los horizontales alcanza hasta 4%.

Los estilolitos verticales (E-V) han de surgir cuando  $\sigma_1$  es vertical, condición que se cumple en sectores sometidos a distensión y fallamiento normal (Mattauer 1976: 375), en momentos tempranos de la diagénesis; empero, algunos autores (e. g. Trurnit 1968b, Schaefer 1980) consideran que los E-V son consecuencia de la sobrecarga litostática propia de áreas sometidas a subsidencia.

Los estilolitos horizontales (E-H) han de ser generados, por efecto de presiones laterales, una vez los materiales han alcanzado una compactación suficiente para transmitir los esfuerzos dirigidos y desarrollar planos secundarios de discontinuidad (fracturas, diaclasas), a partir de las cuales (= superficies estilolíticas) se induzca el crecimiento de los E-H, que puede darse en una o más etapas, ya sea antes, durante, o después del plegamiento de los estratos, distinguiéndose entonces entre E-H precinemáticos, sincinemáticos y postcinemáticos, respectivamente (Plessmann 1972: 341-342).

Entonces, los E-H constituyen una herramienta valiosa para la identificación de las direcciones de esfuerzos tectónicos pretéritos y de sus variaciones en el tiempo, en especial de paleorrotaciones; así mismo, las direcciones de esfuerzos deducidas a

partir de los E-H permiten poner a prueba modelos tectónicos que sugieren movimientos de colisión o rumbo-deslizantes de bloques. Al respecto vale la pena citar aquí los trabajos de Wagner (1964), Beiersdorf (1969), Plessmann (1972), Schaefer (1980), Letouzey & Tremolieres (1980), quienes han determinado con éxito las direcciones de los campos de esfuerzos meso y cenozoicos en los Alpes, las regiones extraalpinas, la cadena de los Montes Atlas. Ultimamente, Subieta et al. (1988) han identificado la presencia de E-H en sedimentitas del Cretácico Superior (Grupo Guayuta) de la región al NE de Venezuela (Serranía del Interior y Subcuenca de Maturín); según dichos autores se trata de "estilolitos tectónicos precinemáticos, al parecer generados durante el "Mioceno Medio". Allí, los E-H indican una compresión esencialmente N-S a NNW-SSE, sin que se hayan adelantado estudios sistemáticos y estadísticos como el presente. De otra parte, la generación de E-H tiene implicaciones económicas ya que: a) según Golf-Racht (1982: 30), la ocurrencia de estilolitos y cementos reprecipitados, en especial cuando son continuos, causa reducción de la calidad de los reservorios hidrocarburiíferos, puesto que actúan como barreras para los sistemas hidrodinámicos, los sistemas de fracturas y los poros intergranulares. b) De acuerdo con Trurnit (1968b), los materiales disueltos durante el desarrollo de los estilolitos migran hacia sectores altos o externos de las cuencas sedimentarias y precipitan en forma de nuevos minerales o incrementan la oferta de los mismos para los organismos; los residuos insolubles, generalmente de color oscuro, pueden elevar la concentración de minerales que originalmente era baja en las rocas que sufren el proceso de estilolitización. Trurnit & Amstutz (1979: 1121) consideran que muchos yacimientos sedimentarios se han formado por este mecanismo.

Con el objeto de estudiar las características y orientación de diversos afloramientos con estilolitos descubiertos previamente por J. Mojica, durante los meses de febrero y marzo de 1983, los autores de esta nota emprendieron varias excursiones por la Sabana de Bogotá y las áreas de Tunja y Sogamoso, que en conjunto conforman el llamado "Altiplano Cundiboyacense", una región más o menos llana en la parte media y central de la Cordillera Oriental de Colombia, a alturas comprendidas entre 2.400 y 2.600 metros sobre el nivel del mar.

Los afloramientos investigados (Fig. 1), que representan cortes de carretera o canteras con fácil

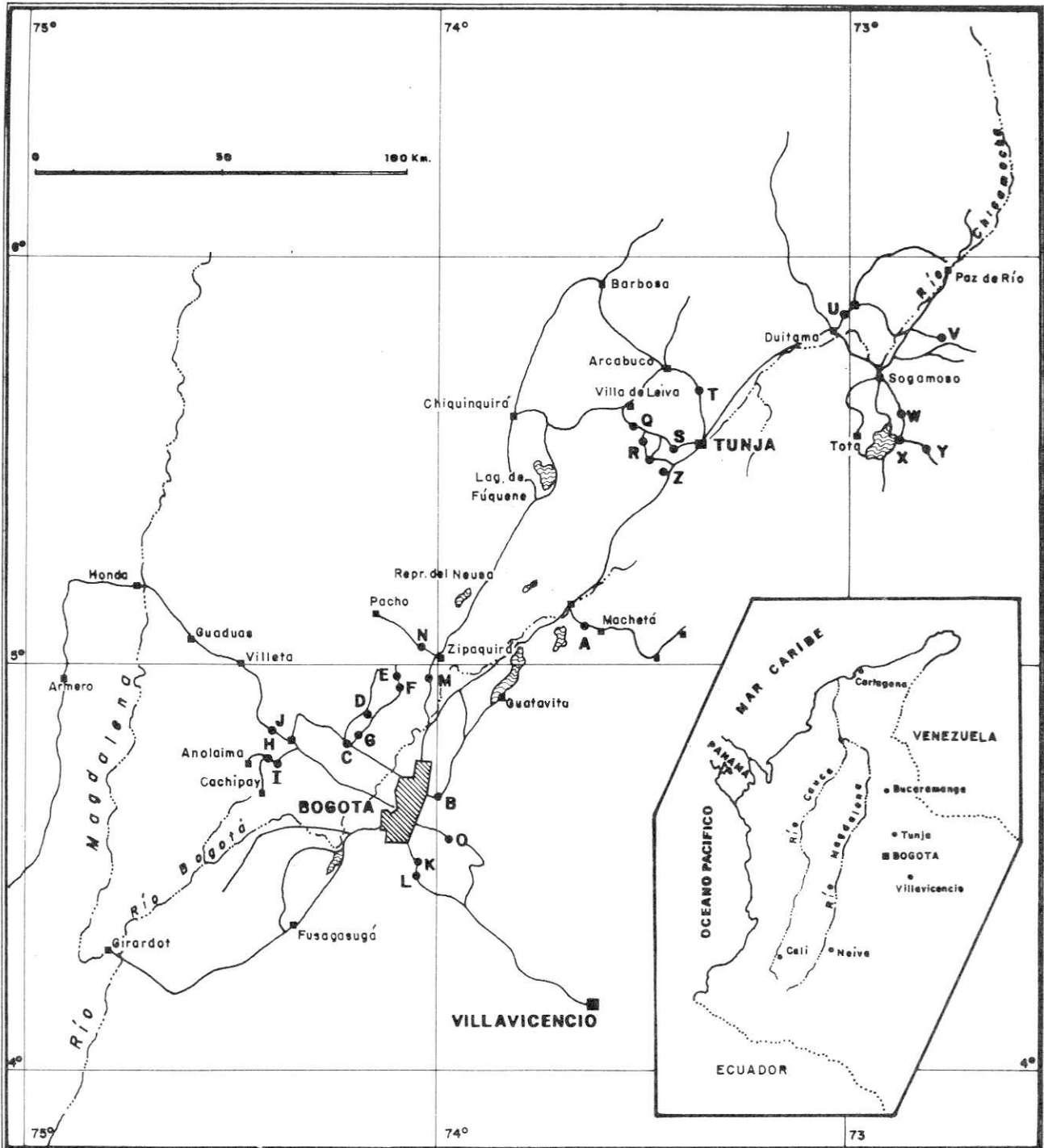


Figura 1. Localización de los afloramientos estudiados.

acceso, fueron marcados con las letras A a Z, sin incluir la P. En dicha figura se notan tres concentraciones: la primera en los alrededores de Bogotá (estaciones B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O); la segunda en la región de Tunja (estaciones A, Q, R, S, T, Z); la tercera en el área de Sogamoso (estaciones U, V, W, X, Y). Se trata de un arreglo que resultó de las posibilidades organizativas de las excursiones; no obstante, los grupos así conformados tienen también significado geológico, como se verá más adelante.

### Aspectos Geológicos

En el Altiplano Cundiboyacense afloran sedimentitas del Meso y el Cenozoico en especial del Cretácico y el Terciario, plegadas durante el Mioceno-Plioceno. En el área de estudio, los estilolitos se han encontrado hasta ahora sólo en capas silíceas del Cretácico que incluyen, en orden de importancia: a) limolitas silíceas y porcelanitas grises a amarillentas, a veces fosfóricas, de los "Plaeners" del Grupo Guadalupe (Coniaciano Superior o San-



toniano a Maestrichtiano Inferior); b) Cherts oscuros, bituminosos de las Formaciones La Luna (Turoniano-Coniaciano), San Rafael (parcialmente Turoniano), Hiló (Albiano) y de la parte alta del Grupo Villeta (Formación Chipaque del Turoniano-Coniaciano); c) Areniscas cuarzosas, grises a blancuecinas, medio a finogranulares, por lo común micáceas de la Formación Une (Albiano) en la región entre Duitama y Sta. Rosa de Viterbo. Los detalles acerca de las características litoestratigráficas de dichas unidades pueden ser consultados en Julivert (1968), Etayo (1968), Renzoni et al. (1983), e Ingeominas (1986). La Fig. 2 muestra un afloramiento representativo de los "Plaeners" del Grupo Guadalupe en la localidad I, mientras que en la Fig. 3 se pueden apreciar los cherts de la Fm. San Rafael en la localidad Q.

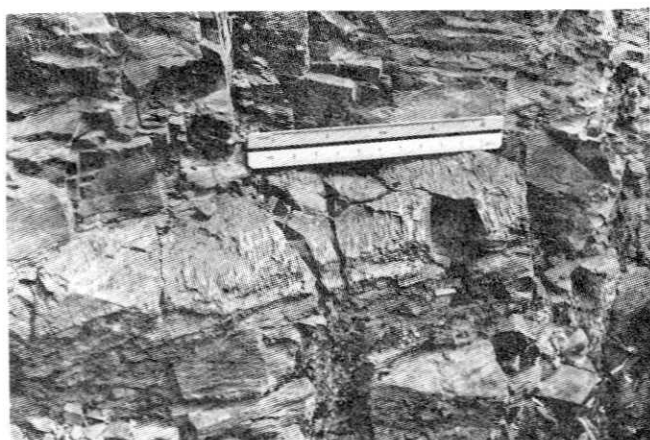


Figura 2. Afloramiento en la parte alta del Gr. Villeta (limolitas silíceas y cherts) con estilolitos horizontales. Localidad I, Zipacón.

Por lo general, cerca de los "Plaeners" se tienen paquetes de areniscas (Fig. 4, Loc. B), a veces con abundantes icnofósiles del género *Thalassinoides* (Figs. 5, 6, 7; Loc. V). Ya que tanto en las areniscas como en los "Plaeners" se presentan diaclasas bien desarrolladas, se aprovechó la oportunidad de medir sus orientaciones, con el fin de comparar-



Figura 3. Cherts del cretácico inferior (Fm. San Rafael) en la localidad Q, Quebrada Churuvita, vía Tunja-Villa de Leyva.

las con las de los E-H. Es de anotar aquí, que en algunas localidades los "Plaeners" presentan macro (Fig. 8, Loc. R) y micropliegues (Fig. 9, Loc. S), claramente disarmónicos con la megaestructura de las areniscas, lo cual indica un grado alto de incompetencia en los primeros.



Figura 4. Areniscas próximas a los "niveles de Plaeners" en la localidad B, vía Bogotá-La Calera.

#### Morfología de los estilolitos

En las localidades investigadas ocurren tanto E-V (e. g. Fig. 10, Loc. V) como E-H (e. g. Fig. 11, Loc. S), de los cuales sólo los últimos se consideraron de interés para el presente aporte. Como se aprecia bien en la Fig. 11, los E-H se manifiestan como agujas de 2 a 3 mm de longitud (excepcionalmente hasta 5 mm) que se proyectan a partir de una superficie más o menos plana (= "superficie estilolítica") y que tienen una contraparte que encaja perfectamente, de tal forma que a una aguja en un lado de la discontinuidad, corresponde un agujero en el otro. En ciertos casos, las superficies estilolíticas muestran un arreglo paralelo, bandeado, de los E-H (Fig. 12, Loc. Q), lo cual al parecer, es reflejo de la laminación original de los sedimentos.

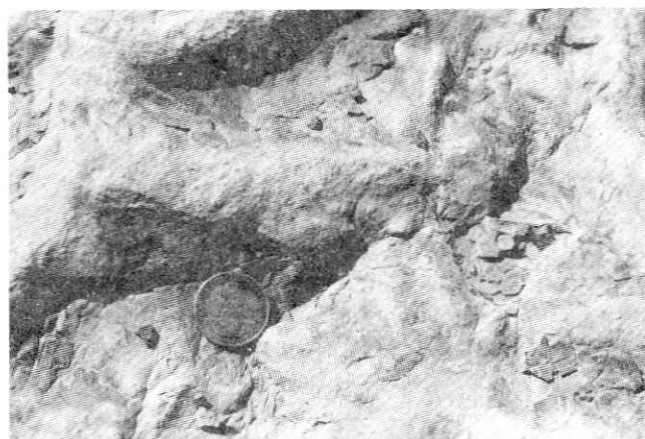


Figura 5. Icnofósiles en la base de una arenisca intercalada en la Fm. La Luna, vía Sogamoso-Gámeza, Localidad V.

Como norma general, se tiene que las superficies estilolíticas en un afloramiento dado son paralelas entre sí, y los E-H perpendiculares a ellas. Sin embargo, en algunos casos, ocurren también superficies estilolíticas con orientaciones variadas (Fig. 13, Loc. H), que han permitido el desarrollo de E-H oblicuos o tangenciales (Fig. 14, Loc. G). Así mismo, en las rocas que contienen los E-H se observa siempre un sistema de diaclasas conjugado (Fig. 15, Loc. C) con el de las superficies estilolíticas; en ocasiones, las diaclasas presentan estructuras en pluma (Fig. 16, Loc. D) o radiales (Fig. 17, Loc. D), las cuales pueden aparecer también, aunque con menor frecuencia, sobre las superficies estilolíticas (e. g. Fig. 18, Loc. Q).

A partir de la frecuencia y el tamaño de los E-H, se pudo determinar en la localidad B un acor-

tamiento lateral de cerca del 3%, donde aparecen 24 superficies estilolíticas por metro lineal, con estilolitos que en promedio alcanzan longitudes entre 1 y 2 mm. Empero, en muchos casos, el acortamiento puede ser mayor, dado que los E-H pueden llegar a 0.5 cm de largo.

#### Evaluación de los afloramientos individuales

Puesto que el objetivo de este trabajo son ante todo los estilolitos horizontales, de los afloramientos estudiados tan sólo se presentan la localización general (Fig. 1) y las características más sobresalientes (unidad litológica, edad, acceso), resumidas en la Tabla 1.

Con el objeto de obtener las orientaciones preferenciales de los E-H, las superficies estilolíti-

TABLA 1

#### Listado de los afloramientos

Localidad y Descripción	Fecha	Unidad Litoestratigráfica y notas
A Vía Chocontá — Machetá, km 13, 2290 m	4 3 83	Capas verticales, Fm. Plaeners.
B Vía Bogotá — La Calera, km 2.5	13 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
C Vía Bogotá — La Vega, km 12, El Cajón	14 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
D 21 km de la vía Bogotá — Subachoque	14 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
E Vía Tabio — Subachoque, km 9, 1860 m	16 2 83	Fm. Plaeners, ejes B $313 \pm 4/11 \pm 4$
F Vía Tabio—Subachoque, 300 m al SE de E	16 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
G Vía Bogotá — Tenjo, finca Chitasugá	16 2 83	Fm. Plaeners, E-H y E-Tangenciales
H 16 km al W de Zipacón, vía a Cachipay	17 2 83	Gr. Villeta, cherts; E-H y E-Tang.
I 13 km al W de Zipacón, vía a Cachipay	17 2 83	Gr. Villeta, cherts negros.
J 48 km al NW de Bogotá, vía a Villeta	18 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
K Divisoria de aguas hacia los Llanos, vía a Villavicencio	19 2 83	Gr. Villeta, shales silíceos.
L 300 m al sur de K	19 2 83	Gr. Villeta, shales silíceos
M Vía Cajicá — Zipaquirá, km 4	21 2 83	Fm. Plaeners, E-H y E-Tangenciales
N Vía Zipaquirá — Pacho, km 5	21 2 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
O Vía Bogotá — Choachí, 3200 m	25 2 83	Fm. Arenisca Dura, cherts; Gr. Guadalupe
Q Q. Churuvita, vía Tunja — Villa de Leyva	2 3 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
R Desvío a Samacá, vía Tunja—Villa de Leyva	2 3 83	Fm. San Rafael, E-H y E-Oblicuos
S Vía Villa de Leyva — Tunja, 10 km al W de Tunja	2 3 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe. Macro y micropliegues, Ejes—B $220 \pm 7/6 \pm 6$
T Vía Tunja — Arcabuco, km 16, 3040 m	2 3 83	Fm. Plaeners, Estilolitos grandes.
U Vía Duitama — Sta Rosa, km 6, 8	2 3 83	Fm. Une, E-H en areniscas cuarzosas
V Vía Sogamoso — Gámeza (24 km al NE de Sogamoso; 2830 m)	3 3 83	Fm. La Luna. Cherts negros E-H, E-V E-Tangenciales.
W Vía Sogamoso — Laguna de Tota, km 11, 2940 m	3 3 83	Fm. La Luna.
X Km 2.5 vía Aquitania — Sogamoso, 3010 m	3 3 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
Y Divisoria de aguas hacia los Llanos (20 km al SE de Sogamoso)	3 3 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe
Z Vía Bogotá — Tunja, Puente de Boyacá	4 3 83	Fm. Plaeners, Gr. Guadalupe

cas y las diaclasas lisas, los datos de las mediciones de campo fueron sometidos a un análisis estadístico que incluye la comparación con una distribución Dimroth-Watson y la determinación, por medio del método de minimización de errores cuadráticos, de los parámetros (direcciones) más aceptables, con los márgenes de error correspondientes. Los resultados de esta labor se muestran en la tabla 2, en la cual las superficies se representan por el azimut de la dirección de buzamiento y el ángulo de buzamiento; los ejes por el azimut de la dirección de inclinación (= dirección de cabeceo) y el ángulo de inclinación (= ángulo de cabeceo).

La inspección de la tabla 2 permite concluir que los estilolitos horizontales aquí estudiados son en general perpendiculares a las superficies estilolíticas y paralelos a las capas; por el contrario, las superficies estilolíticas aparecen perpendiculares a los estratos. En algunos afloramientos con pliegues bien marcados. (e. g. localidades E y S) se pudo determinar la posición de los ejes B.

TABLA 2

Evaluación de los afloramientos individuales

Loc.	Sup. estilolítica	agujas	capas	Diacl. lisas
A	144±17/22± 6	296±23/72±8	293±6/76±6	26±5/83±5
B	130± 4/61± 4	308± 2/30±2	312±4/30±2	47±5/87± 5
C	324± 6/66± 5	142±7/29±6	94±8/35±4	196±20/84±17
D	326± 6/78± 6	133±9/ 5±9	179±19/14± 4	44± 7/78± 7
E	135±10/81± 9	317±9/13±8	indef.	66±15/81±13
F	86± 5/69± 5	266±11/28±10	204± 5/42± 4	19± 6/53±5
G	350± 4/67± 4	165± 4/22± 4	181±12/21± 4	69± 7/78± 7
H	141± 6/63± 6	310± 6/22± 5	293±10/24± 4	216± 5/84± 5
I	298± 7/83± 4	112± 5/ 8± 6	29±24/10± 4	197± 9/80± 8
J	295± 4/66± 4	115± 4/26± 4	121± 9/22± 3	203± 3/89± 3
K	190± 9/52± 7	8±11/40± 8	89± 6/76± 6	350±13/68±12
L	236±10/58± 9	56±10/32± 9	33±12/27± 6	273±32/77±27
M	134±27/67±18	308±12/36± 9	314± 9/35± 5	68±15/79±13
N	106±35/87±26	283±31/23±24	214± 4/37± 3	321±17/72±16
O	104± 4/80± 4	288± 4/19± 4	307±25/11± 5	192± 5/86± 5
Q	309± 5/79± 5	293±19/ 2±20	141±17/17± 5	226± 6/89± 6
R	338± 9/64± 8	137± 6/34± 5	126±11/32± 6	245±11/86±11
S	317± 5/42± 3	132±12/50± 7	L 140± 4/45± 3 R 328±12/44± 8 o 140±13/44±11	48± 3/82± 3
T	324± 6/63± 5	143± 6/33± 5	147±12/31± 6	52± 5/86± 5
U	185± 4/78± 4	355± 6/23± 5	288± 5/44± 4	76± 8/62± 7
V	110±29/50±16	{250±12/34±10 318±20/41±15 or 287±20/43±12	209± 4/46± 3	180±13/71±12
W	{61±14/43± 9 8± 6/89± 6 o 35±18/58±15	263±15/54± 9	286± 3/58± 2	185± 8/70± 8
X	{274±13/77±11 27±25/90± 2 o 276±24/76±16	101± 6/26± 6	87± 6/26± 2	{285±18/66±17 181± 5/90± 5 o 352±18/86±15
Y	260±10/61± 8	71± 7/36± 6	{341± 5/90± 5 146± 4/67± 3 or 156± 7/82± 6	76± 8/67± 8
Z	306± 5/76± 5	125± 6/ 5± 6	115± 9/16± 2	213± 3/86± 3

te la deformación que dio origen a los pliegues pueden haber ocurrido también rotaciones alrededor de ejes verticales, que no dejan una huella clara para su identificación. Por esta razón parece mejor promediar los azimutes de las direcciones de los E—H y esperar que las posibles desviaciones de las direcciones originales se cancelen unas a otras. Con este fin es mejor, entonces, tratar los resultados no en forma individual, sino por grupos, como más adelante se lleva a cabo.



Figura 6. Icnofósiles en la base de una capa de arenisca intercalada en la Fm. La luna. Localidad V vía Sogamoso-Gámeza.

Antes de pasar al capítulo siguiente es preciso mencionar los valores obtenidos en la medición de las diaclasas de control en las areniscas estratigráficamente más próximas (v. tabla 3). Dichos datos, que no pudieron ser obtenidos en todos los casos, fueron procesados estadísticamente por el método de Kohlbeck & Scheidegger (1977) al cual se remite al lector interesado en conocer más detalles.

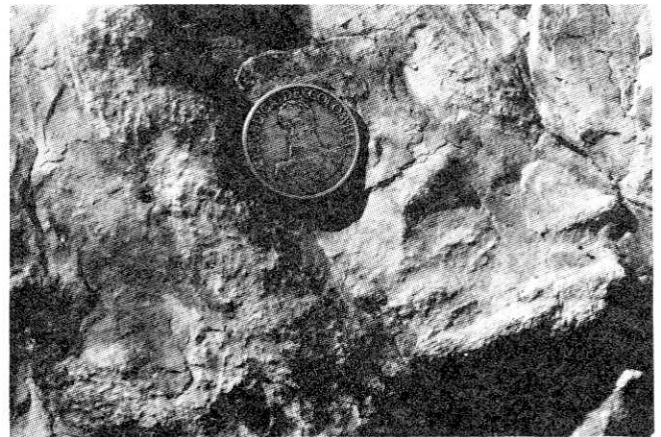


Figura 7. Icnofósiles en una intercalación arenosa de la Fm. La Luna. Localidad V, vía Sogamoso-Gámeza, cota de 2830 m.

De los datos de la tabla 2 y de la Fig. 19 resulta claro que los estilolitos y las superficies estilolíticas son anteriores al plegamiento de los estratos que los contienen. Se podría entonces tratar de "horizontalizar" las capas en cada afloramiento y obtener así la dirección de los E—H antes del plegamiento. Empero, debe tenerse en cuenta que duran-

Evaluación de los grupos de afloramientos

Generalidades. Como ya se indicó en la introducción, los afloramientos estudiados conforman

TABLA 3  
Diaclasas de control en areniscas

Loc.	Máximo 1	Máximo 2	Angulo	$\sigma_1$	$\sigma_3$
B	273 <sub>+</sub> 13/82 <sub>+</sub> 12	164 <sub>+</sub> 16/65 <sub>+</sub> 14	82	287/14	22/20
C	213 <sub>+</sub> 5/68 <sub>+</sub> 4	314 <sub>+</sub> 6/64 <sub>+</sub> 5	90	174/ 3	83/35
G	343 <sub>+</sub> 27/84 <sub>+</sub> 23	93 <sub>+</sub> 14/67 <sub>+</sub> 13	74	215/24	309/10
I	273 <sub>+</sub> 25/89 <sub>+</sub> 21	185 <sub>+</sub> 12/88 <sub>+</sub> 11	88	319/ 0	49/ 2
J	74 <sub>+</sub> 24/85 <sub>+</sub> 18	351 <sub>+</sub> 21/88 <sub>+</sub> 16	83	303/ 3	212/ 5
L	242 <sub>+</sub> 13/82 <sub>+</sub> 13	137 <sub>+</sub> 11/76 <sub>+</sub> 11	78	10/18	279/ 3
M	200 <sub>+</sub> 12/74 <sub>+</sub> 12	105 <sub>+</sub> 10/74 <sub>+</sub> 9	90	242/ 0	333/23
N	84 <sub>+</sub> 26/82 <sub>+</sub> 22	352 <sub>+</sub> 18/88 <sub>+</sub> 17	89	218/ 7	308/ 4
O	68 <sub>+</sub> 16/78 <sub>+</sub> 15	164 <sub>+</sub> 9/72 <sub>+</sub> 8	88	295/22	27/ 4
T	209 <sub>+</sub> 13/86 <sub>+</sub> 13	271 <sub>+</sub> 18/88 <sub>+</sub> 17	62	330/ 2	60/ 4

tres grupos. En cada uno de ellos se calculó la mejor posición estadística de la superficie estilolítica, de los estilolitos sensu strictu, de la estratificación y de las diaclasas lisas. En aquellas localidades donde fue posible, se obtuvo también, como control, la orientación de las diaclasas recientes de las areniscas más cercanas a las rocas con estilolitos horizontales. Los resultados de la evaluación estadística en cuestión se consignan en la tabla 4, y de ellos se derivan los siguientes hechos:

**Grupo Bogotá.** Este grupo está constituido por los afloramientos B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, todos localizados en las colinas que bordean la Sabana de Bogotá. Los valores obtenidos son bien definidos y demuestran que: a) Los estilolitos horizontales tienen un azimut de  $128^\circ$  ( $= 308^\circ$ ) y son perpendiculares a las superficies estilolíticas. b) En promedio la estratificación es casi horizontal, ya que las diferentes inclinaciones medidas se anulan entre sí o dan lugar a una inclinación estadística incierta. c) Las diaclasas lisas son ortogonales a las superficies estilolíticas y paralelas a los estilolitos horizontales, lo cual, en el caso de que fueran contemporáneas con los E-H, permitiría interpretarlas como diaclasas de "compresión" o desgarre paralelo a la dirección de máxima com-

presión. Empero, tales diaclasas son más jóvenes que los E-H, pues ellas son ante todo verticales y no han sido rotadas por el plegamiento. d) Las diaclasas de control en las areniscas vecinas se ajustan bien al esquema de esfuerzos indicado por los E-H, y parecen corresponder con el tipo de diaclasas conjugadas, dado que la dirección de máxima compresión deducida a partir de la teoría de Mohr concuerda exactamente con la obtenida de los E-H, en tanto que la dirección de mínima compresión resulta

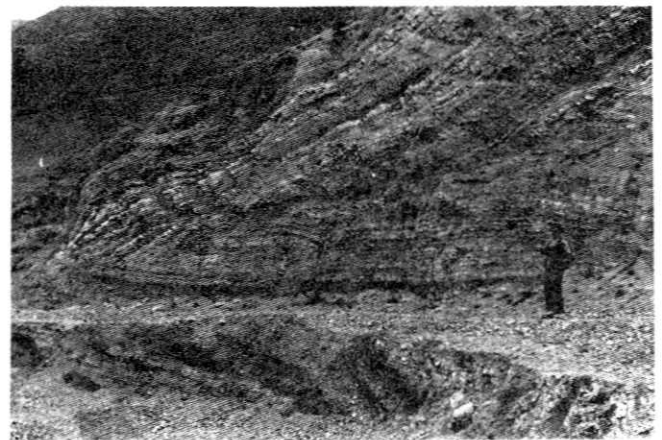


Figura 8. Macropliegues en zig-zag en la localidad R, Samacá, Fm. Plaeners.

TABLA 4  
Grupos

Grupo	Sup. Estil.	capas	Diacl. lisas	Diacl. de Control	Angulo	$\sigma_1$	$\sigma_3$
(1) B - O	131 <sub>+</sub> 5/86 <sub>+</sub> 5	308 <sub>+</sub> 4/ 8 <sub>+</sub> 4	257 <sub>+</sub> 38/ 5 <sub>+</sub> 4	38 <sub>+</sub> 5/85 <sub>+</sub> 4	178 <sub>+</sub> 14/80 <sub>+</sub> 8	84 <sub>+</sub> 17/83 <sub>+</sub> 10	86 311/12 41/2
(2) AQRSTZ	317 <sub>+</sub> 7/64 <sub>+</sub> 8	132 <sub>+</sub> 10/32 <sub>+</sub> 10	134 <sub>+</sub> 12/32 <sub>+</sub> 7	44 <sub>+</sub> 4/88 <sub>+</sub> 4	209 <sub>+</sub> 13/86 <sub>+</sub> 13	271 <sub>+</sub> 18/88 <sub>+</sub> 17	62 330/ 2 60/4
(3) UVWXY	219 <sub>+</sub> 28/90 <sub>+</sub> 19	281 <sub>+</sub> 23/22 <sub>+</sub> 28	301 <sub>+</sub> 11/49 <sub>+</sub> 10	190 <sub>+</sub> 14/81 <sub>+</sub> 12			



normal a las diaclasas “lisas” que acompañan a las capas con E—H. Las conclusiones anteriores se muestran gráficamente en la Figura 19.

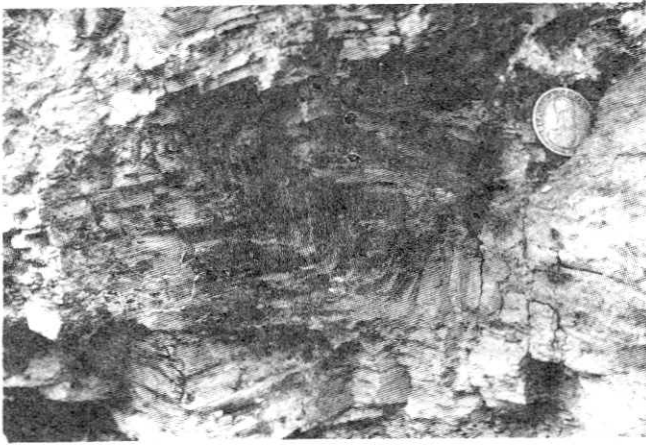


Figura 9. Micropliegues en zig-zag en la localidad R, Samacá, Fm. Plaeners.

**Grupo Tunja-Villa de Leiva.** Comprende los afloramientos A, Q, R, S, T, Z. Los resultados obtenidos son, en principio, similares con los del Grupo Bogotá. Empero, la dispersión de los valores promedio es algo mayor, y la inclinación (o cabeceo) de las agujas estilolíticas, aunque con azimut semejante, resulta en dirección opuesta a la del Grupo Bogotá, según se aprecia en la Fig. 19.



Figura 10. Estilolitos verticales en la localidad V, E de Gámeza.

**Grupo Sogamoso.** Incluye los afloramientos U, V, W, X, Y. Dado que en esta región se encontraron abundantes estilolitos oblicuos y tangenciales, resulta que la dirección promedio de los E—H (Y en la Fig. 19) no es perpendicular con la de las superficies estilolíticas (H en la Fig. 19). Así mismo, la orientación estadística de los E—H tiene un azimut de  $101^\circ$ , en lugar de los  $128^\circ - 132^\circ$  de los Grupos Bogotá y Tunja-Villa de Leiva. Las diaclasas “lisas” son, también aquí, paralelas con las agujas estilolíticas, lo cual permitirá interpretarlas como diaclasas de compresión (“Zerrklüfte”). Debido a que las rocas con E—H en la región de Sogamoso no se pre-

sentan asociadas con areniscas próximas en la columna estratigráfica, no se obtuvieron datos en las diaclasas de control. Los resultados gráficos se muestran en la Fig. 19.



Figura 11. Estilolitos horizontales en la localidad S. Alto de Volador, vía Tunja-Villa de Leyva, Fm. Plaeners.

## Discusión de los Resultados

Los resultados obtenidos de las mediciones adelantadas muestran que en la Sabana de Bogotá los E—H tienen una orientación consistente que varía entre  $128^\circ$  y  $132^\circ$ , y que se interpreta como indicadora de la dirección de compresión tectónica que dio origen a los E—H. En la región de Sogamoso, la dirección preferencial de los E—H es algo diferente, con  $101^\circ$  de azimut E.

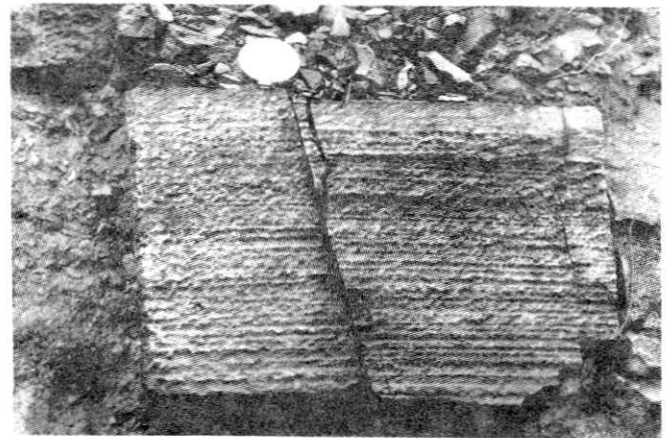


Figura 12. Superficie estilolítica bandeada en la localidad Q, Quebrada Churuvita vía Tunja-Villa de Leyva, Fm. San Rafael.

Dado que las superficies estilolíticas se encuentran siempre perpendiculares y los E—H siempre paralelos a la estratificación (rotando en el mismo grado que las capas en caso de que éstas no sean horizontales), se deduce que se trata de E—H precinemáticos o sea que su generación es anterior al plegamiento de las sedimentitas que los contienen, que como ya se anotó, varían en edad entre Aptiano/Albiano a Santoniano/Campaniano. Empero, de

acuerdo con las teorías generales sobre el origen de los E-H (Wagner 1964, Trurnit 1968a y b, Trurnit & Amstutz 1979, entre otros), éstos empiezan a desarrollarse sólo cuando las rocas han alcanzado una consolidación suficiente para fracturarse y transmitir los esfuerzos dirigidos, es decir cierto tiempo después de la sedimentación y a partir de las etapas tempranas o posteriores a la litificación. De otro lado, van der Hammen (1958) ha postulado que la Orogénesis Andina ( $\pm$  equivalente a la Orogénesis Alpídica o Tacónica) en Colombia manifiesta sus primeras etapas de plegamiento/elevación y erosión a finales del Paleoceno ("Fase Protoandina"). Una segunda, más fuerte y definitiva fase de plegamiento y elevación "final" se dio entre el Mioceno Superior y el Plioceno ("Fase Euandina").

Sin embargo, dado que, como se recordará, las superficies estilolíticas son siempre perpendiculares a las capas, se deriva que los E-H que nos ocupan

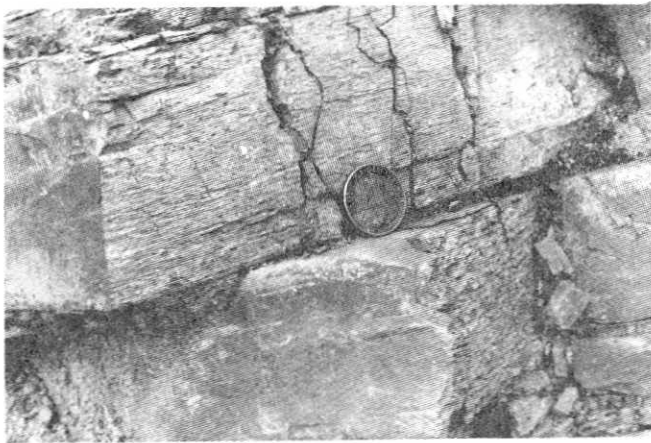


Figura 13. Numerosas superficies estilolíticas en la localidad H, Oeste de Zipacón, cherts negros en la parte alta del Gr. Villeta.



Figura 14. Estilolitos tangenciales en la localidad G, vía Tabio-Tenjo, Fm. Plaeners.

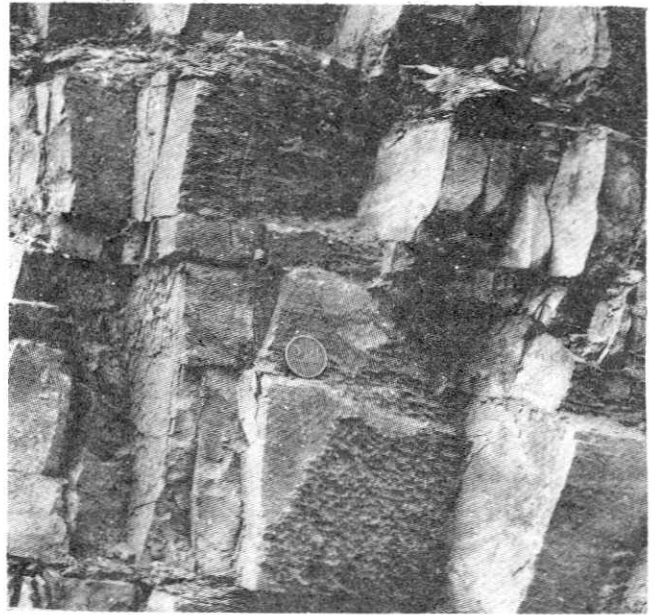


Figura 15. Diaclasas lisas y conjugadas con superficies estilolíticas, en la localidad C, Cantera El Cajón, vía Bogotá-La Vega Fm. Plaeners

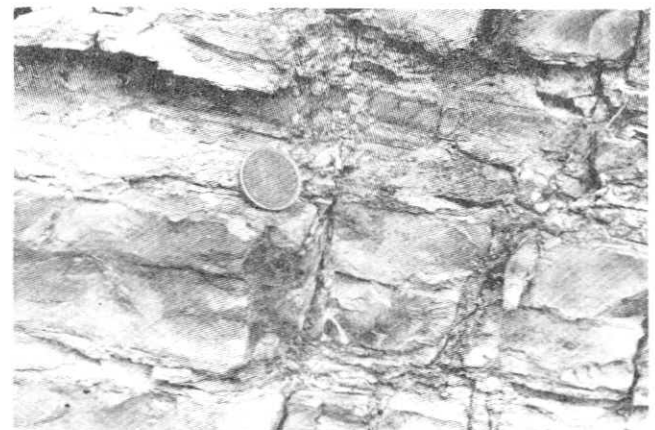


Figura 16. Diaclasas con estructuras en pluma, en la localidad D, Suroeste de Tenjo, Fm. Plaeners.

deberían haberse formado entre el Cretácico muy tardío y el Eoceno. De otra parte, los resultados antedichos se contraponen a la idea de Macellari & De Vries (1987: 290), en el sentido de que los repliegues comunes en las rocas silíceas y estilolíticas del Cretácico Superior de Colombia y Venezuela representan derrumbes sinsedimentarios, propios del borde del talud continental, o zona de "upwelling". De acuerdo con lo aquí expuesto, se trata más bien de plegamientos disarmónicos —desarrollados durante el Terciario— debidos a la incompetencia de los estratos que contienen los E-H.

En el caso de las diaclasas "lisas" que acompañan a los E-H, se tiene que tales diaclasas presentan por lo común estructuras radiales y en pluma, pero no son perpendiculares a la estratificación y, por el contrario, se mantienen en posición vertical (o sea que son independientes de la inclinación de las capas, v. tabla 2).

Por ello debe asumirse que son el producto de un fracturamiento posterior a los E-H y que se trata tal vez, de diaclasas de desgarre (Zerrklüfte).



Figura 17. Diaclasas con estructuras radiales en la localidad D, Suroeste de Tenjo, Fm. Plaeners.

La posición y orientación de las diaclasas de control en las areniscas tampoco dependen de la orientación y buzamiento de las capas, por lo cual, si se las acepta como diaclasas conjugadas, pueden ser interpretadas como de origen reciente. Las bisectrices al ángulo menor de tales diaclasas en el caso de los Grupos Bogotá y Tunja-Villa de Leiva indican una probable compresión máxima en dirección  $311^{\circ}/12$  y  $330^{\circ}/2$  (v. tabla 4). Dichas direcciones son conformes con las determinadas, a escala regional, por Mojica & Scheidegger (1983). Empero, la incertidumbre en la determinación del ángulo agudo conformado por la intersección de las familias de las diaclasas no permitiría establecer con precisión si el campo de esfuerzos ha permanecido constante desde el Plioceno hasta el Holoceno, o si se ha rotado en  $90^{\circ}$ .

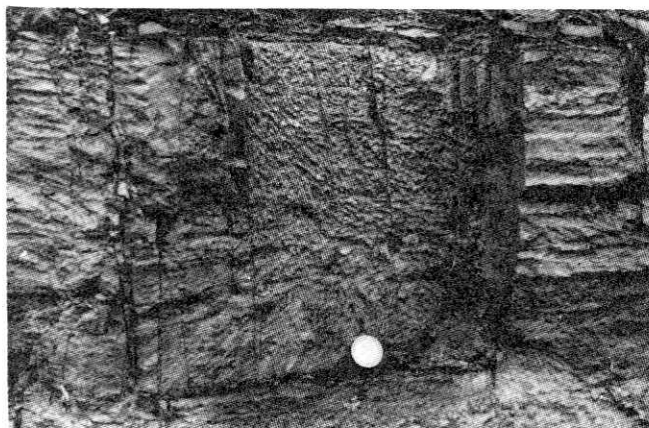


Figura 18. Estructuras en pluma desarrolladas sobre una superficie estilolítica. Localidad Q, Quebrada Churuvita, vía Tunja-Villa de Leyva, Fm. San Rafael.

Se podría intentar resolver el interrogante anterior mediante el uso de otros datos. Así, por ejemplo, Pennington (1981) ha compilado las soluciones de planos de falla de numerosos terremotos históricos en el sector septentrional de Los Andes. Seis de tales soluciones (tabla 5) serían aplicables en el área de este estudio, aunque los focos se encuentran localizados un poco al occidente. El examen de dicha tabla muestra una falta total de consistencia de las direcciones de compresión deducidas de los diferentes sismos. De hecho, un cálculo por medio del computador para el eje -P con el mejor ajuste produjo la cifra  $258 \pm 90/87 \pm 65$ , es decir un error de  $90^{\circ}$ . Esto significa que los ejes -P tienen una distribución aleatoria. Entonces, la pregunta arriba planteada no puede ser respondida por tal medio. Una precisión al respecto exige, por lo tanto, nuevos estudios de la micro y la macrotectónica.

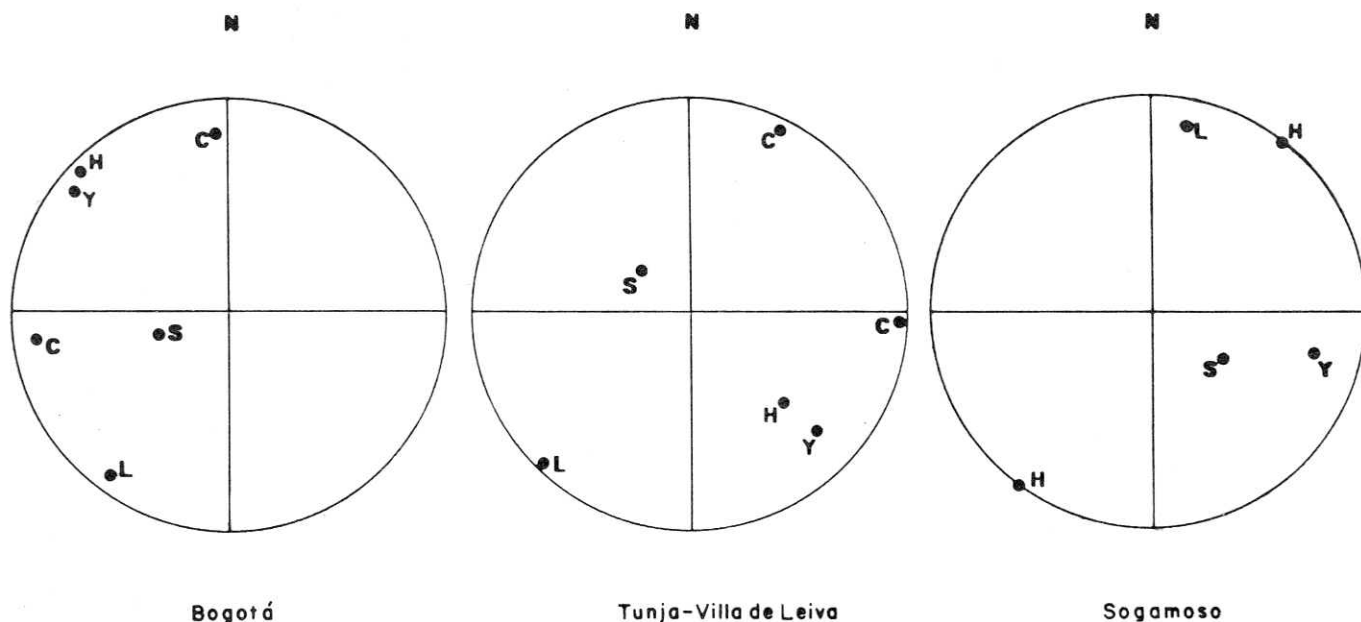


Figura 19. Representaciones estereográficas (hemisferio inferior) de las estructuras estudiadas en los grupos de afloramientos Bogotá, Tunja-Villa de Leyva y Sogamoso. Los puntos significan la posición promedio de: Y, dirección de estilolitos horizontales; H, polos de las superficies estilolíticas; S, polos de las capas; L, polos de las diaclasas lisas; C, polos de las diaclasas de control en areniscas asociadas con las rocas estilolíticas.

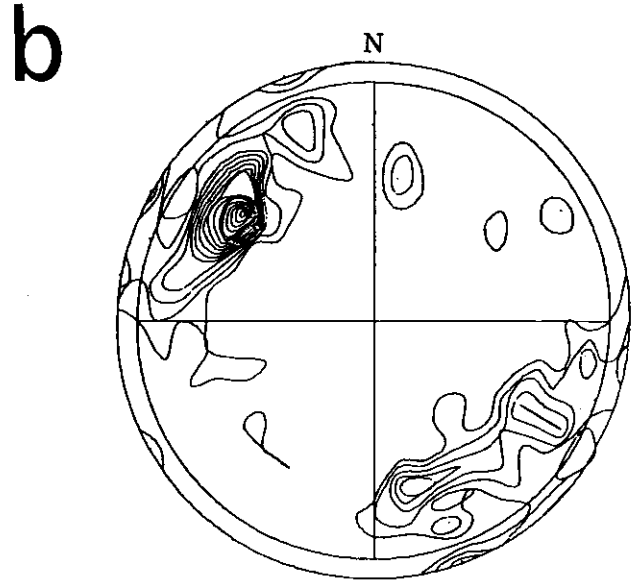
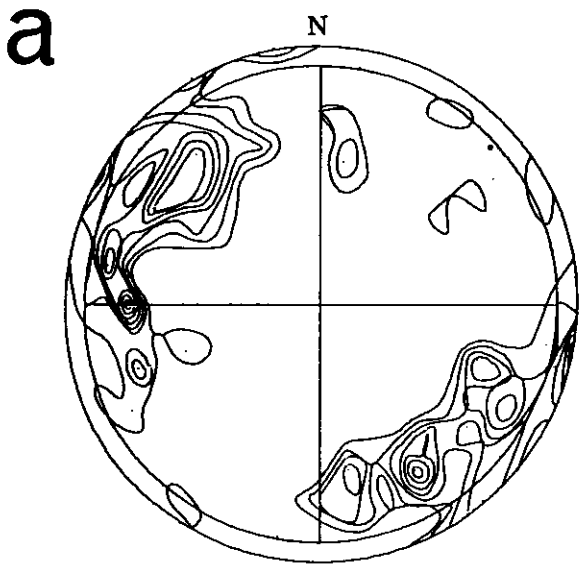


BCDEFGHIJKLMNO - SUP. ESTIL.

BCDEFGHIJKLMNO - AGUJAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION



BCDEFGHIJKLMNO - CAPAS

BCDEFGHIJKLMNO - DIACL. LISAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION

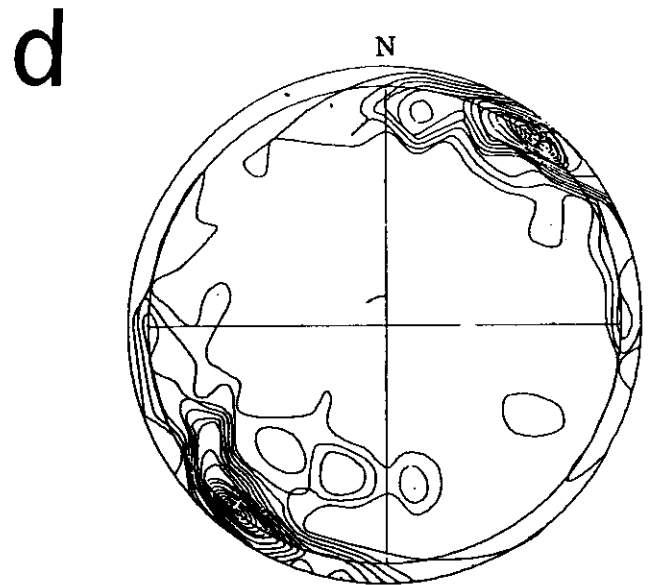
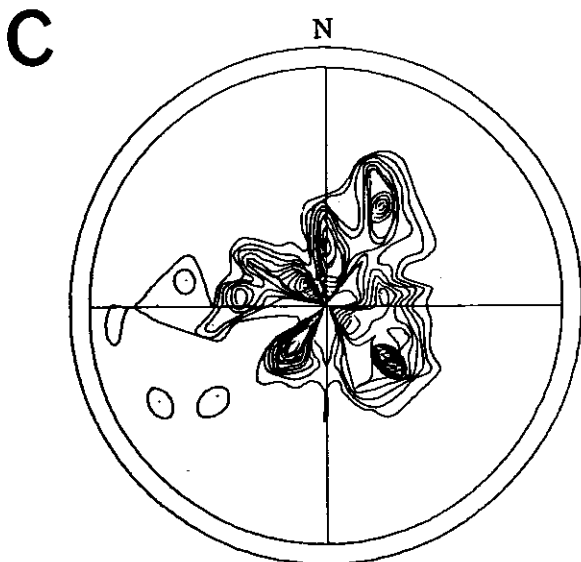


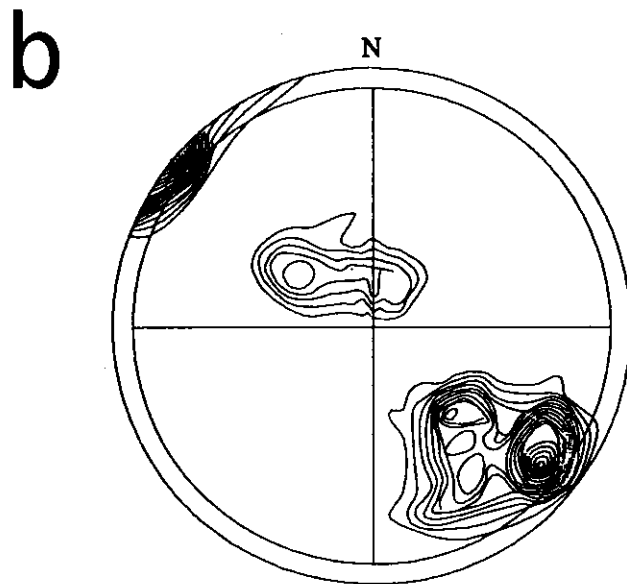
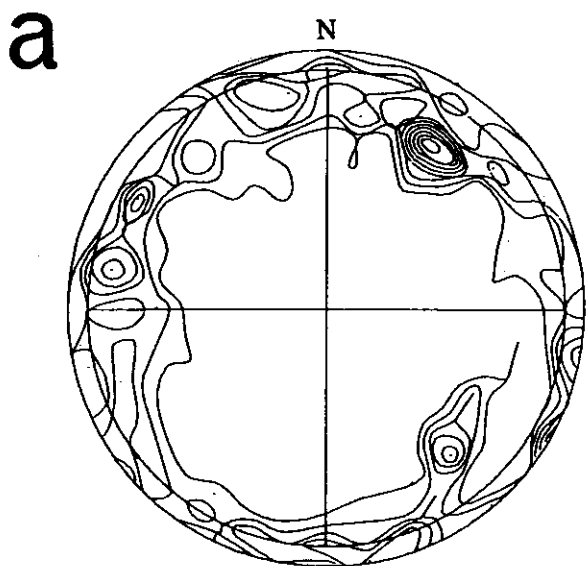
Figura 20. Diagramas de densidad de polos de: a) superficies estilolíticas, b) estilolitos horizontales, c) superficies de estratificación, d) diaclasas lisas; localidades B C D E F G H I J K L M N O . Norte magnético.

BCDEFGHIJKLMNO - CONTROL EN ARENISCAS

AQRSTZ - SUP. EST.

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION



AQRSTZ - AGUJAS

AQRSTZ - CAPAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION

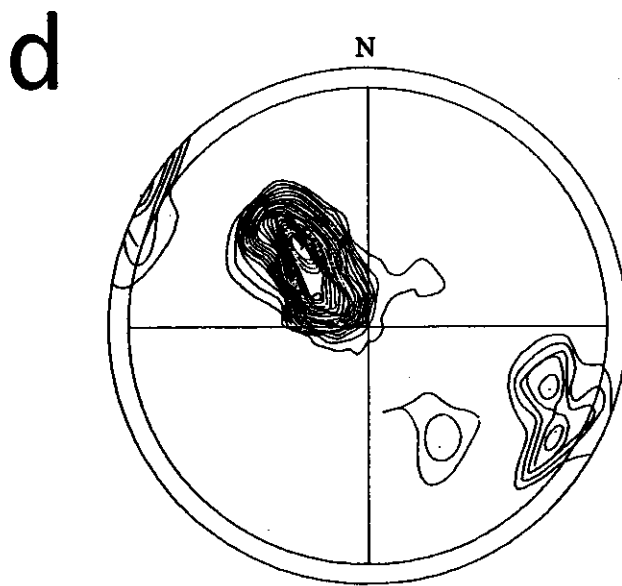
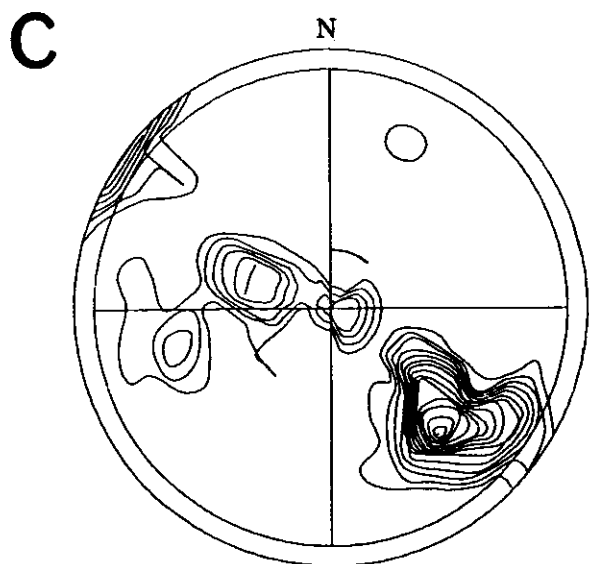


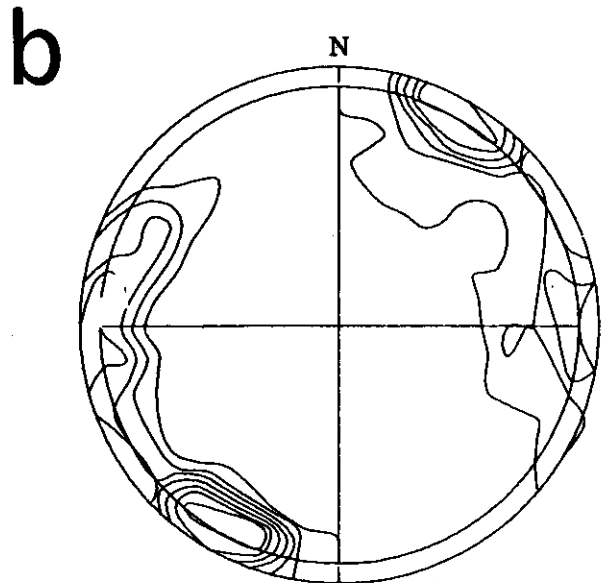
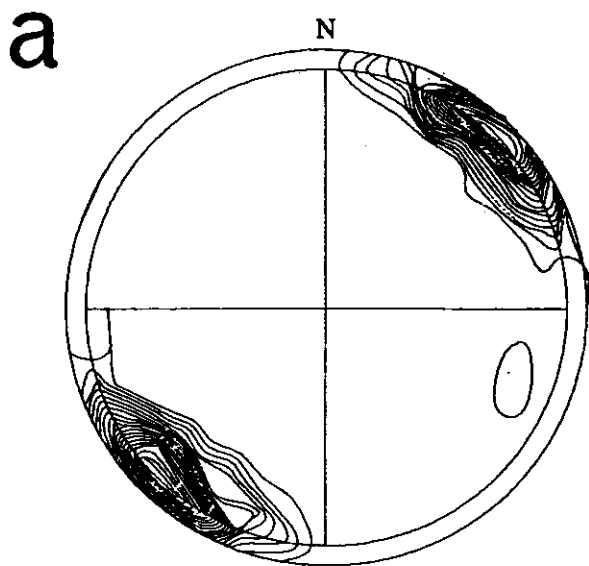
Figura 21. Diagramas de densidad de polos de: a) diaclasas de control en areniscas en las localidades B C D E F G H I J K L M N O; b) superficies estilolíticas, c) estilolitos horizontales y d) superficies de estratificación en las localidades A Q R S T Z. Norte magnético.

## AQRSTZ - DIACLASAS LISAS

## AQRSTZ - CONTROL DE ARENISCAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION



UVWXY - SUP. EST.

UVWXY-AGUJAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION

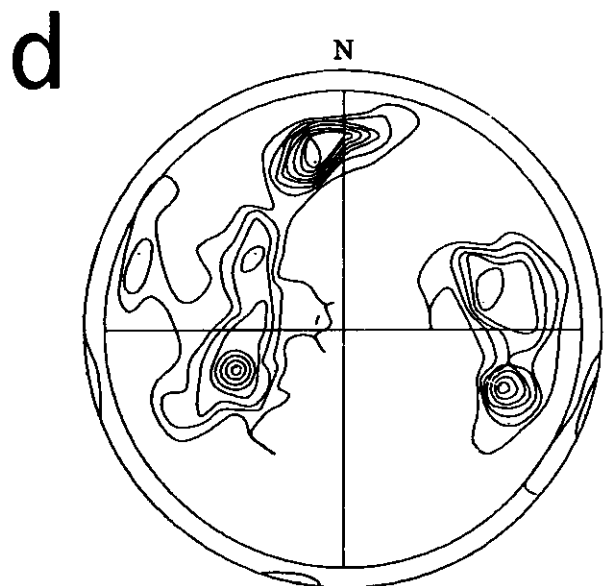
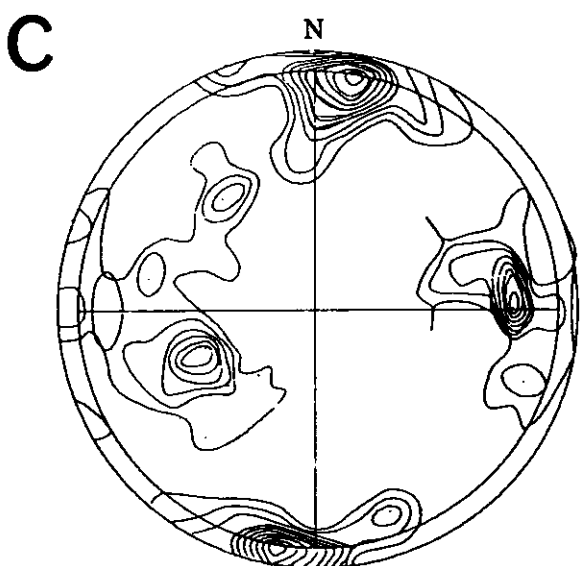


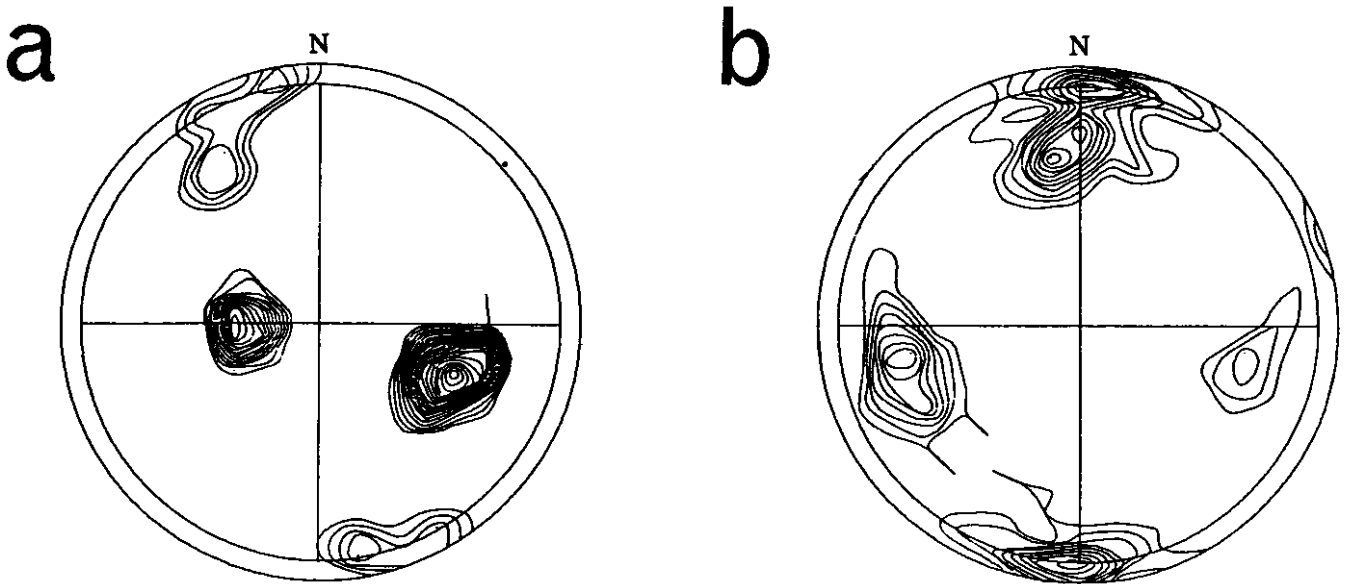
Figura 22. Diagramas de densidad de polos de: a) diacclasas lisas y b) diacclasas de control en areniscas, en las localidades A Q R S T Z; c) superficies estilolíticas y d) estilolitos horizontales, en las localidades U V W X Y. Norte magnético.

UVWXY - CAPAS

UVWXY - DIACLASAS LISAS

LAMBERT PROJECTION

LAMBERT PROJECTION



COLOMBIA EARTHQUAKES - SAB. BOGOTA P - AXES

LAMBERT PROJECTION

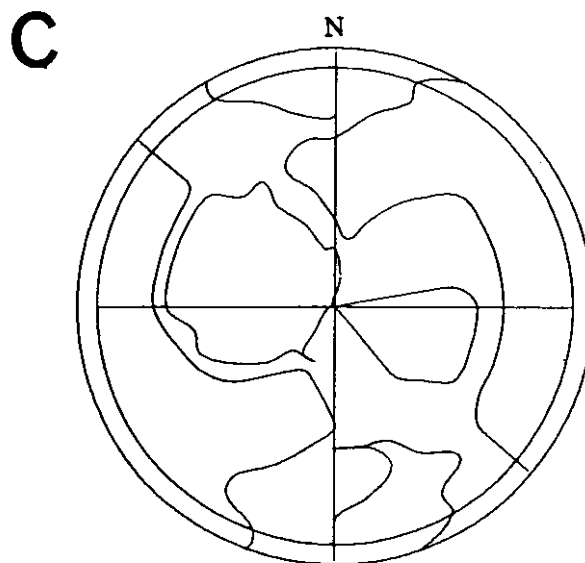


Figura 23. Diagramas de densidad de polos de: a) superficies de estratificación y b) diaclasas lisas, en las localidades U V W X Y; c) ejes P de mecanismos focales en los alrededores de la Sabana de Bogotá. Norte magnético.

TABLA 5

## Terremotos — alrededores de Bogotá

Fecha	Lat N	Long W	h Km	$\sigma_1$	$\sigma_3$
1967-01-09	5.1	77.6	20	177/11	275/64
1970-12-16	6.0	77.5	13	280/59	100/31
1973-04-03	4.7	75.7	150	293/59	108/31
1973-04-24	5.0	78.1	42	77/56	316/20
1973-04-24	5.2	75.8	117	335/08	68/20
1976-11-11	5.0	78.2	33	134/53	306/37

## BIBLIOGRAFIA

- BAYLY, B. 1986. A mechanism for development of stylolites. *Jour. Geology*, 94 (431-435), Chicago.
- BEIERSDORF, H. 1969: Druckspannungsindizien in Karbonatgesteinen Sud-Niedersachsens, Ost-Westfalens und Nord-Hessens. *Geol. Mitt.*, 8, 217-262, 28 Fig., Aachen.
- ETAYO, F. 1968: Sinopsis estratigráfica de la región de Villa de Leiva y zonas próximas. *Bol. Geol. U.I.S.*, 21, 19-32, 4 Figs., 1 tabla, 1 mapa, Bucaramanga.
- GOLF-RACHT, T.D., van 1982: Fundamentals of fractured reservoir engineering. *Developments in Petroleum Science* 12. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam.
- HEALD, M.T. 1955: Stylolites in Sandstones. *Jour. Geology*, 63, 101, 114, Chicago.
- INGEOMINAS 1986: Mapa de terrenos geológicos de Colombia. *Publ. Geol. Esp., Ingeominas*, No. 14, I, 1-235, Bogotá.
- JULIVERT, M. 1968: Colombie (première partie). *Lexique stratigr. internat.*, V, 4a., 1-650, 27 Figs., Centre Nat. Rech. Sci. Paris.
- KOHLBECK, F. & SCHEIDEGGER, A.E. 1977: On the theory of evaluation of joint orientation measurements. *Rock Mech.* 9: 9-25, 5 Figs., Viena.
- LETOUZEY, J. & TREMOLIERES, P. 1980. Paleo-Stress Fields around the Mediterranean since the Mesozoic from Microtectonics. Comparison with Plate Tectonic Data. *Rock Mech., Suppl.* 9, 173-192, 9 Figs., Viena.
- MACELLARI, C.E. & DE VRIES, T.J. 1987: Late cretaceous upwelling and anoxic sedimentation in northwestern South America. *Paleogeogr. Paleoclimat., Paleoecology*, 59 (279-292), 8 Figs., Amsterdam.
- MATTAUER, M. 1976: Las deformaciones de los materiales de la corteza terrestre. 524 pp., Ed. Omega, Barcelona.
- MOJICA, J. 1985: Estilolitos horizontales en sedimentitas del Cretácico de la Cordillera Oriental, y su significado tectónico. *Geol. Colombiana* 14: 7-23, 15 Figs., Bogotá.
- MOJICA, J. & SCHEIDEGGER, A.E. 1983. Diaclasses recientes en Colombia y su significado tectónico. *Geol. Colombiana* 12: 57-90, 15 Figs., 5 tablas, Bogotá.
- NELSON, R.A. 1983: Localization of aggregate Stylolites by Rock Properties. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 67 (2): 313-322, 11 Figs., Tulsa.
- PARK, W.C. & SCHOT, E.H. 1968: Stylolites: their nature and origin. *J. Sed. Petr.*, 38: 175-191, 14 Figs., Menasha.
- PENNINGTON, W.D. 1981: Subduction of the Eastern Panamá Basin and Seismotectonics of North-Western South America. *Journ. Geoph. Res.*, 86, 811 (10753-10770), 13 Figs., 1 Table.
- PLESSMANN, W. 1972: Horizontal-Stylolithen im francoesisch-schweizerischen Tafel- und Faltenjura und ihre Einpassung in den regionalen Rahmen-. *Geol. Rundschau*, 61: 332-347, 7 Figs., Stuttgart.
- RENZONI, G.; ROSAS, H. & ETAYO, F. 1983: Mapa Geológico de la Plancha 171, Duitama, esc. 1: 100.000. *Ingeominas*, Bogotá.
- SCHAEFER, K. 1980: Paleo- and Recent Stress Fields in Tunisia and Libya from the Cenozoic Structural Bearing-. *Rock Mech., Suppl.* 9: 147-158, 5 Figs., Viena.
- SUBIETA, T.; CARNEVALLI, J. & HUNTER, V. 1988: Evolución tectonoestratigráfica de la Serranía del Interior y de la Subcuenca de Maturín-. *Mem. III Simp. Boliv. Expl. Petrol. Cuencas Subandinas*, T2 (547-578), 4 Figs., Caracas.
- TRURNIT, P. 1968a: Die Schnittführung bei der Beurteilung von Druck-Loesungsphänomenen. *Schweiz. Min. Petr. Mitt.* 48, H 2: 485-508, Basel.
- . 1968b. Druck-Loesungsstadien innerhalb der Entwicklung einer Geosynclinal. *N. Jb. Geol. Palaeont. Mh.* 6: 376-384, 3 Figs., Stuttgart.
- TRURNIT, P. & AMSTUTZ, G.C. 1979: Die Bedeutung des Ruckstandes von Druck-Loesungsvorgängen fuer die stratigraphische Abfolgen, Wechsel-lagerung and Lagerstaettenbildung. *Geol. Rundschau*, 68: 1107-1124, 16 Figs., Stuttgart.
- VAN DER HAMMEN, T. 1958: Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectogénesis de los Andes Colombianos. *Bol. Geol.* 6 (1-3): 67-128, 7 planchas, Bogotá.
- WAGNER, G.H. 1964: Kleintektonische Untersuchungen im Gebiet des Noerdlinger Rieses. *Geol. Jb.* 81: 519-600, 45 Figs., 5 tablas, Hannover.

# SOBRE LA DETERMINACION DE LA PERTENENCIA DE ESTRELLAS A CUMULOS ABIERTOS A PARTIR DE MOVIMIENTOS PROPIOS\*

por

Eduardo Brieva Bustillo\* y Antonio Uribe Botero\*\*

## Resumen

Brieva, E. & A. Uribe: Sobre la determinación de la pertenencia de estrellas a cúmulos abiertos a partir de movimientos propios. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 461-466, 1990. ISSN 0370-3908.

Se describe un procedimiento por el cual se pueden asignar probabilidades de pertenencia a estrellas de la región de un cúmulo galáctico, resolviendo un sistema no lineal de nueve ecuaciones obtenido por el método de máxima verosimilitud, sin eliminar el coeficiente de correlación del modelo bivariado mixto propuesto por Vasilevskis et al. (1958). Este enfoque elimina la necesidad de hacer suposiciones subjetivas que justifican de ordinario la rotación de ejes usual. El método se aplica a los cúmulos NGC 2420, NGC 6823 y NGC 654.

## Summary

A procedure is described whereby proper motion membership probabilities can be assigned to stars in the region of a galactic cluster by solving a nine non-linear equations system obtained by the maximum likelihood method, without eliminating the correlation coefficient from the mixed bivariate normal model proposed by Vasilevskis et al. (1958). This approach removes the subjective and a priori assumption that justify the usual axis rotation. The method is applied to the clusters NGC 2420, NGC 6823 and NGC 654.

## 1. Introducción

Es bien conocido que en la determinación de pertenencia de estrellas a cúmulos abiertos, basada en los movimientos propios, se adscriben al cúmulo ciertas estrellas de la región con un criterio probabilístico. Para ello se introduce un modelo de fun-

ción de densidad bivariada mixta ("contagious") de los movimientos propios  $\mu_x$ ,  $\mu_y$ , dada por:

$$\phi(\mu_x, \mu_y) = \alpha \phi_1(\mu_x, \mu_y) + (1 - \alpha) \phi_2(\mu_x, \mu_y), \quad (1)$$

siendo  $\alpha$  y  $1-\alpha$  las ponderaciones de las componentes. Este modelo ha sido ampliamente utilizado y está formado por la superposición de 2 distribuciones,  $\phi_1$  y  $\phi_2$ , que se suponen normales bivariadas, una elíptica para las estrellas del campo y otra circular para las del cúmulo (Vasilevskis et al. 1958; Sanders 1971; Slovak 1977).

Sanders (1971) utilizó por primera vez el método de máxima verosimilitud para estimar los pa-

\* Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 2584, Bogotá, Colombia.

\*\* Departamento de Matemáticas y Estadística, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 59171, Bogotá, Colombia.

rámetros de las 2 distribuciones, refiriendo los movimientos propios a un sistema de coordenadas en donde el coeficiente de correlación,  $\rho$ , de la distribución elíptica se hace cero. Para ello hay que efectuar una rotación de ejes. En Trumpler y Weaver (1953) puede verse que el ángulo de rotación,  $\alpha$ , viene dado por

$$\cotg \alpha = - \frac{\sigma_y^2 - \sigma_{x1}^2}{\rho \sigma_x \sigma_y}, \quad (2)$$

en donde  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  son las desviaciones estándar de la distribución del campo y  $\sigma_{x1}$  es la desviación estándar con respecto al eje rotado  $x^1$ . Se pueden utilizar diferentes procedimientos para calcular un estimador  $\hat{\alpha}$  a partir de la muestra, esto es, de los movimientos propios de las estrellas de la región considerada.  $\hat{\alpha}$  estimará mejor el  $\alpha$  adecuado cuanto mayor sea la superposición de las dos distribuciones (Slovak 1977).

Sanders (1971) calcula el ángulo utilizando la técnica descrita por Vasilevskis et al. (1965) a partir de todas las estrellas de la muestra. Zhao et al. (1981), sin utilizar la hipótesis de superposición, logran separar las estrellas del campo con las cuales calculan un  $\hat{\alpha}$  definitivo, usando un proceso de aproximaciones sucesivas que alterna depuración,

rotación y solución de las ecuaciones normales. Una aplicación del método de Sanders, en donde se utiliza la depuración de Zhao et al, puede verse en Brieve y Uribe (1985).

Recientemente Cabrera y Alfaro (1985) han diseñado y desarrollado una técnica de detección de "outliers" apoyados en Hand (1981). Después de la depuración estiman los parámetros por medio del proceso iterativo de Wolfe (1970) en el cual se calculan primero las probabilidades de pertenencia y luego se actualizan los parámetros de la distribución mixta.

Siguiendo lo propuesto por De Graeve, Elizabeth Green ha incluido en el modelo los errores individuales de los movimientos propios (Cudworth 1984). La distribución espacial ha sido también utilizada para mejorar la determinación de las probabilidades (De Graeve 1979, King 1983).

En este trabajo presentamos las ecuaciones clásicas de máxima verosimilitud, obtenidas sin rotar y sin necesidad de formular la hipótesis de superposición. Se ha elaborado el programa CLUSTER, que depura los datos según una variante de la técnica de Zhao et al. (1982), resuelve las ecuaciones de máxima verosimilitud por un procedimiento numérico y calcula las probabilidades de pertenencia. El método se aplica a los cúmulos NGC 654, NGC 2420 y NGC 6823.

## 2. Sistema de ecuaciones de máxima verosimilitud

Suponemos que los movimientos propios,  $\mu_{x_i}$ ,  $\mu_{y_i}$ , se pueden representar, en un sistema de coordenadas  $\mu_x, \mu_y$ , por la distribución bivariada mixta de la forma

$$\begin{aligned} \phi(\mu_{x_i}, \mu_{y_i}) = & \frac{n_c}{2\pi \sigma^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\mu_{x_i} - \mu_{xc}}{\sigma} \right)^2 + \left( \frac{\mu_{y_i} - \mu_{yc}}{\sigma} \right)^2 \right] \right\} + \\ & + \frac{(1 - n_c)}{2\pi \sigma_x \sigma_y \sqrt{1 - \rho^2}} \exp \left\{ \frac{-1}{2(1 - \rho^2)^2} \left[ \left( \frac{\mu_{x_i} - \mu_{xb}}{\sigma_x} \right)^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left( \frac{\mu_{y_i} - \mu_{yb}}{\sigma_y} \right)^2 - 2\rho \left( \frac{\mu_{x_i} - \mu_{xb}}{\sigma_x} \right) \cdot \left( \frac{\mu_{y_i} - \mu_{yb}}{\sigma_y} \right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Esta distribución mixta depende de 9 parámetros,

- $n_c$  : porcentaje de estrellas pertenecientes al cúmulo.
- $(\mu_{xc}, \mu_{yc})$  : coordenadas del centro de la distribución del cúmulo.
- $\sigma$  : desviación estándar de la distribución del cúmulo.
- $(\mu_{xb}, \mu_{yb})$  : coordenadas del centro de la distribución del campo.



$(\sigma_x, \sigma_y)$  : desviaciones estándar de la distribución del campo.

$\rho$  : coeficiente de correlación de la distribución del campo.

Además,  $n_f = 1 - n_c$  es el porcentaje de estrellas pertenecientes al campo, N es el número total de estrellas de la región con movimiento propio conocido y  $\mu_{x_i}, \mu_{y_i}$  son los componentes del movimiento propio, por siglos, para la estrella  $i$ -ésima.

Usando el método de máxima verosimilitud estimamos los parámetros de la distribución bivariada mixta. La función de verosimilitud viene dada por:

$$L(\mu_{x_f}, \mu_{y_f}, \sigma_x, \sigma_y, \mu_{x_c}, \mu_{y_c}, \sigma, \rho, \mu_{x_1}, \mu_{y_1}, \dots, \mu_{x_N}, \mu_{y_N}) = \prod_{i=1}^N \phi(\mu_{x_i}, \mu_{y_i}). \quad (4)$$

Como es usual, se toma el logaritmo natural de L:  $\text{Log } L = \sum_{i=1}^N \log \phi(\mu_{x_i}, \mu_{y_i})$ , (5)

y se calcula  $\frac{\partial L}{\partial \theta_i} \left[ \log \prod_{i=1}^N \phi(\mu_{x_i}, \mu_{y_i}) \right]$ , (6)

en donde  $\theta_i$  es uno cualquiera de los elementos del vector de parámetros

$$\vec{\theta} = (\mu_{x_f}, \mu_{y_f}, \sigma_x, \sigma_y, \mu_{x_c}, \mu_{y_c}, \sigma, \rho, n_c).$$

Igualando a cero cada una de las funciones (6) se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones de ve-

rosimilitud, en el cual figura a la izquierda el parámetro asociado con cada ecuación:

$$\mu_{x_f} \quad \sum_{i=1}^N F_{A_i} \left[ (\mu_{x_i} - \mu_{x_f}) - \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (\mu_{y_i} - \mu_{y_f}) \right] = 0$$

$$\mu_{y_f} \quad \sum_{i=1}^N F_{A_i} \left[ (\mu_{y_i} - \mu_{y_f}) - \rho \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (\mu_{x_i} - \mu_{x_f}) \right] = 0$$

$$\sigma_x \quad \sum_{i=1}^N F_{A_i} \left[ \frac{1}{(1-\rho^2)} \left( \frac{\mu_{x_i} - \mu_{x_f}}{\sigma_x} \right)^2 - \frac{\rho}{(1-\rho^2)} \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{x_f})(\mu_{y_i} - \mu_{y_f})}{\sigma_x \sigma_y} - 1 \right] = 0$$

$$\sigma_y \quad \sum_{i=1}^N F_{A_i} \left[ \frac{1}{(1-\rho^2)} \left( \frac{\mu_{y_i} - \mu_{y_f}}{\sigma_y} \right)^2 - \frac{\rho}{(1-\rho^2)} \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{x_f})(\mu_{y_i} - \mu_{y_f})}{\sigma_x \sigma_y} - 1 \right] = 0$$

$$\mu_{x_c} \quad \sum_{i=1}^N F_{B_i} \left[ \mu_{x_i} - \mu_{x_c} \right] = 0$$

$$\mu_{y_c} \quad \sum_{i=1}^N F_{B_i} \left[ \mu_{y_i} - \mu_{y_c} \right] = 0$$

$$\sigma \quad \sum_{i=1}^N F_{B_i} \left[ \left( \frac{\mu_{x_i} - \mu_{x_c}}{\sigma} \right)^2 + \left( \frac{\mu_{y_i} - \mu_{y_c}}{\sigma} \right)^2 - 2 \right] = 0$$

$$\rho \sum_{i=1}^N F_{A_i} \left[ \rho(1-\rho^2) + (1+\rho^2) \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{x_b})(\mu_{y_i} - \mu_{y_b})}{\sigma_x \sigma_y} - \rho \left\{ \left( \frac{\mu_{x_i} - \mu_{x_b}}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{\mu_{y_i} - \mu_{y_b}}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \right] = 0$$

$$n_c \sum_{i=1}^N \left[ \frac{F_{B_i}}{\sigma^2} - \frac{F_{A_i}}{(1-\rho^2)^{1/2} \sigma_x \sigma_y} \right] = 0 \tag{7}$$

En las ecuaciones anteriores,

$$F_{A_i} = 2\pi \left[ \frac{1-n_c}{\sigma_x \sigma_y} (1-\rho^2)^{-1/2} + \frac{n_c}{\sigma^2} F_i \right]^{-1} \tag{8}$$

$$F_{B_i} = F_{A_i} F_i \tag{9}$$

$$F_i = \exp \left[ \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{(1-\rho^2)} \left[ \left( \frac{\mu_{x_i} - \mu_{x_b}}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{\mu_{y_i} - \mu_{y_b}}{\sigma_y} \right)^2 - \frac{2\rho(\mu_{x_i} - \mu_{x_b})(\mu_{y_i} - \mu_{y_b})}{\sigma_x \sigma_y} \right] - \left( \frac{\mu_{x_i} - \mu_{x_c}}{\sigma} \right)^2 - \left( \frac{\mu_{y_i} - \mu_{y_c}}{\sigma} \right)^2 \right\} \right] \tag{10}$$

Anotemos, de paso, que las ecuaciones de máxima verosimilitud usuales del caso rotado pueden obtenerse de las ecuaciones más generales (7), haciendo  $\rho = 0$ . Puede observarse, sin embargo, que la ecuación asociada a  $\rho$  se reduce a:

$$\sum_{i=1}^N F_{A_i} \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{x_b})(\mu_{y_i} - \mu_{y_b})}{\sigma_x \sigma_y} = 0 \tag{11}$$

lo cual indica que la covarianza ponderada es cero en el caso rotado ( $\rho = 0$ ).

El vector de parámetros,  $\vec{\theta}$ , que satisfaga simultáneamente las ecuaciones (7) es solución del sistema y nos da estimadores para los parámetros de la función de distribución mixta.

En la práctica el vector solución se estima por un proceso numérico iterativo, para lo cual se pueden emplear las conocidas subrutinas que resuelven sistemas no lineales ZSYSTEM, NSO1A, etc. (Giebert 1982).

Para cada estrella cuyo movimiento propio tenga componentes  $\mu_{x_i}$ ,  $\mu_{y_i}$ , su probabilidad de

pertenencia al cúmulo se calcula mediante la expresión:

$$p_i = \frac{\hat{n}_c \hat{\phi}_2}{\hat{n}_c \hat{\phi}_2 + (1 - \hat{n}_c) \hat{\phi}_1} \tag{12}$$

en donde el símbolo “^” indica que se trata de valores estimados. Aquellas estrellas con probabilidades calculadas  $p_i \geq 0,50$  se consideran en principio como pertenecientes al cúmulo.

### 3. Aplicaciones

Se ha elaborado en FORTRAN el programa CLUSTER que depura los datos según una variante de la técnica de Zhao et al. (1982), resuelve las ecuaciones de máxima verosimilitud mediante la subrutina ZSYSTEM facilitada gentilmente por el Dr. Mark Slovak (1985), y calcula las probabilidades de pertenencia.

El programa se aplicó a los cúmulos NGC 2420, NGC 6823 y NGC 654, utilizando un computador Texas Business 300. Los movimientos propios

se tomaron de Van Altena y Jones (1970), Erickson (1971) y Stone (1977).

El proceso de depuración consta de 2 etapas. En la primera se eliminan aquellas estrellas con

$$\begin{aligned}
 \hat{\mu}_{x_i} &\leq \hat{\mu}_{x_f} - 2 \hat{\sigma}_x & 0 & & \mu_{x_i} &\geq \hat{\mu}_{x_f} + 2 \hat{\sigma}_x & 0 \\
 \mu_{y_i} &\leq \mu_{y_f} - 2 \hat{\sigma}_y & 0 & & \mu_{y_i} &\geq \mu_{y_f} + 2 \hat{\sigma}_y & .
 \end{aligned} \tag{13}$$

Con las estrellas que pasan el segundo filtro se resuelve una vez más el sistema (7), tomando como valores iniciales los obtenidos en la primera etapa, y se determinan los estimadores definitivos de los parámetros y las probabilidades de pertenencia.

Se ha probado la estabilidad y unicidad de la solución variando razonablemente los valores iniciales de los parámetros.

Los resultados para los cúmulos mencionados se muestran en la Tabla 1, en donde se incluyen además los valores obtenidos por otros autores. Se indica también el número de estrellas depuradas en cada caso y el número de iteraciones necesario para obtener convergencia, tanto en la primera como en la segunda etapa del proceso.

Las pequeñas discrepancias que pueden observarse eran de esperar ya que en este cálculo no se ha rotado, como es usual, lo cual elimina la necesidad de las consideraciones a priori que tal rotación implica. Además, hay diferencias en la forma de depurar.

El buen acuerdo que la Tabla presenta hace pensar que, en los ejemplos trabajados, la hipótesis de transape se cumple satisfactoriamente y la rotación introduce una simplificación válida.

$|\mu_{x_i}|$  o  $|\mu_{y_i}| \geq 1,5$  segundos de arco por siglo, y se resuelve una primera vez el sistema de ecuaciones normales (7). En la segunda se eliminan las estrellas con

4. Conclusiones

Sobre la base del modelo de Vasilevskis et al. (1958) presentamos las 9 ecuaciones normales de máxima verosimilitud, obtenidas sin eliminar el coeficiente de correlación  $\rho$ , las cuales se reducen a las 8 empleadas de ordinario por otros autores que realizan rotación de ejes ( $\rho = 0$ ).

Como no es necesario rotar, se prescinde de suposiciones innecesarias como la hipótesis de superposición de las dos componentes del modelo; por tanto las ecuaciones obtenidas son de validez general y conducen a resultados satisfactorios y analíticamente más precisos, al prescindir de consideraciones subjetivas. Consideramos este trabajo complementario del de Cabrera y Alfaro (1985), ya que aquí se estiman los parámetros por el método clásico de máxima verosimilitud y ellos utilizan el método de Wolfe que también conduce a una solución máximo verosímil.

5. Agradecimientos

Agradecemos a los Doctores Kyle Cudworth y Mark Slovák su interés en este trabajo y su gentil colaboración. Este trabajo ha sido financiado por el CINDEC de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, a través del proyecto PI 272.

TABLA 1

Parámetros estimados para los cúmulos galácticos NGC 2420, NGC 6823 Y NGC 654

Se incluyen además los resultados obtenidos por otros autores.

El significado de los símbolos se explica en el texto

Cúmulo	N <sub>c</sub>	N <sub>f</sub>	$\mu_{x_f}$	$\mu_{y_f}$	$\mu_{xc}$	$\mu_{yc}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma$	$\theta$	N	$\rho$	Estrellas eliminadas		No. de iteraciones		
													paso 1	paso 2	paso 1	paso 2	
NGC2420	Zhao et al. (1982)	18	67	0.05	-0.17	0.03	0.00	0.47	0.38	0.05	44.9	85	-				
	Sanders (1971)	20	65	0.08	-0.13	0.03	-0.01	0.54	0.43	0.06	44.4	85	-				
	Este estudio	18	67	0.14	0.05	0.02	0.02	0.39	0.46	0.05	-	85	0.07	9	8	7	7
NGC6823	Zhao et al. (1982)	36	56	0.21	0.04	-0.03	0.00	0.54	0.38	0.08	44.7	92	-				
	Sanders (1971)	35	57	-0.03	0.18	0.00	-0.37	0.56	0.56	0.08	-42.6	92	-				
	Este estudio	39	107	0.05	0.07	-0.03	-0.03	0.38	0.44	0.09	-	146	0.06	16	9	4	5
NGC654	Stone (1977)	56	130	0.10	-0.05	0.00	0.00	0.47	0.33	0.07	-15.8	186	-				
	Este estudio	55	131	0.12	-0.07	0.00	0.00	0.48	0.32	0.06	-	186	-0.02	13	10	4	8

## BIBLIOGRAFIA

- BRIEVA, E. & A. URIBE. 1985, *Revista Colombiana de Estadística*, 12, 1.
- CABRERA-CAÑO, J. & F.J. ALFARO, 1985, *Astron. Astrophys.* 150, 298.
- CUDWORTH, K. 1984, comunicación personal.
- DE GRAEVE, E. 1979, *Vatican Observatory Publications* 1, 283.
- ERICKSON, R.R. 1971, *Astron. Astrophys.* 10, 170.
- GIEBERT, K.L. 1982. *ACM Transactions on Mathematical Software* 8, 5.
- HAND, D.J. 1981. *Discrimination and Classification*, John Wiley and Sons, Chichester, p. 16-31.
- KING, D.S. 1983 *Journal and Proceedings*, Royal Society of New South Wales 116, 33.
- SANDERS, W.L. 1971, *Astron. Astrophys.* 14, 226.
- SLOVAK, M.H. 1977. *Astron. J.* 82, 818.
- STONE, R.C. 1977. *Astron. Astrophys.* 54, 803.
- TRUMPLER, R.J. & H.F. WEAVER. 1953. *Statistical Astronomy*, Dover, New York, p. 49-56.
- VAN ALTENA, W.F., & B.F. JONES, 1970. *Astron. Astrophys.* 8, 112.
- VASILEVSKIS, S., A. KLEMOLA & G. PRESTON. 1958, *Astron. J.* 69, 387.
- WOLFE, J.H. 1970, *Multivariate Behavioral Research*, July, 329.
- ZHAO, J., TIAN, K., SU, Z., & YIN, M. 1982. *Chin. Astron. Astrophys.* 6, 293.

# COMPORTAMIENTO DEL FOSFORO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCANICAS\*

por

Josué Quintero Quintero\*\*

## Resumen

Quintero, J.: Comportamiento del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 467-476, 1990, ISSN 0370-3908.

Se proporciona información básica sobre los andosoles y acerca de la dinámica del P en el suelo; se adicionan resultados de algunas investigaciones realizadas en la Sabana de Bogotá en relación con el comportamiento del fósforo y con las formas de aprovechamiento como fertilizante de la roca fosfórica nacional, ya sola, ya combinada con superfosfato triple o con fertilizantes nitrogenados.

## Introducción

Quizás uno de los aspectos que mayor interés ha despertado entre las personas dedicadas al estudio de las Ciencias de Suelo, es tratar de aclarar el comportamiento del fósforo en los suelos y sus implicaciones en la nutrición vegetal.

El estudio de las causas de la deficiencia de fósforo debe basarse en la interpretación del sistema suelo-planta, para identificar qué fenómeno está interfiriendo en la nutrición adecuada de las plantas. Para ello es necesario considerar en primer lugar las formas del fósforo en el suelo y después sus interacciones con la planta.

Desde el punto de vista de la disponibilidad de nutrimentos interesan dos parámetros: la concentración de iones presentes en la solución del suelo o su actividad iónica (parámetro intensidad) y la reserva total del elemento ligada con la fase sólida para reponer los iones de la solución del suelo, cuando éstos son absorbidos por la planta (parámetro capacidad).

La despensa agrícola de nuestro país, localizada sobre las vertientes de las cordilleras andinas, está constituida en una considerable extensión por suelos derivados de cenizas volcánicas. Sin embargo su producción se ve seriamente limitada por la baja disponibilidad de fósforo, la alta fijación de fosfatos y el alto costo de los fertilizantes fosforados. Estos suelos requieren adiciones de por lo menos 200 Kg. de P/Ha con el fin de proporcionar una concentración de equilibrio de 0.2 p.p.m. de P en la solución.

Los suelos derivados de cenizas volcánicas (andosoles), los cuales se encuentran ampliamente distribuidos en el cinturón volcánico del Pacífico, han venido siendo objeto de estudios intensivos durante los últimos 20 años. A diferencia de suelos derivados de otros materiales no piroclásticos, estos suelos por la naturaleza del P-nativo y el comportamiento del P-aplicado imponen ciertas restricciones en el estudio y empleo de este elemento.

El presente trabajo tiene como objetivo principal proporcionar una información básica relacionada con las características de los andosoles en Colombia, la dinámica del fósforo en el suelo y algunos trabajos de investigación que se han realizado en el Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia, sobre el comportamiento del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas de la Sabana de Bogotá.

\* Estudio científico leído en el recinto de la Academia el 30 de abril de 1986 con ocasión de su posesión como académico correspondiente.

\*\* Profesor Asociado Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E.

**Los andosoles en Colombia**

Los suelos derivados de ceniza volcánica son de gran importancia en Colombia, por cuanto una extensión considerable de ellos — que se encuentran sobre las cordilleras andinas — tienen como material parental ceniza, tobas y lava volcánica. Su estudio presenta cierta complejidad ya que intervienen factores importantes como clima, topografía, presencia de formaciones geológicas que no son de origen volcánico y el tiempo de meteorización de las rocas.

El basamento andino, en lo que respecta a zonas de volcanismo, se halla compuesto por las siguientes formaciones: en el departamento de Nariño, andesitas, basaltos y tobas del cenozoico; continuando en dirección norte en el departamento del Cauca, se encuentran sedimentos no diferenciados (tobas, ceniza, lava, etc.), igualmente del cenozoico; en los departamentos de Risaralda, Tolima, Quindío, Caldas y Antioquia, preferentemente formaciones metamórficas del paleozoico e ígneas del cenozoico y en el departamento de Cundinamarca, sedimentos del Terciario y Cuaternario (15).

**Características morfológicas**

Las características morfológicas de los andosoles en Colombia, en general se identifican con

aquellas establecidas en otros lugares del mundo (Japón, Nueva Zelandia, Hawaii, Chile). Sin embargo, estos suelos presentan ciertas peculiaridades que los distinguen de los suelos de otras latitudes. Aún dentro del mismo territorio los suelos presentan diferencias originadas por condiciones climáticas, topográficas, tiempo de deposición de la ceniza y composición del material piroclástico.

**Características fisicoquímicas**

- pH ácido a ligeramente ácido
- Capacidad catiónica de cambio alta y capacidad aniónica de cambio relativamente alta.
- Baja saturación de bases
- Contenido de materia orgánica alto
- Dispersión difícil
- Retención de humedad alta
- El alofan es el principal constituyente de la fracción arcilla en el horizonte superficial y haloisita hidratada, caolinita y gibsita en los horizontes inferiores (8).

**La ceniza volcánica como material parental del suelo**

La meteorización de los minerales primarios a partir de una ceniza volcánica puede conducir a la formación de diversos minerales secundarios bajo condiciones de buen drenaje y humedad (Fig. 1).

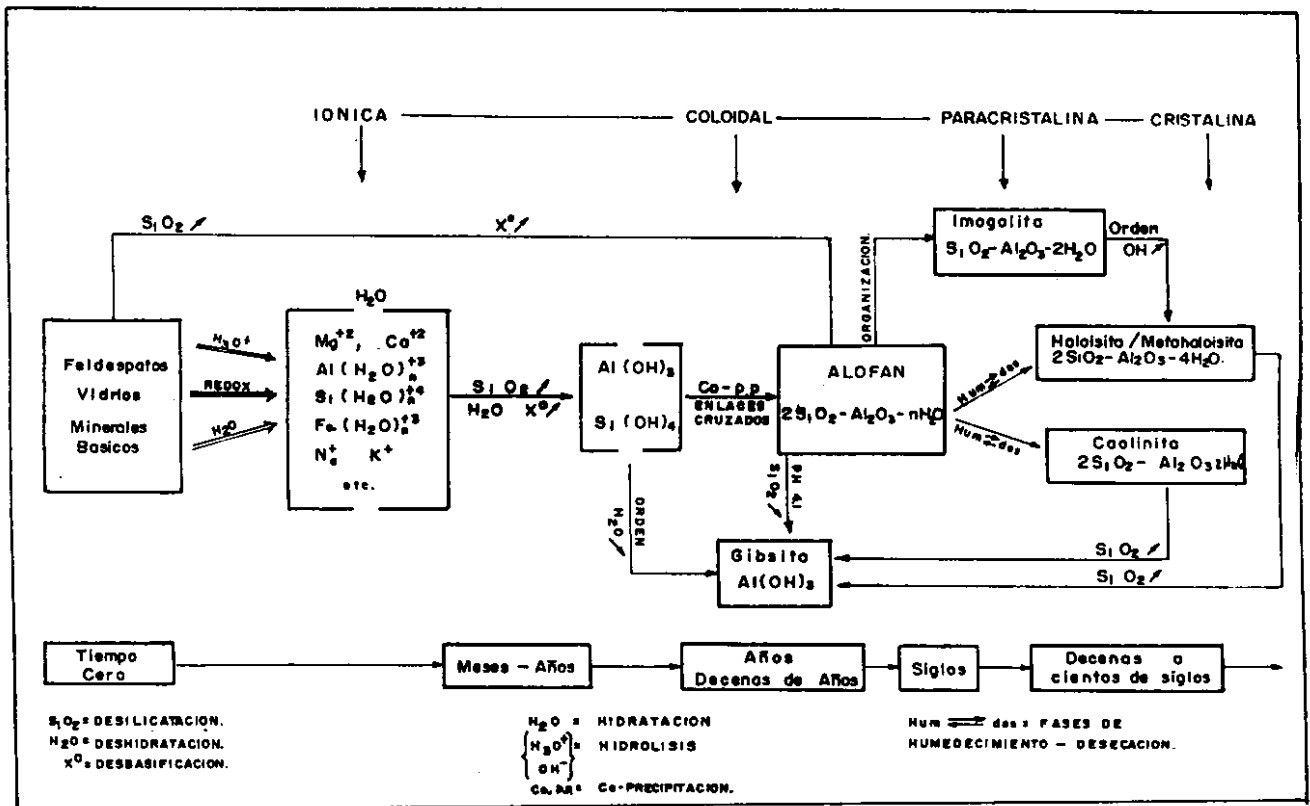


Figura 1. Esquema de las reacciones probables que se forman durante la meteorización de cenizas volcánicas en condiciones adecuadas de humedad y drenaje.

En el desarrollo de esta secuencia podrían considerarse cuatro etapas: iónica, coloidal, cripto-cristalina o para-cristalina y cristalina.

En el proceso de "andolización" o "alofanización" las primeras etapas serían sumamente rápidas. La etapa iónica, por ejemplo, se cumpliría en meses; la etapa coloidal podría iniciarse en meses o años y una vez formado el alofan, éste podría persistir por algunos miles de años en el sistema.

Vidrios volcánicos, feldespatos y minerales básicos originan por meteorización (ej. disolución, hidrólisis, oxidación, reducción, etc.), un sistema iónico, el cual por desilicatación y desbasificación en medio acuoso origina un sistema coloidal incluyendo  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , y  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  altamente hidratados. El pH del sistema es ácido inmediatamente después de depositadas las cenizas, por acción de los componentes sulfurados, pero con las primeras lluvias disminuye fuertemente esta acidez. La disolución posterior de los componentes básicos de las cenizas hacen que el pH del sistema se haga alcalino. A medida que el sistema se desalcaliniza, geles de sílice y alúmina co-precipitan (pH 6.2) para formar el alofan (inicialmente se origina alofan B, luego por integración a través de enlaces cruzados se forma alofan A). El alofan puede evolucionar hacia haloisita o hacia caolinita.

Podría admitirse una evolución de haloisita en caolinita, aunque hay restricciones estructurales. Una fase para - cristalina, la imogolita podría producirse por reordenamiento parcial del alofan, con transformación posterior por deshidroxilación y ordenamiento en haloisita.

El alofan podría desilicatarsé en ambiente ácido para originar gibsita. También la haloisita y caolinita podrían por desilicatación originar gibsita, sin embargo, la gibsita podría también producirse en una fase inicial directamente a partir de geles de aluminio. También el alofan podría producirse directamente a partir de vidrios volcánicos, por reacciones de desilicatación, hidratación y desbasificación.

#### Efecto del alofan en la retención de fósforo

Es bien sabido el papel que desempeñan las arcillas en la retención de los fosfatos, y de aquellas, quizás es el alofan el que exhibe esta propiedad en grado máximo.

Algunos autores citados por Ospina (13), sugieren que en suelos que contienen alofan, la relación  $\text{Al}/\text{Al} + \text{Si}$ , es el factor determinante de la adsorción y disponibilidad del fosfato. La adsorción aumenta y la disponibilidad disminuye al aumentar el contenido de aluminio en la fase amorfa.

Es evidente entonces que el aluminio es responsable en gran parte por la retención del fosfato en los andosoles, retención que bien puede ser a través de un mecanismo de adsorción, precipitación,

hidrólisis o disociación y que merece ser descifrado para cada suelo, si se quiere llegar a un conocimiento cabal sobre el comportamiento del fósforo aplicado y sus implicaciones en el manejo de los suelos.

#### Dinámica del fósforo en el suelo

La química del fósforo en el suelo es tan complicada que cualquier presentación del tema puede salirse fácilmente de las manos a menos que se fijen límites de discusión.

Desde el punto de vista de la nutrición vegetal existen tres importantes fracciones del fósforo en los suelos: a) fósforo en la solución del suelo; b) fósforo en la fracción lábil y c) fósforo en la fracción no-lábil.

La primera fracción está definida claramente como el ión fosfato "actualmente" en la solución del suelo. La segunda es el fosfato que se mantiene moderadamente unido a superficies activas y que está en equilibrio con el fósforo de la solución; usualmente también se denomina fosfato intercambiable. La tercera es el fosfato insoluble tanto orgánico como inorgánico y que sólo puede liberarse hacia la fracción lábil en forma muy lenta. Estas dos últimas fracciones comprenden entre el 95 y el 99% del fósforo total del suelo (9).

#### P-inorgánico en la fracción no-lábil

El fósforo inorgánico insoluble en los suelos está asociado en su mayor parte a tres elementos metálicos, de los cuales el hierro y el aluminio son los principales responsables en suelos ácidos y el calcio en suelos neutro-alcalinos.

El conocimiento de las interacciones del fósforo con estos elementos en sus diferentes formas, es de gran interés para interpretar las relaciones suelo-planta, conocer la dinámica de este elemento e interpretar los procesos de génesis y desarrollo de los suelos.

#### P-orgánico en la fracción no-lábil

La cantidad de fósforo insoluble que está en forma orgánica varía ampliamente y en general constituye entre 30 y 85% en el horizonte superficial. Este es particularmente alto en suelos ácidos y generalmente se le relaciona con el carbono y el nitrógeno en proporciones de aproximadamente 110 partes de C, 9 partes de N y una parte de P.

Los compuestos que han sido identificados con mayor exactitud son los inositol-fosfatos (fitatos), fosfolípidos y ácidos nucleicos. Además de estos tres grupos hay evidencias de cantidades pequeñas de fosfo-proteínas y azúcar-fosfato.

Los inositol-fosfatos existen en el suelo en formas muy complejas, probablemente unidos en un compuesto que contiene carbohidratos y proteínas.



o bien, ligados químicamente a moléculas mayores a través de sus grupos fosfóricos. Estos compuestos son muy resistentes a la descomposición y su acumulación se ha atribuido a interacciones físico-químicas con los coloides del suelo, similares a aquellas responsables de la fijación de fofatos (1).

### Fósforo en la fracción lábil

En el conjunto de procesos por los cuales el fofato existente en solución desaparece de ella para pasar a la fase sólida del suelo, ocurren dos fenómenos diferentes: por un lado, parte del fofato es retenido por el suelo de tal manera que es posible su posterior extracción con ácidos diluidos. Este fósforo se considera disponible para las plantas, pues se encuentra en un equilibrio dinámico con el fósforo que permanece en la solución del suelo. A este proceso la mayoría de los autores lo denominan "retención de fofato". De otro lado, parte del fósforo en solución, o el mismo fósforo retenido en forma intercambiable va siendo paulatinamente fijado por la fase sólida en forma no-intercambiable, es decir, que a medida que estas formas "envejecen" van pasando lentamente de la fracción lábil a la no-lábil.

A este proceso se le suele denominar "fijación", aunque el término es una exageración, puesto que las reacciones del fósforo no son totalmente irreversibles. La extensión y características de la superficie de adsorción son los factores más importantes que controlan la concentración de fósforo en la solución del suelo.

### Fósforo en la solución del suelo

Se acepta universalmente que la mayor fuente de fósforo que utilizan los vegetales es como  $H_2PO_4$  presente en la solución del suelo. Teniendo en cuenta que la concentración de fósforo en el interior de la planta es usualmente 1.000 veces mayor que en el exterior, es evidente que se necesita mucha energía para que ocurra la absorción con tal gradiente de concentración.

La velocidad de difusión del ión fofato es inferior a la velocidad de captación por las raíces, razón por la cual se produce una zona de agotamiento. Al añadir fertilizante fosforado al suelo se rompe ese equilibrio manteniéndose alta la concentración de fósforo soluble cerca de la raíz por períodos relativamente largos, dependiendo de la capacidad de fijación de ese suelo. Sin embargo, solamente entre el 10 y el 25% del fertilizante es captado por la cosecha; el resto permanece como "fosfato residual" para próximas cosechas.

### Transformaciones microbiológicas del fósforo

Muchos de los microorganismos más comunes del suelo, tanto bacterias como hongos, son capaces de disolver fofatos orgánicos e inorgánicos. La

complejación es tal vez el mecanismo más importante de solubilización de fofatos cuando actúan los microorganismos del suelo al segregar al medio ácidos orgánicos (láctico, cítrico, málico y otros), que complejan fuertemente el calcio, el hierro y el aluminio (14).

Muchas plantas cultivadas y silvestres forman una asociación simbiótica con hongos del suelo. En este tipo de asociación denominada *micorriza*, el hongo invade parte del tejido de la raíz y así, la planta y el hongo se benefician de ella.

Aunque existen dificultades prácticas para promover la formación de micorrizas en el campo, este aspecto tiene un gran potencial agrícola para ahorrar fertilizantes y aumentar la productividad (10).

### El fósforo en andosoles de la Sabana de Bogotá

Desde el año de 1975 se vienen adelantando en el Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia, con la colaboración del Instituto Nacional de Investigaciones Químicas —INGEOMINAS— y el Instituto Colombiano Agropecuario —ICA—, algunos trabajos de investigación relacionados con el comportamiento del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas de la Sabana de Bogotá.

En estos estudios se evalúan aspectos de gran importancia como son: Capacidad de retención de fofatos y su disminución por aplicación de silicatos; transformaciones del fósforo en el suelo al aplicarlo como fuentes de alta y baja solubilidad y mejor aprovechamiento de roca fosfórica nacional.

#### 1. Retención de fofatos en suelos de la Sabana de Bogotá (Serie Tibaitatá)

Trabajando con doce suelos de la Serie Tibaitatá, se estudió la relación existente entre la capacidad de retención de fósforo y algunas características químicas del suelo, así como también la influencia que tienen diferentes fuentes y dosis silicatadas sobre la retención (13).

Los suelos estudiados presentaron una alta capacidad de retención (entre el 90 y el 99% del fósforo suministrado fue retenido por el suelo) y de acuerdo con las correlaciones encontradas (Figs. 2, 3 y 4), dicha retención depende primordialmente del contenido de materia orgánica, y óxidos de hierro y aluminio. Por otra parte al existir una acidez manifiesta, se puede suponer el establecimiento de un equilibrio silicato-fofato en el complejo de adsorción del suelo. Según la Fig. 5, incrementos en el contenido de sílice disminuyen la retención de fósforo. Estas correlaciones concuerdan con estudios realizados por Guerrero (6) en suelos volcánicos del sur de Colombia.

Con base en los resultados anteriores se estudió la influencia de fuentes silicatadas en la capaci-

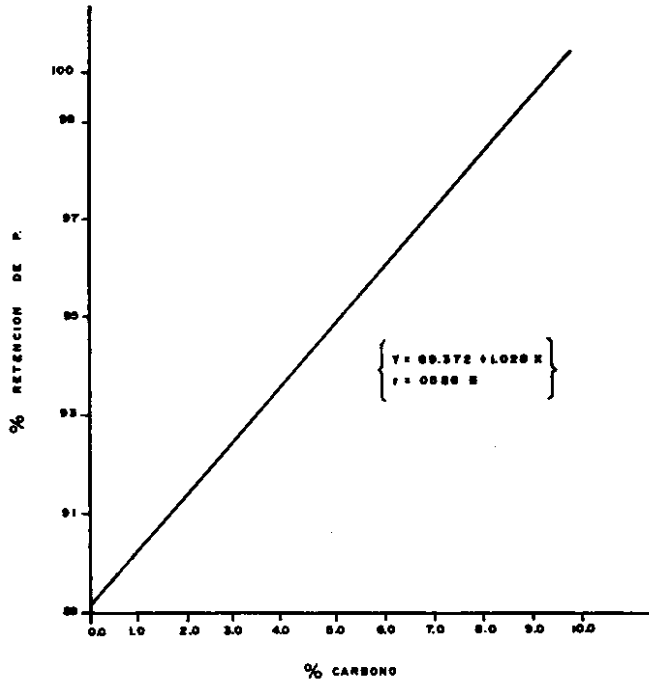


Figura 2. Relación entre la retención de fósforo y la materia orgánica en andosoles de la Sabana de Bogotá.

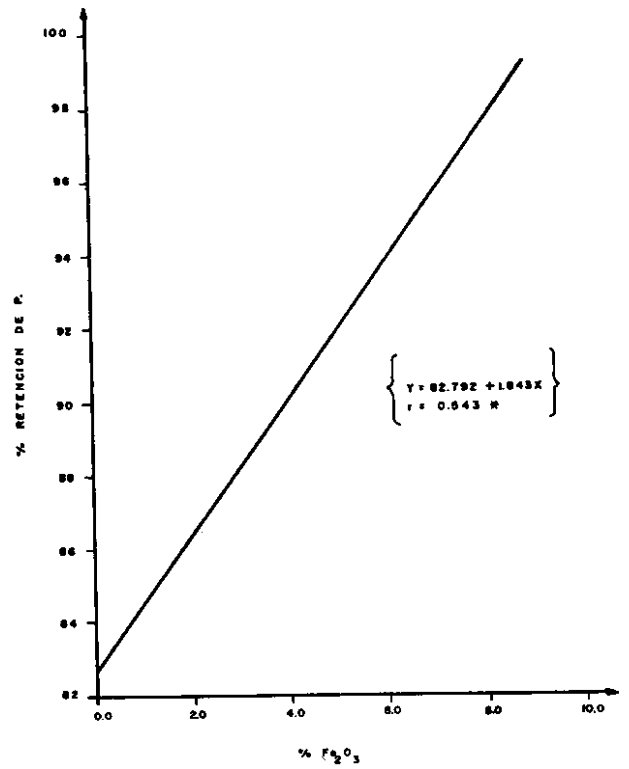


Figura 3. Relación entre la retención de fósforo y el contenido de hierro en andosoles de la Sabana de Bogotá.

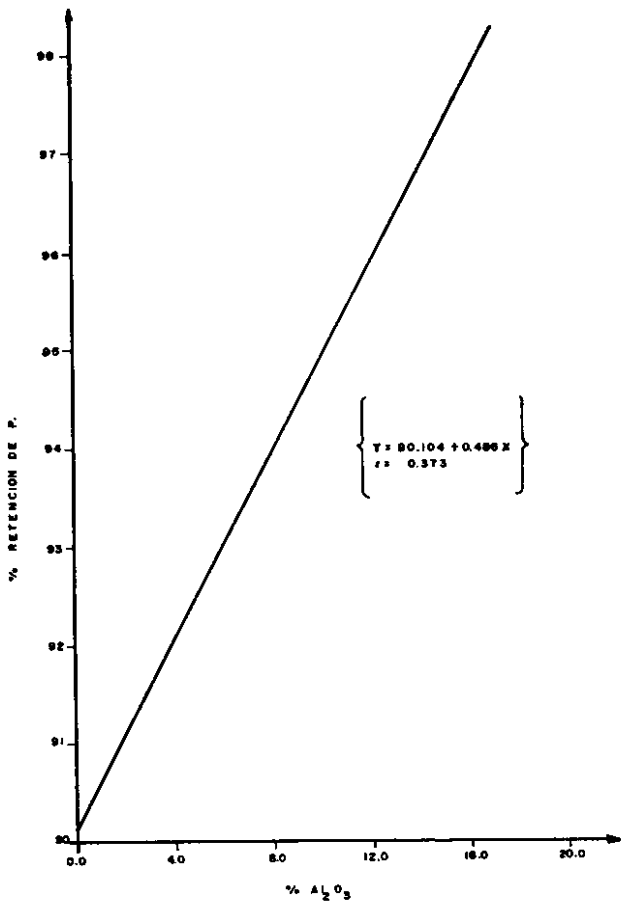


Figura 4. Relación entre la retención de fósforo y el contenido de aluminio en andosoles de la Sabana de Bogotá.

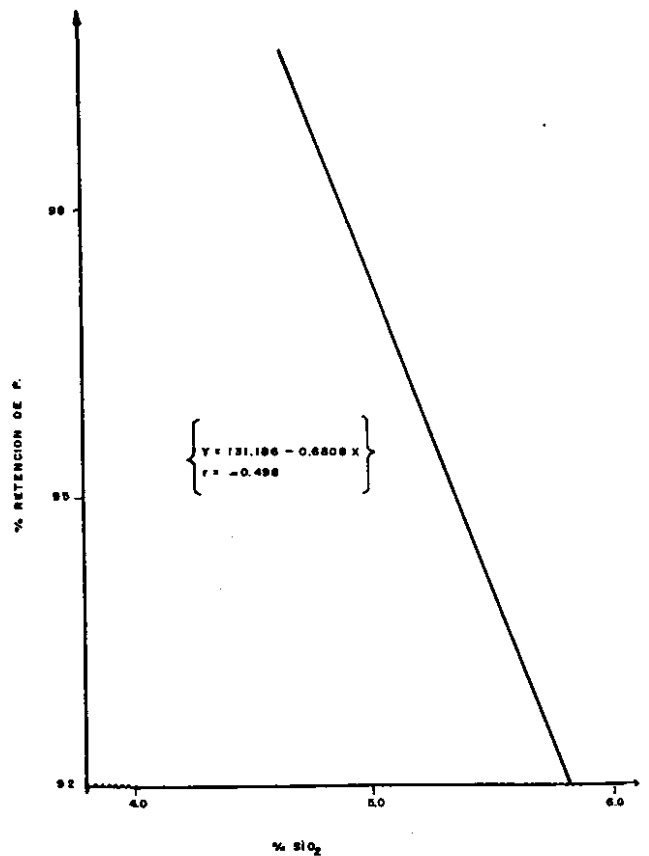


Figura 5. Relación entre la retención de fósforo y el contenido de sílice en andosoles de la Sabana de Bogotá

dad de retención de fósforo. Según la Tabla 1, la aplicación de silicato de sodio en dosis de 25, 50, 100 y 200 p.p.m., presentó un efecto favorable en la disminución de la capacidad de retención y por ende en la disponibilidad de fósforo en el suelo.

TABLA 1

Capacidad de retención con y sin aplicación de silicato de sodio, en andosoles de la Sabana de Bogotá.

MUESTRA	SIN APLICAC. DE SILICATO SODIO	25 p.p.m. SILICATO DE SODIO	50 p.p.m. SILICATO DE SODIO	100 p.p.m. SILICATO DE SODIO	200 p.p.m. SILICATO DE SODIO
1	95.50	95.00	93.70	90.30	91.40
2	90.00	86.80	82.20	79.80	80.00
3	93.00	91.20	87.80	87.60	87.80
4	96.70	93.20	90.00	88.70	86.90
5	97.00	96.00	92.20	91.10	91.20
6	97.50	96.50	95.00	93.20	93.00
7	98.90	95.50	92.00	90.50	91.00
8	98.85	98.00	98.00	91.15	93.40
9	99.10	96.70	90.00	88.14	87.20
10	99.60	96.00	89.80	89.50	89.50
11	94.60	92.20	89.50	85.70	85.50
12	99.20	95.40	89.20	86.00	89.50

Teniendo en cuenta que esta serie de experimentos se llevó a cabo a nivel de laboratorio, sería de gran importancia realizar experimentos en el campo con diferentes silicatos para determinar el efecto en el rendimiento de los cultivos y el comportamiento de las variables físico-químicas respecto a la fijación de fosfatos.

En suelos con características similares a los estudiados, la aplicación de escorias Thomas (Calfos), podría ser una buena alternativa, ya que contienen silicatos, calcio y fósforo, elementos indispensables para incrementar los rendimientos en los cultivos.

## 2. Transformaciones del fósforo aplicado al suelo como fertilizante

Cuando se añade un fertilizante fosforado al suelo, los iones fosfato que se liberan por disolución, no permanecen en su forma original, sino que son objeto de transformaciones casi siempre debidas a fenómenos de adsorción y precipitación. La distribución de los fosfatos inorgánicos en el suelo depende del grado de meteorización y desarrollo de

los suelos (4). En suelos poco meteorizados (moli-soles), predominan los fosfatos cálcicos; en suelos derivados de cenizas volcánicas (andosoles), predominan los fosfatos unidos al aluminio y al hierro y en los suelos maduros (oxisoles), predominan los fosfatos ocluidos en los hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso.

El pH es el principal factor químico que controla las transformaciones de un compuesto en otro. En la medida que los suelos sean más ácidos, las actividades del hierro y aluminio aumentan y los fosfatos de calcio relativamente solubles se convierten en fosfatos insolubles de hierro y aluminio. Por otra parte la descomposición de la roca fosfórica en suelos ácidos se debe a la presencia de los iones  $H^+$  procedentes de la hidrólisis del  $Al^{3+}$ .

Bajo condiciones de invernadero y utilizando sorgo Dorado (*Sorghum vulgare*) como planta indicadora, se evaluó el efecto de aplicación de roca fosfórica y superfosfato triple en dosis de 100, 200, 300 y 400 Kg de  $P_2O_5$ /Ha., en un andosol de la Sabana de Bogotá. Los resultados se compararon con un oxisol de los Llanos Orientales.

En la primera parte de esta investigación (11), se estudió el efecto de las dos fuentes fosfóricas sobre el rendimiento, disponibilidad y absorción de fósforo por la planta.

De acuerdo con los resultados obtenidos la mayor respuesta a la fertilización fosfórica (Fig. 6), se registró en el oxisol utilizando como fuente el superfosfato triple.

En cuanto al fósforo disponible, el andosol presentó contenidos muy bajos comparado con el oxisol y no presenta modificaciones sustanciales después de cada una de las cosechas por efecto de los niveles aplicados. Este comportamiento es debido a la alta fijación mostrada por este suelo.

Respecto a la absorción de fósforo por la planta, el andosol presentó pequeños incrementos comparado con el oxisol, el cual presentó una alta absorción cuando se aplicó superfosfato triple. En general se observó que existe una correlación entre el fósforo disponible del suelo, el absorbido por la planta y el rendimiento.

En la segunda parte de esta investigación (12), se consideró de especial interés evaluar las diferentes fracciones de fósforo, lo mismo que las transformaciones que sufren éstas después de dos cosechas consecutivas.

El efecto producido por la aplicación de superfosfato triple y roca fosfórica se muestra en la Fig. 7.

Después de la primera cosecha, el fósforo inorgánico predomina en ambos suelos (60.7% en el oxisol y 57.6% en el andosol). La contribución del P-

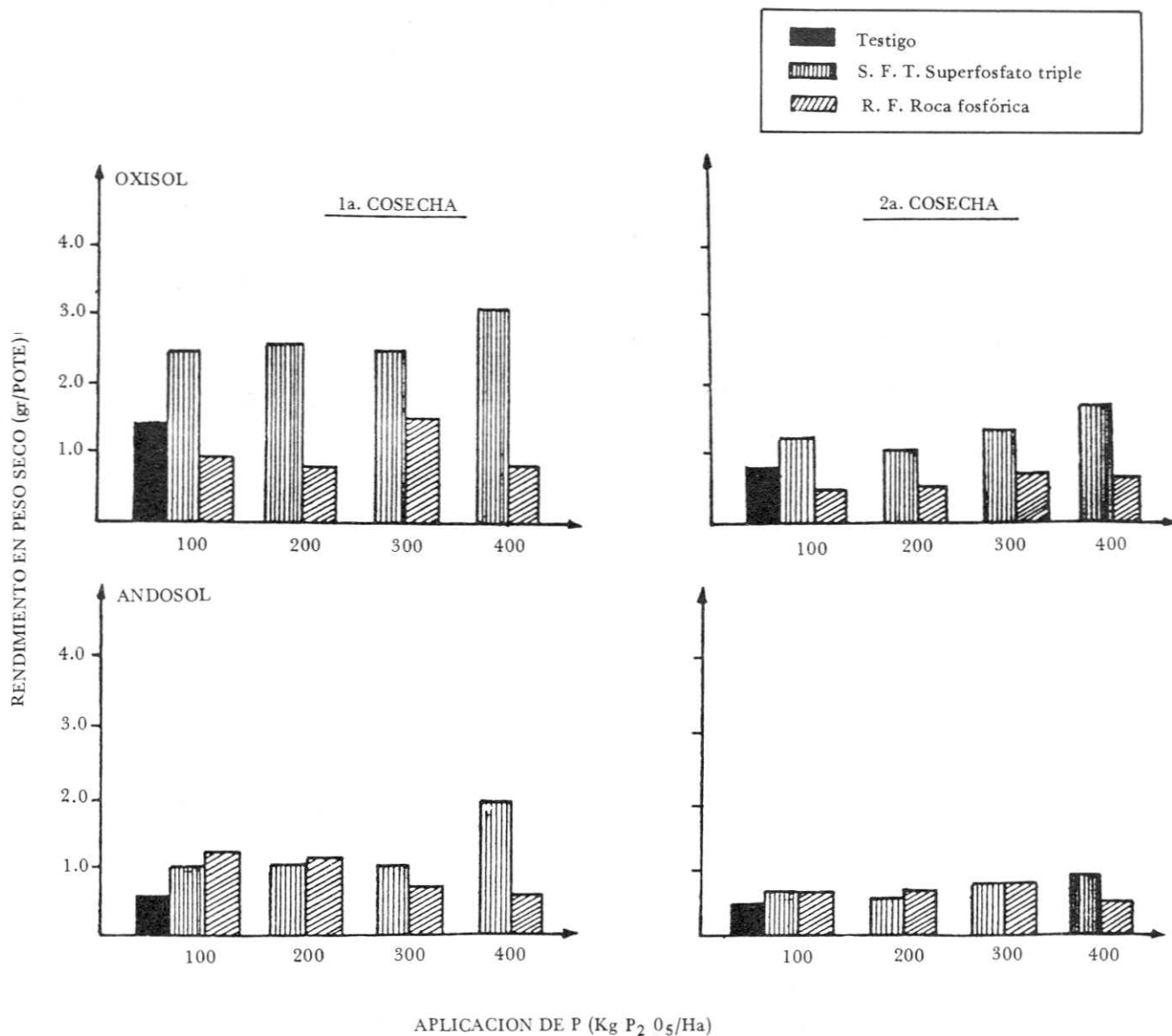


Figura 6. Efecto de las fuentes y niveles de fósforo sobre el rendimiento en peso seco en un andosol de la Sabana de Bogotá y un oxisol de los Llanos Orientales.

Ca es muy baja. Sobre la fracción P-inorgánico se nota un predominio de las formas P-Fe en el oxisol y P-Al en el andosol.

Después de la segunda cosecha, los tratamientos testigo muestran una disminución de la fracción P-Ca, lo cual hace suponer que la planta toma preferencialmente esta fracción. En el oxisol, la fracción P-Fe muestra un incremento, que es más marcado cuando se aplica superfosfato triple; la fracción P-Al en este suelo no sufre ninguna variación. Por el contrario, en el andosol la fracción P-Al se incrementa, mientras que la fracción P-Fe no sufre variación.

Este comportamiento nos confirma que la retención de fósforo se debe en gran parte a la actividad del aluminio en los andosoles y a la formación de fosfatos de hierro en los oxisoles.

### 3. Efectividad agronómica de la roca fosfórica en andosoles

La eficiencia de la fertilización fosfatada en suelos con alta capacidad de fijación de fósforo se estima en tan solo 10 a 20%, es decir, que para el caso de nuestro país, de las 80.000 toneladas métricas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> que se aplican anualmente, se estarían perdiendo de 64.000 a 72.000 toneladas métricas en el mismo lapso (6).

Con el fin de incrementar el fósforo aprovechable en estos suelos, es necesario aplicar grandes cantidades de fertilizantes, lo cual hace difícil justificar que los requerimientos de fósforo se suplan mediante el uso de superfosfato triple debido a su alto costo por unidad de fósforo y a su alta solubilidad en agua.

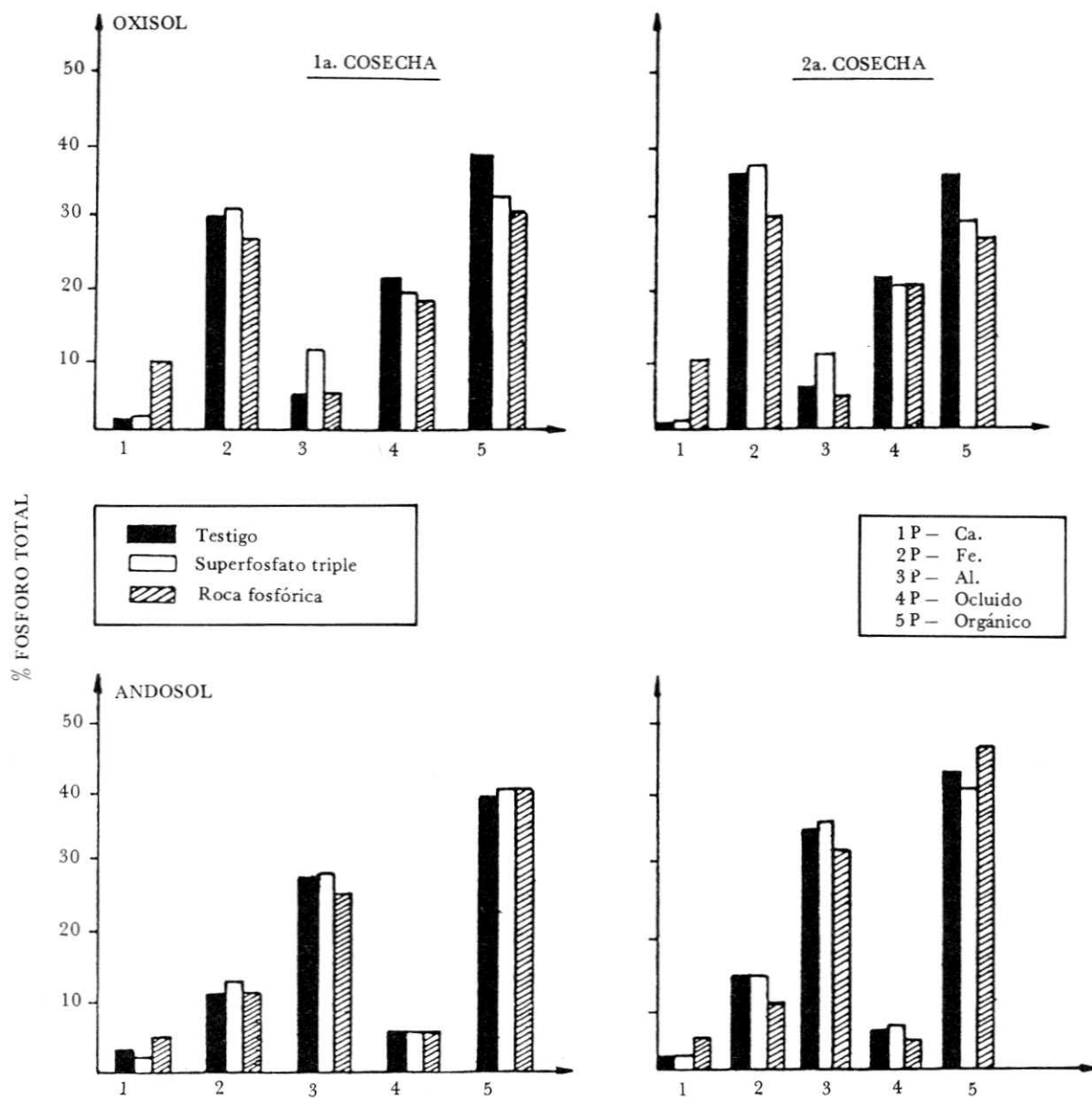


Figura 7. Efecto de dos fuentes fosfatadas sobre las fracciones de fósforo, en un andosol de la Sabana de Bogotá y un oxisol de los Llanos Orientales, después de cada una de las cosechas

Por lo tanto será necesario recurrir a fuentes de fósforo que tengan un precio más razonable, pero que sean agrónomicamente más efectivas. En nuestro país la roca fosfórica de Pesca (Boyacá), ha sido clasificada como de reactividad intermedia, lo cual hace interesante tratar de incrementar su actividad agronómica mezclándola con fertilizantes nitrogenados tales como urea, nitrato, sulfato y cloruro de amonio, de tal manera que al reaccionar en el suelo, se produzca acidez y se libere el fósforo presente en la estructura cristalina de la fluorapatita.

Teniendo en cuenta las razones anteriores, se evaluó mediante un ensayo de invernadero la efectividad de las mezclas roca fosfórica-fertilizante nitrogenado en un andosol de la Sabana de Bogotá (Serie Bermeo). Se comparó el rendimiento, la absor-

ción de fósforo por rabanito rojo (*Raphanus sativus*) y el efecto residual, con mezclas patrón utilizando superfosfato triple como fuente soluble de fósforo (7).

**Rendimiento en materia seca (Fig. 8).** Las mezclas roca fosfórica + fertilizante nitrogenado produjeron rendimientos muy inferiores a los obtenidos con las mezclas patrón en la primera cosecha. Sin embargo se destaca el rendimiento para la mezcla roca fosfórica + urea. En la segunda cosecha las mezclas roca fosfórica + fertilizante nitrogenado produjeron un incremento muy significativo con relación a la primera cosecha. Los máximos rendimientos correspondieron a las mezclas roca fosfórica + urea y roca fosfórica + nitrato de amonio. Por el contrario, los rendimientos para las mezclas patrón disminuyeron.

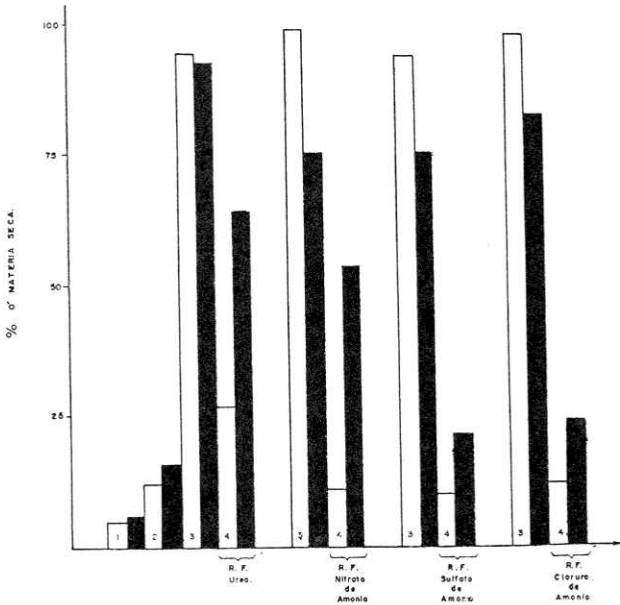
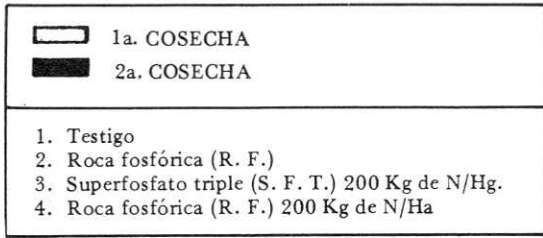


Figura 8. Efecto comparativo de las mezclas roca fosfórica + fuente nitrogenada en el rendimiento de *Raphanus Sativus*, en un andosol de Subachoque (Cundinamarca).

Fósforo absorbido (Fig. 9). En la primera cosecha la absorción de fósforo por la planta cuando

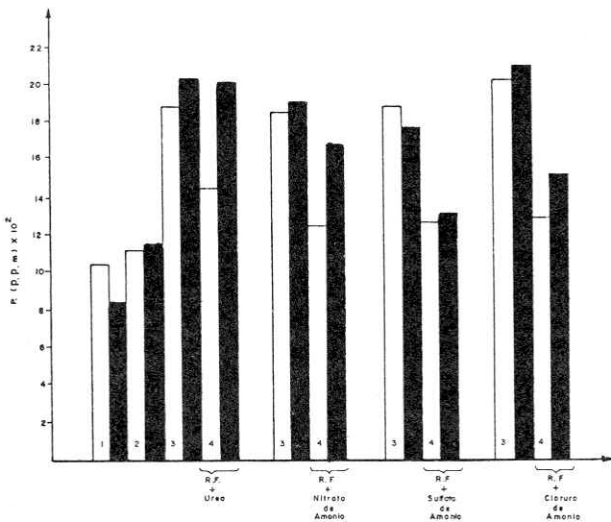
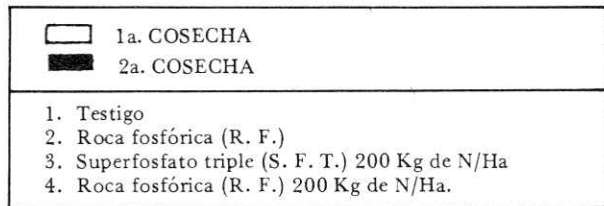


Figura 9. Efecto de los niveles y fuentes de Nitrógeno aplicadas con (R. F) roca fosfórica en la absorción de fósforo por *Raphanus Sativus*, en un andosol de Subachoque (Cundinamarca).

se emplearon las mezclas roca fosfórica + fertilizante nitrogenado, fue inferior a la que se presentó con las mezclas patrón. En la segunda cosecha hubo un incremento significativo para las mezclas roca fosfórica + urea y roca fosfórica + nitrato de amonio. En general se observó una correlación entre la absorción de fósforo y el rendimiento.

Efecto residual (Fig. 10). Después de las dos cosechas, el efecto residual de las mezclas roca fosfórica + urea y roca fosfórica + nitrato de amonio fue superior al de las mezclas patrón correspondientes. Mientras que el efecto de las mezclas roca fosfórica + sulfato de amonio y roca fosfórica + cloruro de amonio fueron, en promedio, equivalentes a las mezclas patrón correspondientes.

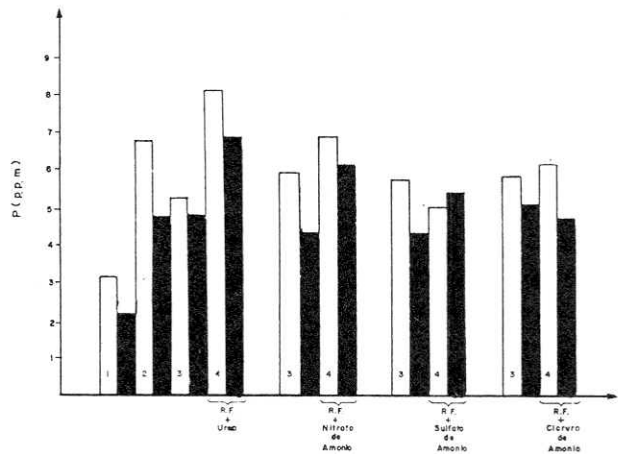
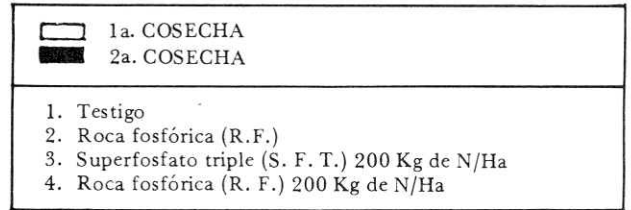


Figura 10. Contenido de fósforo extractable (BRAY II), después de cada cosecha —efecto residual— en un andosol de Subachoque (Cundinamarca).

Perspectivas de investigación

De las investigaciones presentadas en este trabajo y de otras realizadas en el país sobre estos temas, surgen algunas estrategias con el fin de desarrollar sistemas de manejo apropiados para estos suelos. Los principales componentes de estas estrategias podrían ser los siguientes:

- Combinación apropiada de métodos y dosis para estimular los efectos iniciales y residuales del fósforo.
- Estudios encaminados a disminuir la fijación mediante el enclavo o adición de silicatos.
- Uso de fuentes de fósforo menos costosas como rocas fosfóricas combinadas con superfosfato triple o con fertilizantes nitrogenados.

- d. Selección de especies y variedades que puedan crecer bien en condiciones de bajos niveles de fósforo aprovechable.
- e. Exploración de las posibilidades prácticas de las asociaciones de micorrizas para aumentar la absorción de fósforo por las plantas.

## BIBLIOGRAFIA

1. ALEXANDER, M. 1977. Introduction to soil microbiology Wiley-sons. New York, 467 p.
2. BESOAIN, E. 1972. Mineralogía de arcillas de algunos suelos volcánicos de Costa Rica. II Panel sobre suelos volcánicos. Pasto. Colombia.
3. ESPINOSA, A. 1975. Influencia de formas y dosis de silicatos en la capacidad de retención de fósforo en suelos de la Sabana de Bogotá (Serie Tibaitatá). Tesis de Grado. Departamento de Química. Universidad Nacional.
4. FASSBENDER, H.W. 1969. Estudio del fósforo en suelos de América Central. Capacidad de fijación de fósforo y su relación con características edáficas. Turrialba 19 (4): 497-505.
5. GUERRERO, R.R. 1972. Estado y fijación de fósforo en suelos volcánicos del sur de Colombia. Simposio Universidad de Pasto 36 p. (Mimeografiado).
6. ————. 1983. Los fertilizantes químicos, propiedades y comportamiento agronómico. Colección Punto Verde No. 4. Monómeros Colombo-Venezolanos.
7. HERNANDEZ, I. y R. AVILA, 1984. Efecto de la adición de urea, nitrato, sulfato y cloruro de amonio en la disolución de roca fosfórica aplicada a un suelo derivado de cenizas volcánicas. Tesis de Grado. Departamento de Química. Universidad Nacional.
8. LUNA, C. 1969. Aspectos genéticos de "andosoles" en Colombia. I Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba. Costa Rica.
9. MENGEL, K., y E.A. KIRBY. 1978. Principles of plant nutrition. International Potash Institute (Editor). Swizerland.
10. MUNEVAR, F. 1983. Principales procesos microbiológicos en el suelo y su función en la producción agropecuaria. Suelos Ecuatoriales. 13 (2): 7-18.
11. OJEDA, F., J. QUINTERO y R. LORA. 1980. Comportamiento del fósforo aplicado al suelo a partir de roca fosfórica y superfosfato triple en dos suelos colombianos. I Disponibilidad y absorción por la planta. Rev. Col. de Química 10 (1): 21-32.
12. ————. 1982. Comportamiento del fósforo aplicado al suelo a partir de roca fosfórica y superfosfato triple en dos suelos colombianos. II Efecto sobre las diferentes fracciones del fósforo. Rev. Col. de Química 11 (10): 1-9.
13. OSPINA, O. 1974. El fósforo en los andosoles. Suelos ecuatoriales 6 (1): 97-135.
14. QUINTERO, J. y F. BORIE. 1984. Solubilización in vitro de fosfatos orgánicos e inorgánicos por hongos del suelo. Suelos Ecuatoriales. 4 (1): 126-131.
15. SERVICIO GEOLOGICO NACIONAL. 1962. Mapa Geológico de Colombia. Minpetróleos. Colombia.



# FIJACION SIMBIOTICA DE NITROGENO: ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS\*

por

Gerardo Pérez Gómez\*\*

## Resumen

Pérez, G.: Fijación simbiótica de Nitrógeno: estado actual y perspectivas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66):477-487, 1990. ISSN 0370-3908.

Se presenta una síntesis del proceso destacando los avances realizados durante los últimos años en el conocimiento de las etapas de infección por *Rhizobium*, fijación del N atmosférico y asimilación de N por las plantas. Se plantean posibilidades de desarrollo futuro.

## Introducción

Se celebra este año el centenario del aislamiento por Beijerinck de bacterias del género *Rhizobium* a partir de nódulos de leguminosas. El uso de estas plantas para fertilizar el suelo se conoce desde la antigüedad y ya Catón (s III A.C.) recomendaba el uso de lupinus como abono verde. Las bases científicas de esta práctica agrícola comenzaron a ser estudiadas a partir del hallazgo de Beijerinck y muy pronto se hizo evidente la importancia del proceso conocido como Fijación de Nitrógeno. Se calcula que anualmente se incorporan a la biomasa  $230 \times 10^6$  tons. de  $N_2$  que provienen de Nitrógeno atmosférico fijado como  $NH_3$ ; de esta cantidad un 30% se fija a través de una simbiosis entre leguminosas y *Rhizobium* con unos costos energéticos muy inferiores a los requeridos para la síntesis industrial del  $NH_3$  usado como materia prima para la producción de fertilizantes.

La crisis energética de la década del 70 y los problemas de contaminación asociados al uso indis-

criminado de fertilizantes nitrogenados dieron un nuevo impulso a las investigaciones sobre la Fijación Simbiótica de Nitrógeno centrándose la atención sobre el sistema *Rhizobium*-leguminosa que constituye una importante alternativa para la producción agrícola de leguminosas de grano y forrajeras.

En este trabajo se presenta un panorama resumido de nuestros conocimientos actuales sobre este sistema biológico y se señalan algunos campos donde previsiblemente se harán avances significativos en un futuro cercano.

## Etapas del proceso

Consideraremos tres etapas:

- Infección de la leguminosa por el *Rhizobium*
- Fijación del Nitrógeno atmosférico
- Asimilación del Nitrógeno por la planta

## Infección

Los estudios ultraestructurales de Callaham y Torrey (1981) y Newcomb (1981) han permitido una descripción detallada de los complejos pasos que ocurren en esta etapa.

Ella comienza por una colonización de la rizosfera por las bacterias presentes en el suelo que por

\* Estudio científico leído en el recinto de la Academia el 22 de junio de 1988 con ocasión de su posesión como académico correspondiente.

\*\* Laboratorio de Bioquímica, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

quimiotaxis se dirigen a las cercanías de la raíz donde la concentración de nutrientes exudados por la misma es mayor. Se presenta entonces una adhesión sobre la superficie del pelo radicular que parece ser específica (Caetano-Anollés y Favelukes, 1986) acompañada de modificaciones en el mucigel (Greaves y Darbyshire, 1972). Esta preinfección es seguida por una unión del *Rhizobium* a la superficie del pelo que está caracterizada por un alto grado de especificidad de modo que una especie dada de *Rhizobium* infecta una cierta especie de leguminosa (ej: *Rhizobium leguminosarum*—*Pisum sativum*; *Rhizobium meliloti*—*Medicago sativa*, etc.); esta especificidad ha servido para clasificar operacionalmente las especies de *Rhizobium* y tiene una base genética.

La unión específica de la bacteria causa un redireccionamiento del crecimiento de la pared celular del pelo radicular apareciendo deformaciones y un encrespamiento marcado del mismo; como resultado el *Rhizobium* queda atrapado en la curvatura del pelo y allí las condiciones locales favorecen un incremento de las concentraciones de eventuales metabolitos y enzimas que pueden modificar la pared celular del hospedero. En este contexto es interesante la hipótesis de Hubbell (1981) que propone una interacción de componentes superficiales de la bacteria y del pelo conducente a los diferentes tipos de deformación observados. A continuación el *Rhizobium* penetra la pared celular del pelo y provoca una resíntesis de la misma quedando encapsulado en lo que se conoce como el hilo de infección, al interior del cual van proliferando las bacterias; paralelamente ocurre una migración del núcleo del pelo hacia la base orientando el desarrollo del hilo de infección en dirección de las células corticales.

En seguida el hilo comienza a atravesar las capas externas de células corticales induciendo la formación de tejido meristemático en las próximas capas; una vez que llega allí el *Rhizobium*, las células al ser infectadas dejan de dividirse y empieza la división en la próxima capa lo cual va formando el tejido nodular. En esta zona cortical el hilo es intra o intercelular y con frecuencia aparece ramificado; su crecimiento y la disposición de nueva pared celular es un proceso muy bien regulado.

Al infectar la célula los *Rhizobium* se desprenden del extremo del hilo de infección que allí no tiene pared y ocasionan un considerable aumento en el volumen de la célula, proliferando en su interior separadas del citoplasma por una membrana peribacterial, dando origen a los bacteroides cuyas características morfológicas y funcionales son diferentes a las de las bacterias en vida libre. Morfológicamente los cambios más notables residen en la variedad de formas, el adelgazamiento de la pared celular y la acumulación polar de polihidroxibutirato en ciertas especies de *Rhizobium*. Funcionalmente los bacteroides maduros poseen una Nitrogenasa muy activa, excretan  $\text{NH}_3$ , tienen una alta rata de

síntesis de proteínas provocando una acumulación de leghemoglobina y dependen de la planta para la obtención de energía.

El desarrollo del tejido nodular origina varias capas bien diferenciadas:

- la corteza que es una región con tejido vascular
- el meristema
- la zona de infección
- la zona con bacteroides inmaduros
- la zona con bacteroides funcionales
- tejido senescente

El proceso se detiene cuando el nódulo alcanza una masa y morfología bien definidas para cada especie y después de varias semanas comienza una degradación del tejido acompañada de la muerte de los bacteroides.

### Fijación de Nitrógeno

El sistema enzimático bacterial que reduce el Nitrógeno fue establecido inicialmente en fijadores asimbióticos (*Clostridium pasteurianum*) y se ha demostrado que está presente en todos los microorganismos fijadores de Nitrógeno. En el nódulo, los bacteroides expresan un conjunto de enzimas que transportan los electrones, cedidos por diferentes metabolitos, hasta el Nitrógeno como aceptor final. Las características de estas enzimas se presentan en la Tabla 1. En todas hay un "grupo" de áto-

TABLA 1

### Propiedades de Ferredoxina y Nitrogenasa de *Rhizobium*

	Mr (Kd)	E (volts)	Metal	"Grupo"	Subunid.
Ferredoxina	6	-0.43	II 4 Fe	7 Fe 7 S	
Dinitrogenasa reductasa (Kp)	55 - 65	-0.25	III 3 Fe 4 Fe	4 Fe 4 S	2
Dinitrogenasa (Kp)	56 ( $\alpha$ ) 60 ( $\beta$ )		2 Mo 24 - 26 Fe	20 - 36 S 24 - 36 Fe	2 2

mos de Fe íntimamente asociados a S lábil, cuya estructura no ha sido establecida, participando el Fe (y Mo en la Dinitrogenasa) en el transporte electrónico; la Dinitrogenasa reductasa y la Dinitrogenasa forman en conjunto la Nitrogenasa (Nasa). La secuencia de reacciones se indica en la Fig. 1; el ATP, que proviene de la planta (fotosíntesis), forma un complejo con  $\text{Mg}^{+2}$  y ocasiona un cambio conformacional en la Dinitrogenasa reductasa y disminuye su  $E^{10}$  a  $-0.490$  V. Esta proteína y la Dinitrogenasa son muy sensibles al  $\text{O}_2$  que desempeña un papel regulador muy importante en la fijación (Bothe, 1985). Concomitantemente con la reducción de Nitrógeno, la Nasa reduce protones produ-

ciendo H<sub>2</sub> y consumiendo ATP (Fig. 1); esto implica una reducción en la eficiencia de utilización de energía del 25%.

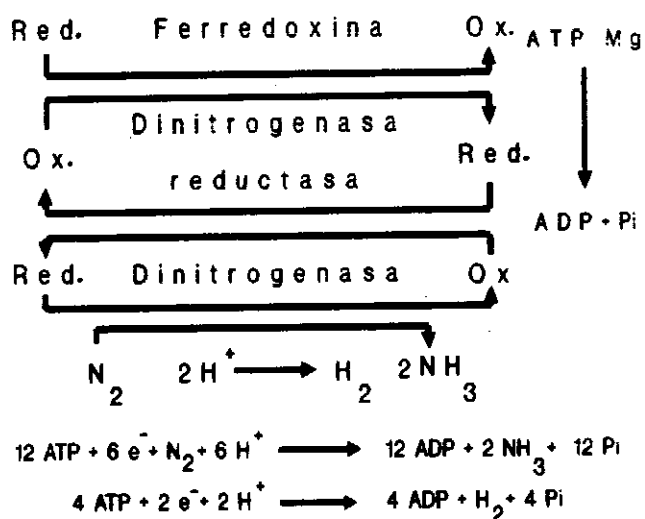


Figura 1. Secuencia del transporte de electrones en la fijación de Nitrógeno.

En algunas especies de *Rhizobium* se ha demostrado la presencia de una Hidrogenasa que recicla el H<sub>2</sub> permitiendo recuperar el ATP consumido (enzima hup) (Fig. 2) (Sprent, 1984); las leguminosas infectadas por *Rhizobium* poseedoras de esta Hidrogenasa, tienen una mayor productividad. Esta proteína es reprimida por concentraciones intermedias de sustratos carbonados (provenientes de la fotosíntesis) y por aire.

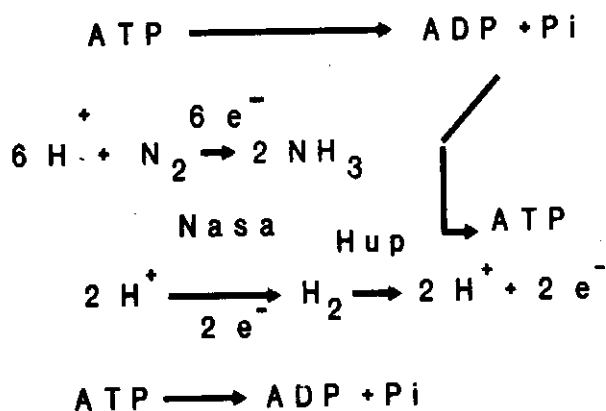


Figura 2. Reciclaje de H<sub>2</sub> por hidrogenasa hup (Sprent, 1984).

Adicionalmente, se encuentran en el nódulo ca. 20-30 proteínas específicas del mismo que son codificadas por el genoma de la planta; la síntesis de estas nodulinas es estimulada por el *Rhizobium* de manera coordinada durante el desarrollo del nódulo y son expresadas antes de la Nitrogenasa y aún en nódulos inefectivos (incapaces de fijar N<sub>2</sub>). en soya (Auger y Verma, 1981) y en arveja (Go-

vers et al, 1985). La nodulina más abundante es la Leghemoglobina (con cuatro clases estructurales) cuya cadena polipeptídica está especificada por genes de la planta y cuyo grupo heme es sintetizado por el bacteroide; esta proteína tiene una gran afinidad por el O<sub>2</sub> por lo cual se ha postulado que actúa transportándolo a los bacteroides y tamponando la concentración de este gas para evitar daños a la Nitrogenasa.

La expresión diferencial de las nodulinas es independiente del grado de desarrollo de los bacteroides, de la excreción del grupo heme por bacteroides y de la fijación de Nitrógeno, con excepción de una nodulina que no aparece si no hay fijación. Basándose en esta expresión diferencial, Govers et al. (1985) han propuesto como funciones posibles para las nodulinas la formación de tejido nodular luego de la diferenciación y proliferación de las células corticales (nodulinas de expresión temprana), el transporte de sustratos a los bacteroides y la asimilación del NH<sub>3</sub> excretado por los bacteroides (nodulinas de expresión tardía).

Asimilación de Nitrógeno

Las leguminosas de zonas templadas (arveja, frijol, alfalfa etc.) incorporan el NH<sub>3</sub> producido en los bacteroides a los sustratos carbonados resultantes de la fotosíntesis por medio de reacciones de transaminación (Fig. 3) formando Gln (Glutamina sintetasa específica del nódulo) y Asn que son exportadas del nódulo al resto de la planta donde proporcionan el Nitrógeno necesario para la síntesis de aminoácidos.

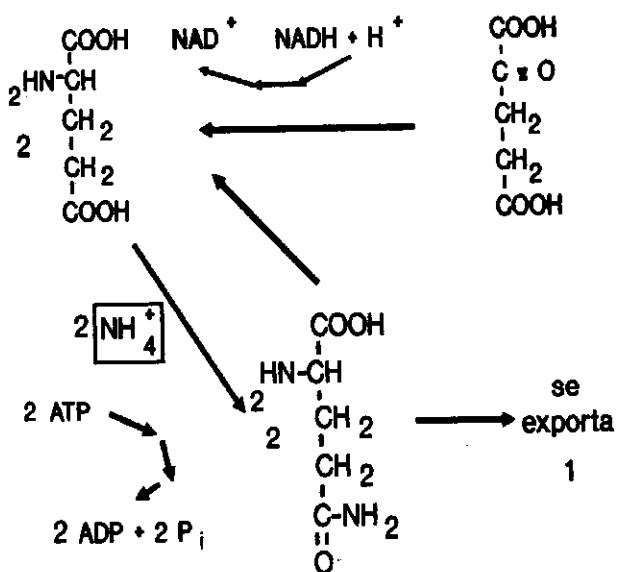


Figura 3. Vía de la Glutamina para la asimilación del Nitrógeno fijado (Sprent, 1984).

En las leguminosas tropicales (soya, maní) la asimilación de Nitrógeno involucra la formación de

ureidos (Fig. 4) como alantoína y ácido alantóico quienes actúan como transportadores del Nitrógeno fijado. En la síntesis de ureidos los esqueletos carbonados también provienen de la fotosíntesis y algunas de las enzimas que intervienen son nodulinas (uricasa, por ej.).

**Genes nif *Klebsiella pneumoniae***

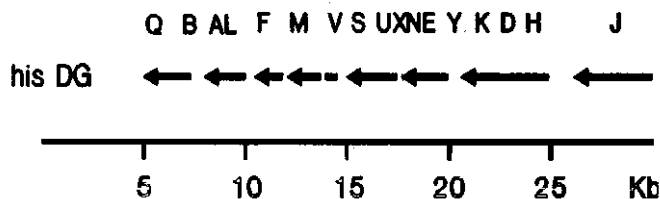


Figura 5. Mapa de los genes fijadores de Nitrógeno (nif) en *Klebsiella pneumoniae* (Ausubel y Cannon, 1981). La longitud de las flechas indica el tamaño relativo de cada gen.

- Los 17 genes constituyen una unidad reguladora (regulón) ligada al operón his.
- Los genes están organizados en 8 unidades transcripcionales; la función de la mayoría de sus productos ha sido establecida (Tabla 2). Los genes H, D, K codifican las subunidades de la Dinitrogenasa reductasa y de la Dinitrogenasa, el gen F codifica la ferredoxina y el procesamiento y síntesis del factor FeMoCo se realizan por los transcritos de varios genes. Los genes L y A actúan como reguladores; el producto de nifA (NIFA) se necesita para la expresión de todos los genes nif (salvo nifA y nifL) y el producto de nifL (NIFL) modula la actividad de NIFA y es afectado por altos niveles de NH<sub>3</sub> y de O<sub>2</sub>.

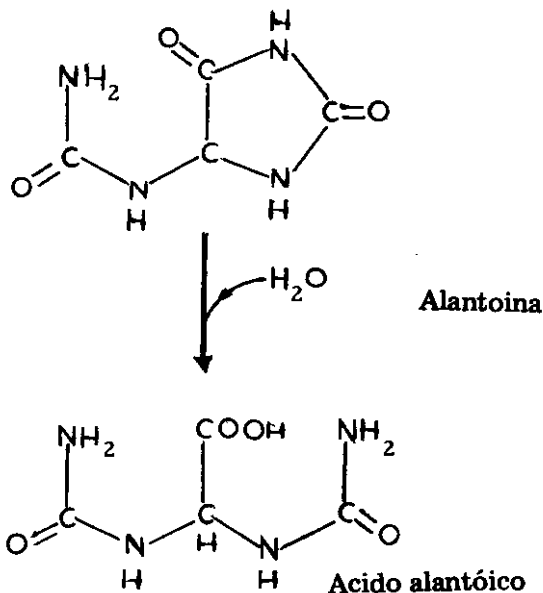
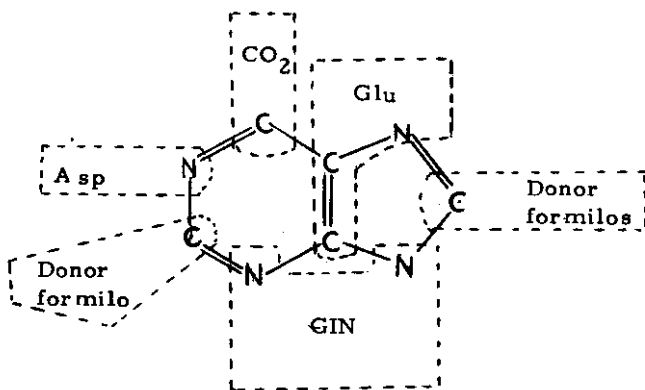


Figura 4. Asimilación del Nitrógeno fijado a través de la formación de ureidos (Sprenst, 1984).

**Genética y regulación de Rhizobium**

**Genética de la fijación**

La genética molecular de los organismos fijadores de Nitrógeno ha sido establecida utilizando como modelo el fijador libre *Klebsiella pneumoniae*. El grupo de Ausubel y Cannon, (1981) determinó el mapa de los genes responsables de la fijación (genes nif) que presenta las siguientes características (Fig. 5):

- Los genes necesarios para la síntesis de los integrantes del sistema enzimático y los genes reguladores están agrupados en una misma región del cromosoma.

TABLA 2

Genes nif de *Klebsiella Pneumoniae* y su función

Gen	Proteína (Kd)	Función
J	120	Piruvato-flavodoxina oxidoreductasa
H	35	Sint. dinitrogenasa reductasa (pr Fe)
D	56	Sint. sub. dinitrogenasa (pr Fe-Mo)
K	60	Sint. sub. dinitrogenasa (pr Fe-Mo)
Y	21	?
E	46	Sint. factor FeMoCo (dinitrogenasa)
N	50	Sint. factor FeMoCo (dinitrogenasa)
X	18	?
U	25-32	?
S	45	?
V	42	?
M	28	Procesamiento de proteína NIFH
F	17	Transp. e <sup>-</sup> a dinitrogenasa (Ferredoxina)
L	45	Represor de proteína NIFA
A	57	Regulación transcripción
B	?	Sint. regulación factor FeMoCo
Q	?	?

En *Rhizobium* los genes nif están localizados en un plásmido de gran tamaño (plásmido sym) que hibridiza con los genes nif de *Klebsiella pneu-*

*moniae* ya que hay una homología interespecies muy marcada (Ruvkun et al., 1981). Se ha establecido la presencia de dos clases de genes (Fig. 6):

**Genes nif y fix R. mel.**

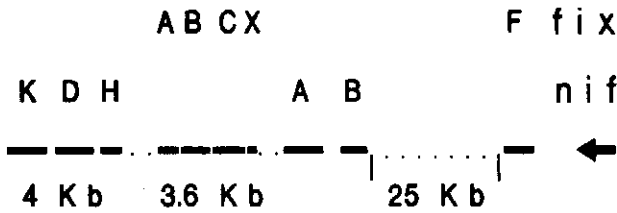


Figura 6. Mapa de los genes nif y fix de *Rhizobium meliloti* (Ausubel et al., 1985; Szeto et al., 1987; Beynon et al., 1988).

- Los genes nif, análogos estructural y funcionalmente a los genes nif de *K. pneumoniae*; en esta clase se han localizado los genes nifHDK (Ausubel et al., 1985), nifA (Beynon et al., 1988) y nifB (Buikema et al., 1987).
- Los genes fix, necesarios para la fijación del Nitrógeno, no tiene homólogos en *K. pneumoniae* y su función es desconocida.

Se han identificado los genes fixABC en *Rhizobium meliloti* (Earl et al., 1987) y en *Bradyrhizobium japonicum* (Gubler y Hennecke, 1986), fixF (Aguilar, et al., 1985) y fixX (Earl et al., 1987) en *R. meliloti*.

Los productos de los genes nifHDK son muy similares a los de *Klebsiella* y constituyen la Nitrogenasa cuya expresión está regulada por nifA que se encuentra en todas las especies de *Rhizobium*. En la proteína NIFA la región N-terminal no es esencial para su actividad y a diferencia de NIFA de *Klebsiella*, la proteína de *R. meliloti* es sensible al O<sub>2</sub> (Beynon et al., 1988).

Es de notar que el gen regulador nifL sólo se ha detectado en dos especies de *Klebsiella* y de existir en *Rhizobium* no tendría similitud estructural con los de *Klebsiella*.

Los genes fixABC no tienen homología con ninguno de los 17 genes de *K. pneumoniae* y son incapaces de complementar los mutantes nif- de esta especie. El gen fixF está cerca de la región con los genes responsables de la nodulación pero no tiene relación con la infección; su ausencia no impide la expresión de la Nasa y es activado por los productos de nifA de *K. pneumoniae* y de *R. meliloti*.

**Regulación de la fijación**

En los últimos años se ha comenzado a entender cómo opera la regulación de la transcripción de los genes nif en *Klebsiella pneumoniae* en respuesta

a ciertas concentraciones de Nitrógeno fijado y de O<sub>2</sub>.

Se sabe que la regulación opera en dos niveles:

- Una regulación específica, mediada por los genes nifA y nifL, que están dentro del grupo de genes fijadores; y
- Una regulación general, en la que intervienen genes del tipo ntr que actúan controlando muchos operones en respuesta a fuentes externas de Nitrógeno; en *K. pneumoniae* se han identificado los genes ntrA, ntrB, ntrC y glnA que se encuentran lejos del grupo de genes nif.

El modelo actual propuesto por Dixon et al (1987) (Fig. 7) reúne los genes ntrB, ntrC y glnA en una unidad (regulón) en la cual ntrC expresa una proteína bifuncional (NTRC) que actúa como activador o inhibidor de la transcripción uniéndose en el primer caso a un segmento de DNA ca. 100 kb arriba del gen promotor de nifLA; su actividad es modulada por el producto de ntrB (NTRB) que en presencia de un exceso de Nitrógeno inactiva NTRC y por ende la transcripción de nif.

**Regulación genes nif Klebsiella**

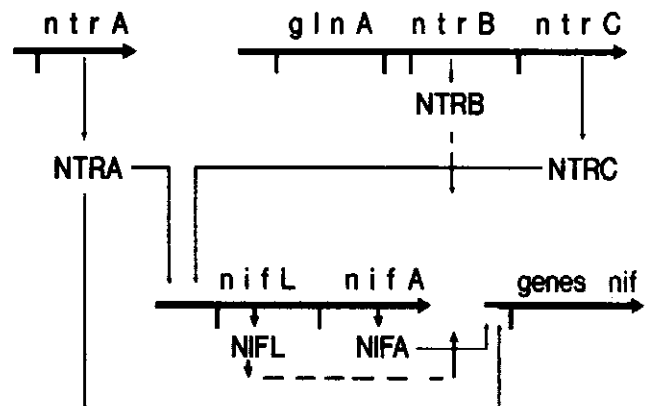


Figura 7. Modelo de regulación de la fijación de Nitrógeno. (Dixon et al., 1987) en *Klebsiella pneumoniae*.

El gen ntrA, localizado en una región alejada del regulón, produce una proteína identificada como un factor sigma 60 de la RNA polimerasa que tiene dos regiones capaces de unirse al DNA; esta proteína (NTRA) actúa sobre el promotor de nifLA y sobre los promotores de los restantes genes nif. El gen ntrA tiene un efecto pleiotrópico y actúa sobre muchos operones regulados por Nitrógeno.

El producto de nifA (NIFA) es una proteína activadora requerida para la transcripción de los genes nif. En presencia de un exceso de Nitrógeno fijado o de O<sub>2</sub>, es inactivado por NIFL observándose una represión muy rápida de la síntesis de Nasa y de las otras proteínas codificadas por los genes nif.

En conjunto el sistema regulador evidencia una capacidad de ajuste muy fina y el esclarecimiento de los sitios y mecanismos de acción de cada una de las proteínas involucradas (Dixon et al., 1987) permitirá comprender cómo opera la regulación global frente a las fuentes externas de Nitrógeno.

**Genética de la infección**

Existen en *Rhizobium* genes responsables de los diferentes pasos de la infección que culmina exitosamente en la formación de un nódulo; estos genes de nodulación (nod) han sido particularmente bien estudiados en *R. meliloti*. En el megaplásmido sym (1500 kb) de esta especie se han identificado dos grupos de genes nod:

- los genes comunes para nodulación (cng)
- los genes específicos en la infección (hsn)

Los genes comunes están presentes en todas las especies de *Rhizobium* y tienen entre sí un alto grado de homología estructural y funcional no siendo responsables del reconocimiento específico (Fischer et al., 1985). Se encuentran organizados en dos unidades transcripcionales divergentes (nodABC) y (nodD) (Figs. 8 y 9) que son estimuladas por productos presentes en exudados de la raíz; son necesarios para el encrespamiento del pelo radicular (Hac+) y para la inducción de la organogénesis del nódulo. En el proceso de infección el primer signo visible es la formación de una mancha refráctil en la curvatura interna del pelo encrespado donde se acumulan las bacterias; esto es dependiente de los genes nodABC que también controlan la inducción de la organogénesis (Debelle et al., 1986).

Los genes específicos (Figs. 8 y 9) son característicos de cada especie de *Rhizobium* y en *R. meliloti* están como dos unidades divergentes: nodFEG (o hsn ABC) y nodH (o hsnD), localizadas entre la región de los genes nod comunes y la re-

gión de genes nif (Putnoky y Kondorosi, 1986). Los genes nodFE controlan el desarrollo del hilo de infección en la planta homóloga y nodH controla positivamente el encrespamiento junto con nodABC y su especificidad resulta de que no es complementado por nodH de otras especies de *Rhizobium*; en hospederos heterólogos estos genes ejercen un control negativo previniendo la infección (Debelle et al., 1986). La transferencia de los genes específicos implica la transferencia de especificidad en la infección.

**Genes nod *R. meliloti***

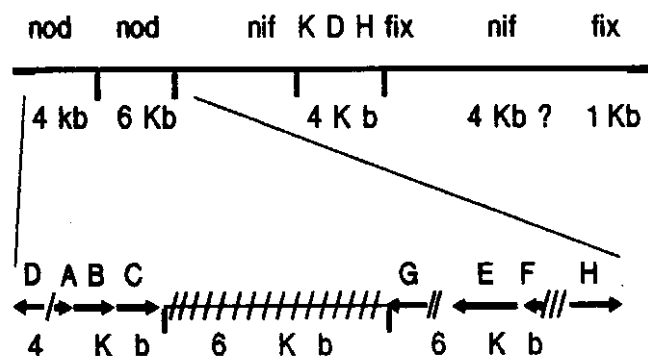


Figura 8. Mapa de los genes comunes y específicos responsables de la nodulación (nod) en *Rhizobium meliloti* (Horvath et al., 1986; Schmidt et al., 1986; Rossen et al., 1987). La longitud de las flechas indica el tamaño relativo de cada gen.

**Genes nod *Rhizobium***

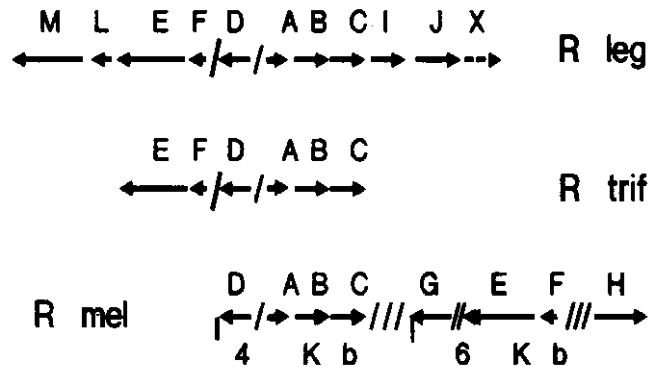


Figura 9. Mapa de los genes nod comunes y específicos en algunas especies de *Rhizobium* (Horvath et al., 1986; Shearman et al., 1986; Schmidt et al., 1986; Rossen et al., 1987). La longitud de las flechas indica el tamaño relativo de cada gen.

En otras especies de *Rhizobium* se encuentran adicionalmente otros genes nod comunes cuyos fenotipos han sido parcialmente determinados.

Las funciones y algunas propiedades de los transcritos de los genes nod se indican en la Tabla 3. La proteína de nodA se encuentra en el citoplasma, tiene un papel en el encrespamiento y es inducida por exudados de raíz como la luteolina y la trigonelina (Schmidt et al., 1986). La proteína de nodC está asociada a la membrana externa de *R. meliloti* y durante el desarrollo nodular su precursor de 46.8 Kd es procesado a un polipéptido de 34 Kd. La secuencia de los genes nodFEGH y el PM de sus transcritos han sido determinados por Horvath et al. (1986) y una comparación de las secuencias muestra una homología parcial de nodF con la proteína transportadora de grupos acilo.

El único gen regulador en infección identificado hasta ahora es nodD quien activa la transcripción de nodABC y para ello requiere la presencia de exudados de raíz; el gen es funcionalmente equivalente en diferentes especies de *Rhizobium* y parece que interactúa específicamente con el inductor del hospedero normal. Shearman et al. (1986) demostraron que en *R. leguminosarum*, la inducción de nodFE requiere la proteína de nodD y exudado de raíz; esta proteína se uniría a la región de DNA altamente conservada en nodABC.

TABLA 3  
GENES nod de *Rhizobium* y su función

Genes comunes	Proteína (Kd)	Localización prot.	Fenotipo	Función
A	21.8	Citoplasma	Ha $\bar{c}$	Encresp.— Organog.
B			Ha $\bar{c}$	Encresp.— Organog.
C	34.0	Membrana	Ha $\bar{c}$	Encresp.— Organog.
D			Ha $\bar{c}$	Regulación
I		Membrana		Retraso nodulación
J				Retraso nodulación
L			?	
M			?	
X			Nod $^+$	Nod. arveja Afghan.
<b>Genes específicos</b>				
F	9.7	Citopl. (PTA)	Hac, $^+$ Inf $\bar{}$	Desarr. hilo inf.
E	41.7		Hac, $^+$ Inf $\bar{}$	Desarr. hilo inf.
G	26.7	Deshidrog.	Hac, $^+$ Inf $\bar{}$	Retraso nodulación
H	28.6		Hac, $^-$ Inf $\bar{}$	Especificidad y desarrollo hilo

#### Acción de exudados de raíz

Los trabajos de Bhuvanewari y Solheim (1985) mostraron que en los exudados hay factores que inducen deformaciones del pelo radicular similares a las producidas en las etapas iniciales de la infección; algunos de estos factores son termoestables, con bajo PM y la deformación ocurre rápidamente (ca. 90 min.). Los componentes activos son del tipo de las flavonas o flavanonas como la luteolina y la 7,4 dihidroxiflavona (Peters et al., 1986; Redmond et al., 1986). Estudios con análogos estructurales de la luteolina mostraron que la actividad depende de la presencia de hidroxilos o glicósidos en las posiciones 7 (anillo A) y 4' (anillo B); los más potentes actúan a concentraciones  $10^{-7}$  —  $10^{-8}$  M siendo algunos poco específicos (luteolina) y otros bastante específicos (hesperitina para *Rhizobium leguminosarum*).

En *Rhizobium* temperados la inducción de los genes nod puede ser bloqueada por acción de isoflavonas o flavanoles a concentraciones similares a las existentes durante la germinación (5–10  $\mu$ M) (Firmin et al., 1986). Debido a la similitud estructural entre inductores y anti-inductores se cree que actúan competitivamente frente a la proteína de nodD.

El conjunto de resultados recientes ha sido integrado en un modelo (Downie y Johnston, 1986) que describe los factores que intervienen en los pasos iniciales de nodulación. Sin embargo persisten muchas preguntas sobre el papel que desempeñan

en la infección diversos compuestos y algunas de ellas se discuten en la próxima sección.

#### INCOGNITAS

##### Papel de exopolisacáridos y glucanos

La función de los exopolisacáridos (EPS) secretados por el *Rhizobium* ha sido frecuentemente reevaluada ya que se han aislado mutantes cuyos fenotipos son muy diferentes; algunos de los deficientes en EPS son Nod $^-$ , otros son Nod $^+$  Fix $^-$  y otros Nod $^+$  Fix $^+$ . Los genes responsables de la síntesis de EPS estarían en un plásmido diferente al plásmido portador de los genes nod/nif y se detectó un gen en el plásmido sym de *R. phaseoli*, que inhibe la producción de EPS en bacteroides (Borthakur et al., 1985). Su gran diversidad estructural (Jansson, 1979; Jansson et al., 1979; Somme 1985; Robertsen et al., 1981), es intrigante si se tiene en cuenta su ocurrencia en especies que actualmente se consideran como biovariedades debido a su alto grado de homología genética. Actualmente se cree que los EPS juegan un papel durante la invasión y no durante el desarrollo del nódulo.

La importancia de los glucanos  $\beta$ 1, 2 ha sido relevada recientemente por Geremia et al. (1987) quienes encontraron un mutante incapaz de sintetizar este polisacárido (y que curiosamente tiene el doble de EPS habitualmente presente), que forma seudonódulos inefectivos y cuyas propiedades son similares a las de mutantes avirulentos chvB de *Agrobacterium tumefaciens*. Simultáneamente se



ha encontrado una alta capacidad de complementación de los genes *chvB* de *A. tumefaciens*, causantes de la virulencia, con los genes *nvd* de *Rhizobium*.

### Papel de las lectinas

Una característica de la simbiosis es la especificidad que se manifiesta en la interacción entre el *Rhizobium* y su planta hospedera. Dado que en la rizosfera existe un gran número de bacterias diferentes del *Rhizobium* y que sólo ciertas cepas son capaces de infectar una leguminosa dada, debe existir un mecanismo muy preciso que permita determinar la selectividad.

La frecuente ocurrencia de lectinas en las leguminosas, sus propiedades funcionales (Goldstein y Hayes, 1978; Lis y Sharon, 1981; Liener et al., 1986) y la evidencia previa obtenida por Hamblin y Kent (1973) y Bohlool y Schmidt (1974) condujeron a Albersheim y Anderson-Prouty (1975) a proponer que el reconocimiento se realiza a través de la interacción lectina del hospedero con los polisacáridos presentes en la superficie bacteriana.

En el sistema trébol -*Rhizobium trifolii* Dazzo y Hubbell (1975) demostraron que las raíces de trébol y las bacterias infectivas poseen antígenos superficiales comunes y que la lectina extraída de las semillas de trébol se une específicamente al *R. trifolii*. Con base en estos resultados estos investigadores propusieron que la lectina actúa como un puente entre el pelo radicular y la bacteria. Posteriormente Dazzo y Brill (1977) aislaron de las raíces de trébol una lectina (Trifolina A) que se une tanto a las bacterias como a las raíces; la proteína, presente preferencialmente en los pelos radiculares, fue caracterizada encontrándose que la 2-deoxiglucosa inhibe la unión. Dada la presencia de Trifolina A en los exudados de raíz (Dazzo y Hrabak, 1981) el modelo ha sido reelaborado adecuándolo al propuesto por Solheim. Este investigador considera que una vez que la lectina es excretada por la raíz, reconoce la bacteria y este complejo se une a un receptor de la superficie radicular.

El sistema modelo soya -*Rhizobium japonicum* permitió a Bohlool y Schmidt (1974) demostrar que la lectina de soya se une específicamente con 22 (de un total de 25) cepas de *R. japonicum* sin que haya interacciones con *Rhizobium* no nodulantes de soya. El grupo de Bauer confirmó estos resultados y observó que los sitios receptores en la bacteria son transitorios dependiendo su presencia de la fase en que se encuentre el cultivo del microorganismo. Esto se explicó más tarde al encontrar que la composición del polisacárido capsular cambia con la fase de crecimiento. Estos receptores se pueden inducir cultivando las bacterias en presencia de exudados de soya o asociadas a las raíces. La revisión más reciente de los resultados obtenidos en este sistema ha sido publicada por Bhuvaneshwari

(1981) y en ella se apoya el modelo dinámico propuesto por Bauer (1981) según el cual la interacción bacteria-hospedero desencadena una serie de respuestas recíprocas iniciadoras de la infección.

A pesar de la evidencia acumulada en favor de la hipótesis que postula a las lectinas como responsables del reconocimiento, ésta es objeto de controversia ya que es necesario considerar los siguientes hechos:

- Cepas de *Rhizobium* provenientes de todos los grupos de inoculación se unen con lectinas de plantas que no son infectadas por la cepa en cuestión (rizobio heterólogo) (Law y Strijdom, 1977) y en muchos casos los rizobios que nodulan su hospedero normal (rizobio homólogo) no se unen con la lectina aislada de las semillas de ese hospedero (Chen y Phillips, 1976).
- Se ha demostrado (Su et al, 1980) la ausencia de lectina en semillas de 6 variedades de soya que son noduladas por *R. japonicum*. Estas variedades son portadoras del gen recesivo "le le" y en ellas no se ha logrado detectar lectina en las raíces.
- En el sistema *R. meliloti*-lectina de alfalfa Handelsman et al. (1984) encontraron que cepas nodulantes y no nodulantes se unen a la lectina. Paradójicamente entre las cepas nodulantes son más competitivas aquellas que presentan el menor grado de interacción (aglutinabilidad) con la lectina.

La controversia existente en este campo impulsó al Grupo de Bioquímica (Depto. Química, U. Nacional) que estudia la bioquímica de la infección a realizar estudios para precisar la especificidad de la interacción lectina-*Rhizobium*; en síntesis los resultados obtenidos (Luque, 1981; de Navarro, 1982; Orjuela, 1984; Pérez, 1985) permiten:

- Corroborar la influencia de las condiciones de crecimiento y de incubación, validando por microscopía de fluorescencia las conclusiones obtenidas en los ensayos de bactoaglutinación directa.
- Establecer la no-dependencia entre bactoaglutinación y unión lectina-*Rhizobium* tanto en sistemas homólogos como heterólogos.
- Introducir un nuevo criterio para definir la "ausencia de interacción lectina-*Rhizobium*" como la ausencia simultánea de bactoaglutinación y de unión detectable por microscopía de fluorescencia.

El conjunto de resultados referentes a la interacción evidencian que la unión de la lectina al *Rhizobium* se realiza en forma inespecífica y no apo-

yan la intervención de la lectina como un agente selectivo en el reconocimiento de la bacteria por parte de la planta. Dado el desconocimiento actual sobre la forma como los componentes de la rizosfera afectan la composición de la superficie bacteriana y sobre las condiciones locales que prevalecen durante la interacción en condiciones naturales, es necesario ahondar en la investigación de estos factores.

Están por ser resueltas varias preguntas:

- ¿En qué medida es válida la hipótesis que postula la lectina de la planta como la responsable del reconocimiento de la cepa homóloga (simbionte natural) de *Rhizobium*?
- ¿Son aplicables a lectinas de raíz los resultados obtenidos con lectinas de semilla? Esta pregunta es crucial para la evaluación de los modelos propuestos y tiene plena vigencia pues la evidencia disponible además de escasa es contradictoria. Desafortunadamente generalmente se asume a priori que las dos lectinas son idénticas y se extrapolan al proceso de infección los resultados obtenidos con lectinas de semilla. Los datos obtenidos por nuestro grupo (Luque, 1981; de Navarro, 1982; Maldonado, 1982) indican diferencias estructurales y funcionales importantes entre los dos tipos de lectinas.
- De acuerdo con la hipótesis de Dazzo y Hubbell (1975) es dable pensar que las lectinas de raíz deben ser componentes superficiales situados en las células epidérmicas. ¿Cómo se transportan (y/o procesan) estas proteínas al exterior? ¿Cuál es el tipo de unión entre estas proteínas y los constituyentes de la pared celular o del mucigel? ¿Cómo se afecta la infección cuando se tratan las raíces con procedimientos encaminados a remover las lectinas de la superficie?

#### Pectinasas en infección

Una de las hipótesis que explica la penetración del pelo radicular por el *Rhizobium* postula la participación de enzimas pectolíticas y celulolíticas. Esta hipótesis se apoya en la presencia de enzimas hidrolíticas producidas por las raíces (Fahraeus y Salman, 1976; Verma y Zogbi, 1978) o por algunas especies de *Rhizobium* (Martínez-Molina et al, 1979; Martínez-Molina y Olivares, 1982; Plazinski y Rolfe, 1985); la evidencia ultraestructural aportada por Callaham y Torrey (1981) muestra la degradación de la pared celular durante la infección.

Sin embargo diversos autores (Lillich y Elkan, 1968; McMillan y Cooke, 1969; Vance, 1983) refutan la hipótesis propuesta. Recientemente nuestro grupo ha iniciado un estudio (Martínez, 1987) para detectar bajos niveles de pectinasas y determinar si en filtrados de cultivos de *R. meliloti* existe activi-

dad pectolítica. Además de establecer los métodos de detección, se ha puesto en evidencia la facilidad de inactivación de la enzima, lo cual podría explicar los resultados contradictorios obtenidos por los diversos autores.

#### PROBABLES DESARROLLOS FUTUROS

En el campo de la fijación el establecer la estructura molecular del grupo de átomos de Fe y S que participan en los sitios activos de la Dinitrogenasa reductasa y de la Dinitrogenasa, así como la forma en que el Fe y el Mo interactúan para reducir el Nitrógeno, reviste mucha importancia pues podría dar lugar al diseño de catalizadores con gran capacidad reductora. Es por ello que actualmente se trabaja en la síntesis de compuestos bioinorgánicos que simulen funcionalmente estas agrupaciones.

También en este campo el conocimiento de la estructura, función y regulación de los genes que codifican la Hidrogenasa hup, posibilitaría su inserción en cepas de *Rhizobium* que carecen de ellos. Esto implicaría la disponibilidad de cepas energéticamente más eficientes y por ende de mayores rendimientos en las cosechas de leguminosas de grano y forrajeras.

Actualmente sólo se conocen muy parcialmente las reacciones metabólicas que gobiernan la asimilación de Nitrógeno fijado, la interdependencia de la fijación con la fotosíntesis y muchos aspectos fisiológicos de las plantas en que ocurre la fijación. Este es un amplio campo en el cual se está experimentando activamente.

Es en el campo de la genética molecular donde probablemente se den los avances más notables. El funcionamiento de los genes en microorganismos como *Agrobacterium tumefaciens*, que presenta ventajas para el manejo experimental y posee muchos genes análogos a los de *Rhizobium*, es objeto de intensos estudios; en particular el análisis de los genes vir (causantes de la virulencia) ha evidenciado su inducción por isoflavonas o flavonoles a través del bloqueo de nodD. Estos genes también están involucrados en la síntesis de los glucanos  $\beta$ 1, 2, que intervienen en la formación de tumores vegetales, existiendo intrigantes similitudes con la organogénesis del nódulo en *Rhizobium*.

La regulación de la aparición y número de sitios de infección, hasta hoy inexplicada, probablemente tiene que ver con la competencia entre "inductores" (flavonoides) y "anti-inductores" (isoflavonas) respecto a la proteína producida por nodD. Conocer los mecanismos de unión de estos compuestos a la proteína y las modificaciones conformacionales resultantes ayudará a entender esta regulación.

La secuenciación en varias especies de *Rhizobium* de los genes nod responsables de la especifici-

dad, podría conducir, en un mediano plazo, al diseño de un gen sintético que permitiera eliminar la barrera de la especificidad que actualmente es una limitante tecnológica importante.

Por último es fundamental, y ya se están dando los primeros pasos, conocer cuáles genes de la

planta y de qué manera intervienen en el establecimiento de una simbiosis eficiente. Debido a la complejidad del sistema, no obstante el desarrollo de la biología molecular, éste será un avance a un plazo más largo que será de capital importancia para la tecnología agrícola del futuro.

## BIBLIOGRAFIA

- AGUILAR, O.M., KAPP, D. & PUHLER, A. 1985. Characterization of a *Rhizobium meliloti* fixation gene (fixF) located near the common nodulation region. *J. Bacteriol.*, 164: 245-254.
- ALBERSHEIM, P. & ANDERSON-PROUTY, A.J. 1975. Carbohydrates, proteins, cell surfaces and the biochemistry of pathogens. *Ann. Rev. Plant. Physiol.*, 26: 31-52.
- AUGER, S. & VERMA, D.S.P. 1981. Induction and expression of nodule-specific host genes in effective and ineffective root nodules of soybean. *Biochemistry*, 20: 1300-1306.
- AUSUBEL, F.M., CANNON, F.C. 1981. Molecular genetic analysis of *Klebsiella pneumoniae* nitrogen-fixation (nif) genes. *Cold Spring Harbor Symp. Quantit. Biol.*, 45: 487-492.
- AUSUBEL, F.M., BUIKEMA, W.J., EARL, C.D., KLINGENSMITH, J.A., NIXON, B.T. & SZETO, W.W. 1985. Organization and regulation of *Rhizobium meliloti* and *Parasponia bradyrhizobium* nitrogen fixation genes in "Nitrogen fixation research progress", Evans H.J., Bottomley P.J., Newton W.E., (eds), Martinus Nijhoff, Dordrecht, págs. 165-179.
- BAUER, W.D. 1981. Infection of legumes by Rhizobia. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 32: 407-449.
- BEYNON, J.L., WILLIAMS, M.K. & CANNON, F.C. 1988. Expression and functional analysis of the *Rhizobium meliloti* nifA gene *EMBO J.*, 7: 7-14.
- BHUVANESWARI, T.V. 1981. Recognition mechanisms and infection process in legumes. *Economic Botany*, 35: 204-223.
- BHUVANESWARI, T.V. & SOLHEIM, B. 1985. Root hair deformation in the white clover *Rhizobium trifolii* symbiosis. *Physiol. Plant.* 63: 25-34.
- BOHLOOL, B.B. & SCHMIDT, E.L. 1974. Lectins: A possible basis for specificity in the *Rhizobium-legume* root nodule symbiosis. *Science*, 185: 269-271.
- BORTHAKUR, D., DOWNIE, J.A., JOHNSTON, A.W.B. & LAMB, J.W. 1985. psi, a plasmid-linked *Rhizobium phaseoli* gene that inhibits exopolysaccharide production and which is required for symbiotic nitrogen fixation. *Mol. Gen. Genet.*, 200: 278-282.
- BOTHE, H. 1985. The role of oxygen in biological nitrogen fixation *Period. Biol.*, 87: 111-120.
- CAETANO-ANOLLES, G. & FAVELUKES, G. 1986. Host-symbiont specificity expressed during early adsorption of *Rhizobium meliloti* to the root surface of alfalfa *Appl. Environ. Microbiol.*, 52: 377-382.
- CALLAHAM, D.A. & TORREY, J.G. 1981. The structural basis for infection of root hairs of *Trifolium repens* by *Rhizobium*. *Can. J. Bot.*, 59: 1647-1664.
- CHEN, A.P.T. & PHILLIPS, D.A. 1976. Attachment of *Rhizobium* to legume roots as the basis for specific interactions. *Physiol. Plant.*, 38: 83-88.
- DAZZO, F.B. & HUBBELL, D.H. 1975. Cross reactive antigens and lectin as determinants of symbiotic specificity in the *Rhizobium-clover* association. *Appl. Microbiol.*, 33: 1017-1033.
- DAZZO, F.B. & BRILL, W.J. 1977. Receptor site on clover and alfalfa roots for *Rhizobium* *Appl. Microbiol.*, 33: 132-136.
- DAZZO, F.B. & HRABAK, E.M. 1981. Presence of trifolin A, a *Rhizobium*-binding lectin in clover root exudate. *J. Supramol. Struct. Cell Biochem.*, 16: 133-138.
- DEBELLE, F., ROSENBERG, C., VASSE, J., MAILLET, F., MARTINEZ, E., DENARIE, J. & TRUCHET, G. 1986. Assignment of symbiotic developmental phenotypes to common and specific nodulation (nod) genetic loci of *Rhizobium meliloti*. *J. Bacteriol.*, 168: 1075-1086.
- DIXON, R.A., AUSTIN, S., BUCK, M., DRUMMOND, M., HILL, S., HOTEL, A., MACFARLANE, S., MERRICK, M. & MINCHIN, S. 1987. Genetics and regulation of nif and related genes in *Klebsiella pneumoniae*. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 317: 147-158.
- DOWNIE, J.A. & JOHNSTON, A.W.B. 1986. Nodulation of legumes by r.: The recognized root? *Cell*, 47: 153-154.
- EARL, C.D., RONSON, C.W. & AUSUBEL, F.M. 1987. Genetic and structural analysis of the *Rhizobium meliloti* fixA, fixB, fixC and fixX genes. *J. Bacteriol.*, 169: 1127-1136.
- FAHRAEUS, G. & SAHLMAN, K. 1976. The infection of root hairs of leguminous plants by nodule bacteria. *Ann. Acad. Regiae Sci. Upps.* 20: 103-129.
- FIRMIN, J.L., WILSON, K.E., ROSSEN, L. & JOHNSTON, A.W.B. 1986. Flavonoid activation of nodulation genes in *Rhizobium* reversed by other compounds present in plants. *Nature*, 324: 90-92.
- FISHER, R.F., TU, J.K. & LONG, S.R. 1985. Conserved nodulation genes in *Rhizobium meliloti* and *Rhizobium trifolii* *Appl. Environ. Microbiol.*, 49: 1432-1435.
- GEREMIA, R.A., CAVAIGNAC, S., ZORREGUIETA, A., TORO, N., OLIVARES, O. & UGALDE, R. 1987. A *Rhizobium meliloti* mutant that forms ineffective pseudonodules in alfalfa produces exopolysaccharide but fails to form  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 2) glucan. *J. Bacteriol.*, 169: 880-884.
- GLUBER, M. & HENNECKE, H. 1986. fixA, B and C genes are essential for symbiotic and free-living microaerobic nitrogen fixation. *FEBS Lett.*, 200: 186-192.
- GOLDSTEIN, I.J. & HAYES, C.E. 1978. The lectins: Carbohydrate-binding proteins of plants and animals *Adv. Carbohydr. Chem. Biochem.*, 35: 127-340.
- GOVERS, F., GLOUDEMANS, T., MOERMAN, M., van KAMMEN, A. & BISSELING, T. 1985. Expression of plant genes during the development of pea root nodules. *EMBO J.*, 4: 861-867.
- GREAVES, M.P. & DARBYSHIRE, J.F. 1972. The ultrastructure of the mucilaginous layer on plant roots *Soil Biol. Biochem.*, 4: 443-449.

- HAMBLIN, J. & KENT, S.P. 1973. Possible role of phytohemagglutinin in *Phaseolus vulgaris* L. *Nature*, 245: 28-30.
- HANDELSMAN, J., UGALDE, R.A. & BRILL, W.J. 1984. *Rhizobium meliloti* competitiveness and the alfalfa agglutinin J. B. *Bacteriol.*, 157: 703-707.
- HORVATH, B., KONDOROSI, E., JOHN, M., SCHMIDT, J. TOROK, I., GYORGYPAL, Z., BARABAS, I., WIENEKE, U., SCHELL, J. & KONDOROSI, A. 1986. Organization, structure and symbiotic function of *Rhizobium meliloti* nodulation genes determining host specificity for alfalfa *Cell*, 46: 335-343.
- HUBBELL, D.H. 1981. Legume infection by *Rhizobium*: a conceptual approach *Bioscience*, 31: 832-837.
- JANSSON, P.E., KENNE, L., LINDBERG, B., LJUNGGREN, H., LONNGREN, H., RUDEN, U. & SVENSSON, S. 1977. Demonstration of an octasaccharide repeating unit in the extracellular polysaccharide of *Rhizobium meliloti* by sequential degradation. *J. Am. Chem. Soc.*, 99: 3812-3815.
- JANSSON, P.B., LINDBERG, B. & LJUNGGREN, H. 1979. Structural studies of the *Rhizobium trifolii* extracellular polysaccharides. *Carbohydr. Res.* 75: 207-220.
- LÁW, I.J. & STRIJDOM, B.W. 1977. Some observations on plant lectins and *Rhizobium* specificity *Soil Biol. Biochem.*, 9: 79-84.
- LIENER, I.E., SHARON, N. & GOLDSTEIN, I.J. (eds). 1986. The lectins. Academic Press, Orlando.
- LILLICH, T.T. & ELKAN, G.H. 1968. Evidence countering the role of polygalacturonase in invasion of root hairs of leguminous plants by *Rhizobium spp.* *Can. J. Microbiol.*, 14: 617-625.
- LIS, H. & SHARON, N. 1981. Lectins in higher plants in "The Biochemistry of plants", Vol. 6, Marcus A., (ed), Academic Press, New York, págs. 371-447.
- LUQUE, E. 1981. Estudio de la eventual interacción *Rhizobium*-lectina de *Pisum sativa*. Tesis, Magister en Ciencias, Universidad Nacional, Bogotá.
- MALDONADO, C.E. 1982. Estudio comparativo de lectinas presentes en semillas y raíces de algunas leguminosas. Tesis, Químico, Universidad Nacional, Bogotá.
- MARTINEZ-MOLINA, E., MORALES, V.M. & HUBBELL, D.H. 1979. Hydrolytic enzyme production by *Rhizobium* *Appl. Environ. Microbiol.*, 38: 1186-1188.
- MARTINEZ-MOLINA, E. & OLIVARES, J. 1982. A note on evidence for involvement of pectolytic enzymes in the infection process of *Medicago sativa* by *Rhizobium meliloti* *J. Appl. Bacteriol.*, 52: 453-455.
- MARTINEZ, P. 1988. Detección de actividad pectolítica en el filtrado de cultivo de algunas cepas de *Rhizobium meliloti*. Tesis, Magister en Ciencias, Universidad Nacional, Bogotá.
- McMILLAN, J.D. & COOKE, R.C. 1969. Evidence against involvement of pectic enzymes in the invasion of root hairs by *Rhizobium trifolii* *Can. J. Microbiol.* 15: 643-645.
- NAVARRO, DE Y. 1982. Estudio de la eventual interacción *Rhizobium*-lectina de *Vicia faba*. Tesis, Magister en Ciencias, Universidad Nacional, Bogotá.
- NEWCOMB, W. 1981. Nodule morphogenesis and differentiation en "Biology of the Rhizobiaceae", Giles K.L., Atherly A.G. (eds), Academic Press, New York, págs. 247-298.
- ORJUELA, S. 1984. Influencia del medio de cultivo en la interacción lectina-*Rhizobium*. Tesis, Químico, Universidad Nacional, Bogotá.
- PEREZ, G. 1985. Interacciones lectina *Rhizobium* y su relación con el proceso de infección. Trabajo de promoción. Universidad Nacional, Bogotá.
- PETERS, N.K., FROST, J.W. & LONG, S.R. 1986. A plant flavone, luteolin, induces expression of *Rhizobium meliloti* nodulation genes. *Science*, 233: 977-980.
- PLAZINSKI, J. & ROLFE, B.G. 1985. Analysis of the pectolytic activity of *Rhizobium* and *Azospirillum* strains isolated from *Trifolium repens* *J. Plant Physiol.*, 120: 181-187.
- PUTNOKY, P. & KONDOROSI, A. 1986. Two gene clusters of *Rhizobium meliloti* code for early essential nodulation functions and a third influences nodulation efficiency *J. Bacteriol.*, 167: 881-887.
- REDMOND, J.W., BATLEY, M., DJORDJEVIC, M.A., INNES, R.W., KUEMPEL, P.L. & ROLFE, B.G. 1986. Flavones induce expression of nodulation genes in *Rhizobium* *Nature*, 323: 632-635.
- ROBERTSEN, B.K., AMAN, P., DARVILL, A.G., McNEIL, M. & ALBERSHEIM, P. 1981. Host symbiont interactions. V. The structure of acidic extracellular polysaccharides secreted by *Rhizobium leguminosarum* and *Rhizobium trifolii*. *Plant. Physiol.*, 67: 389-400.
- RUVKUN, G.B., LONG, S.R., MEADE, M.D. & AUSUBEL, F.M. 1981. Molecular genetics of symbiotic nitrogen fixation. Cold Harbor Spring Symp. Quant. Biol., 45: 492-499.
- SCHMIDT, J., JOHN, M., WIENEKE, U., KRUSSMANN, H-D. & SCHELL, J. 1986. Expression of the nodulation gene *nodA* in *Rhizobium meliloti* and localization of the gene product in the cytosol *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 83: 9581-9585.
- SHEARMAN, C.A., ROSSEN, L., JOHNSTON, A.W.B. & DOWNIE, J.A. 1986. The *Rhizobium leguminosarum* nodulation gene *nodF* encodes a peptide similar to acyl-carrier protein and is regulated by *nodD* plus a factor in pea root exudate. *EMBO J.* 5: 647-652.
- SOMME, R. 1985. The structure of the acidic, exocellular polysaccharide produced by *Rhizobium trifolii*, *Bart A Carbohydr. Res.* 137: 167-171.
- SPRENT, J.I. 1984. Nitrogen fixation en "Advanced plant physiology", Wilkins M.B.; (ed), págs. 249-276, Pitman, London.
- SU L.C., PUEPKKE, S.G. & FRIEDMAN, H.P. 1980. Lectin and the soybean-*Rhizobium* symbiosis. Immunological investigations, of soybean lines, the seeds of which have been reported to lack the 120,000 dalton soybean lectin. *Biochim. Biophys. Acta*, 629: 292-304.
- SZETO, W.W., NIXON, B.T., RONSON, C.W. & AUSUBEL, F.M. 1987. Identification and characterization of the *Rhizobium meliloti* *ntrC* gene: *Rhizobium meliloti* has separate regulatory pathways for activation of nitrogen fixation genes in free-living and symbiotic cells. *J. Bacteriol.*, 169: 1423-1432.
- VANCE, C.P. 1983. *Rhizobium* infection and nodulation: A beneficial plant disease? *Ann. Rev. Microbiol.*, 37: 399-424.
- VERMA, D.P.S. & ZOGBI, V. 1978. A cooperative action of plant and *Rhizobium* to dissolve the host cell wall during development of root nodule symbiosis. *Plant Sic. Lett.*, 13: 137-142.

# ANALOGOS EN $\mathbb{F}_q[X]$ DE CONJETURAS FAMOSAS DE LA TEORIA DE LOS NUMEROS\*

por

Víctor S. Albis González\*\*

## Resumen

Albis, V.: Análogos en  $\mathbb{F}_q[X]$  de conjeturas famosas de la teoría de los Números. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 489-504, 1990. ISSN 0370-3908.

Se discuten las conjeturas de Goldbach, Fermat y Catalan, Riemann (hipótesis), Weil, Artin (sobre raíces primitivas) y Borevich y Shafarevich (sobre la serie de Poincaré de un polinomio de coeficientes e-ádicos). Para las mismas se formulan análogos más fácilmente demostrables mediante la substitución del anillo  $\mathbb{Z}$  de los números enteros por el anillo  $\mathbb{F}_q[X]$  de los polinomios en la indeterminada  $X$  y coeficientes en un cuerpo finito  $\mathbb{F}_q$  de  $q$  elementos. Se proporcionan datos históricos y se señalan algunas posibilidades de investigación adicional.

## Introducción

Uno de los campos de la matemática que ha atraído nuestra atención en los últimos años es la *teoría aritmética de polinomios*. Esta teoría es el análogo de la teoría de los números, cuando sustituimos el anillo  $\mathbb{Z}$  de los números enteros por el anillo  $\mathbb{F}_q[X]$  de los polinomios en la indeterminada  $X$  y coeficientes en un cuerpo finito  $\mathbb{F}_q$  de  $q$  elementos. La analogía se basa en el hecho de que tanto  $\mathbb{Z}$  como  $\mathbb{F}_q[X]$  son *dominios euclídeos* y, por tanto, no sólo *dominios principales* sino

también *dominios factoriales* (o, si se prefiere, *dominios con factorización única en irreducibles*), cuyas propiedades arit-méticas básicas (en especial las de divisibilidad) comparten con  $\mathbb{Z}$ . Es, pues, natural pretender estudiar la aritmética de  $\mathbb{F}_q[X]$  examinando allí los análogos (cuando tienen sentido) de los resultados o conjeturas formulados en  $\mathbb{Z}$ . En general, los análogos en  $\mathbb{F}_q[X]$  pueden demostrarse con mayor facilidad; y, cuando de conjeturas se trata, muchas han encontrado comprobación en  $\mathbb{F}_q[X]$  sin que lo propio, hasta el momento, haya sucedido en  $\mathbb{Z}$ .

Nuestro propósito en este trabajo divulgativo es precisamente formular los análogos en  $\mathbb{F}_q[X]$  de las siguientes conjeturas famosas:

\* Estudio científico leído en el recinto de la Academia el 19 de julio de 1989 con ocasión de su posesión como académico correspondiente.

\*\* Departamento de Matemáticas y Estadística, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

- a) *Conjetura de Goldbach,*
- b) *Conjetura de Fermat,*
- c) *Conjetura de Catalan,*
- d) *Conjetura de Riemann,*
- e) *Conjetura de Artin sobre las raíces primitivas,*
- f) *Conjetura de Borevich-Shafarevich sobre la serie de Poincaré de un polinomio de coeficientes p-ádicos,*

acompañados de algo de historia y discusión, señalando de paso algunas posibilidades de investigación adicional.

En la primera sección establecemos las notaciones y algunos resultados necesarios para la comprensión de las secciones subsiguientes. Las correspondientes demostraciones se pueden hallar sistematizadas en nuestro trabajo [3].

### Algunos resultados preliminares

En las secciones subsiguientes su-pondremos que el lector está familiarizado no sólo con las propiedades generales de los anillos de polinomios  $A[X]$ , donde  $A$  es un anillo conmutativo unitario (en particular, un cuerpo conmutativo), sino también con la teoría de los números p-ádicos y las extensiones de cuerpos conmutativos. Aquí tan sólo recordaremos explícitamente algunos resultados especiales en el anillo  $\mathbb{F}_q[X]$  que usaremos principalmente en la segunda sección.

$$\text{Sea } h(X) = \varepsilon p_1(X)^{e_1} \dots p_r(X)^{e_r},$$

donde  $\varepsilon \in \mathbb{F}_q^* = \mathbb{F}_q \setminus \{0\}$ , los  $p_i(X)$  ( $1 \leq i \leq r$ ) son polinomios irreducibles de  $\mathbb{F}_q[X]$  y  $e_i \geq 1$ , la descomposición canónica de  $h(X)$  en factores irreducibles. Si  $(h(X))$  es el

ideal generado por  $h(X)$  en  $\mathbb{F}_q[X]$ , sabemos que subsiste el siguiente análogo del *teorema chino de los restos* :

$$(1.1) \quad \mathbb{F}_q[X]/(h(X)) \approx \prod_{i=1}^r \mathbb{F}_q[X]/(p_i(X)^{e_i}),$$

y que, además,

$$(1.2) \quad [\mathbb{F}_q[X]/(h(X))]^* \approx \prod_{i=1}^r [\mathbb{F}_q[X]/(p_i(X)^{e_i})]^*.$$

Por tanto, como en el caso de  $\mathbb{Z}$ , podemos restringirnos a estudiar sólo los anillos residuales de la forma

$$\mathbb{F}_q[X]/(p(X)^e), \quad e \geq 1,$$

donde  $p(X)$  es un polinomio irreducible de  $\mathbb{F}_q[X]$ .

Si el coeficiente superior o director de un polinomio es igual a 1, diremos que el polinomio es *unitario* (ó *mónico*); al conjunto de todos los polinomios unitarios de  $\mathbb{F}_q[X]$ , lo designaremos con  $\mathcal{M}(q;X)$ , y al conjunto de todos los polinomios irreducibles unitarios con  $\mathcal{P}(q;X)$ . Con estas notaciones, el teorema fundamental de la descomposición en factores irreducibles puede expresarse diciendo que  $\mathcal{M}(q;X)$  es el monoide abeliano libre generado por  $\mathcal{P}(q;X)$ .

Si  $\partial h(X) = \partial h$  designa al grado del polinomio  $h(X) \in \mathbb{F}_q[X]$ , el número  $|h(X)| = |h| = q^{\partial h(X)}$  se llama su *norma*. Podemos, pues, enunciar las siguientes proposiciones:

**Proposición 1.1.** *Si  $h(x)$ ,  $p(X) \in \mathbb{F}_q[X]$  y  $p(X)$  es irreducible, entonces:*

$$(a) \quad \text{card}(\mathbb{F}_q[X]/(h(X))) = |h(X)|;$$

$$(b) \quad \text{card}([\mathbb{F}_q[X]/(p(X)^e)]^*) = ([p] - 1) |p|^{e-1} \quad (e \geq 1);$$

(c)

$$\text{card}([\mathbb{F}_q[X]/(h(X))]^*) = |h| \prod_{\substack{p \in \mathbb{P}(q; X) \\ p|h}} \left(1 - \frac{1}{|p|}\right),$$

donde card E designa al cardinal del conjunto E.

La función  $\varphi(h) = \varphi(h(X))$  se llama, por analogía con el caso del anillo  $\mathbb{Z}$ , la función indicatriz de Euler.

El siguiente resultado se debe a Gauss:

Proposición 1.2. El número de polinomios irreducibles unitarios de grado r en  $\mathbb{F}_q[X]$  está dado por

$$\frac{1}{r} \sum_{d|r} \mu(d) q^{r/d},$$

donde  $\mu$  es la función de Möbius del anillo  $\mathbb{Z}$ .

### La conjetura de Goldbach

El problema que encierra la llamada conjetura de Goldbach en la teoría de los números, apareció en 1742 en la correspondencia que aquél sostuvo con Euler. Esta hipótesis es originalmente la siguiente:

*Todo número entero, mayor que 3, puede expresarse en forma de una suma de no más de tres números primos.*

Todo parece indicar que Goldbach llegó experimentalmente a su conjetura utilizando una larga tabla, cuyos primeros términos presentamos a continuación.

4 = 2 + 2	9 = 2 + 7 = 3 + 2 + 5
5 = 2 + 3	10 = 5 + 5 = 3 + 7
6 = 3 + 3	11 = 2 + 2 + 7 = 3 + 3 + 5
7 = 2 + 5 = 2 + 2 + 3	12 = 5 + 7
8 = 3 + 5	13 = 3 + 3 + 7
	14 = 7 + 7, etc.

Huelga decir que Euler no pudo validarla o invalidarla, y todos los intentos en este sentido hechos antes del siglo XX resultaron fallidos. Observemos en la anterior tabla que los impares, a partir de 7, parecen admitir a lo menos una expresión de tres primos, y los pares sólo de dos. Esto condujo a I. M. Vinográdov, en 1937 [37], a demostrar que *todo número impar, mayor que cierto  $N_0$  (la llamada constante de Vinográdov), se expresa en forma de una suma de no más de tres números primos.* También demostró que el número  $\mathbb{P}(n;3)$  de expresiones del número impar  $n > 0$  en forma de una suma de tres números primos:  $n = p_1 + p_2 + p_3$ ,  $p_i \in \mathbb{P}$ , donde  $\mathbb{P}$  designa al conjunto de todos los números primos, es decir, el número de soluciones de la ecuación diofántica  $n = x_1 + x_2 + x_3$  en el conjunto  $\mathbb{P}$ , se expresa por la fórmula asintótica

$$\mathbb{P}(n;3) = \frac{n^2}{2 \log^3(n)} S(n) + O\left(\frac{n^2}{(\log n)^{3,5-\epsilon}}\right),$$

donde  $S(n) > 0,6$  y  $\epsilon > 0$  es un número arbitrariamente pequeño. También se ha demostrado que  $N_0 < \exp(\exp 16,038)$ . En virtud de lo anterior, podemos restringirnos a los enteros pares y enunciar entonces lo que queda de la conjetura así:

*Si  $\mathbb{P}^*$  designa al conjunto de los números primos impares, entonces  $\mathbb{P}^*(n;2) \geq 1$  si n es un número par  $> 4$ , donde  $\mathbb{P}^*(n;2)$  es el número de soluciones de  $n = x_1 + x_2$  con  $x_1, x_2 \in \mathbb{P}^*$ .*



Para esta última hipótesis, en 1966, Cheng Jing-run [12] demostró que *todo número par suficientemente grande es la suma de un primo y de un número que no tiene más de dos factores primos distintos*. Es claro que hasta ahora el problema de Goldbach, a pesar de los resultados anteriores, no tiene todavía una solución definitiva. La evidencia numérica alcanzada por las computadoras de alta velocidad, usando algoritmos rápidos, sigue, empero, evidenciando que la conjetura tiene muchas posibilidades de ser válida.

El problema de Goldbach pertenece a la categoría de los problemas que en teoría de los números suelen denominarse *problemas aditivos*, cuya caracterización general es la siguiente: Dado un subconjunto  $A$  de  $\mathbb{Z}$ , ¿puede un elemento arbitrario de  $\mathbb{Z}$  escribirse como la suma de un número  $k$  de elementos de  $A$ , donde  $k$  es menor o igual a un número prefijado  $m$ ?

Nuestro análogo en  $\mathbb{F}_q[X]$  de la conjetura de Goldbach, encuentra las siguientes respuestas:

**Proposición 2.1.** [Hayes, 20]. Si  $h(X) \in \mathbb{F}_q[X]$  es un polinomio de grado  $h$  y  $q \gg h$ , entonces  $h(X)$  es la suma de dos polinomios irreducibles distintos de grado  $h+1$ .

En efecto, sabemos (proposición 1.2) que el número de polinomios unitarios irreducibles de grado  $h+1$  está dado por

$$\frac{1}{h+1} \sum_{d|(h+1)} \mu(d) q^{(h+1)d} =$$

$$\frac{q^{h+1}}{h+1} + O\left(\frac{q^{(h+1)/2}}{h+1}\right)$$

(cuando  $q \rightarrow \infty$ ). Por otra parte, el número de clases de equivalencia mód  $h(X)$  está dado por

$$1 + q + \dots + q^{h-1} < hq^{h-1} < q^{h+1}/(h+1)$$

si  $q \gg h$ , pues en tal caso  $h(h+1) < q^2$ . Luego, en por lo menos una clase módulo  $h(X)$  hay dos irreducibles unitarios distintos,  $p_1(X)$  y  $p_2(X)$ , de grado  $h+1$ . Es decir,  $p_1(X) - p_2(X) = h(X)a(X)$  para algún polinomio no nulo  $a(X)$  en  $\mathbb{F}_q[X]$ . Pero  $h + \partial a(X) = \partial[p_1(X) - p_2(X)] \leq h$ , lo que obliga a que  $\partial(a(X)) = 0$ , es decir,  $a(X) = \alpha^{-1} \in \mathbb{F}_q^*$ . Luego  $h(X) = \alpha p_1(X) - \alpha p_2(X)$ .

Esta representación no es, en general, única. Por ejemplo, en  $\mathbb{F}_3[X]$  los polinomios irreducibles

$$p_1(X) = x^3 + 2x + 1, \quad p_2(X) = x^3 + 2x^2 + 2x + 2,$$

$$p_3(X) = x^3 + 2x + 2, \quad p_4(X) = x^3 + x^2 + x + 1,$$

satisfacen

$$x^2 + 2 = p_1(X) - p_2(X) = p_4(X) - p_3(X).$$

En el mismo trabajo [20], Hayes establece el siguiente análogo de la fórmula asintótica de Vinogradov:

**Proposición 2.2.** Sea  $h(X)$  un polinomio unitario de grado  $h$  y designemos con  $N$  al número de parejas  $(p_1(X), p_2(X))$  de polinomios irreducibles de grado  $h+1$  que cumplan  $p_1(X) \equiv p_2(X) \pmod{h(X)}$ , con  $p_1(X) \neq p_2(X)$ . Si una de las dos condiciones siguientes se cumple:

(a)  $h(X)$  no admite factores cuadráticos,

(b)  $h+1$  no es divisible por la característica de  $\mathbb{F}_q$ ,

entonces

$$N = \frac{q^{2(h+1)}}{(h+1)^2 \varphi(h(X))} + O(q^{h+1}),$$

cuando  $q \rightarrow \infty$ .

Omitimos, para no alargar nuestra exposición, la demostración de este último resultado (veáanse [20] y [21]).

Pero, ¿a qué equivalen las nociones de par e impar en  $F_q[X]$ ? Se ha encontrado conveniente proponer lo siguiente: si  $q > 2$ , todo polinomio  $h(X)$  en  $F_q[X]$  es simultáneamente *par e impar*; si  $q = 2$ ,  $h(X)$  se dice *par* si es divisible por el polinomio  $X(X+1)$ , e *impar* en caso contrario. Con estas convenciones, Car [9] y Hayes [22] han demostrado lo siguiente:

**Proposición 2.3.** *Todo polinomio impar de grado  $h$  se puede expresar como una suma  $h(X) = p_1(X) + p_2(X) + p_3(X)$  de polinomios irreducibles de grado a lo sumo  $h$ , si  $h$  es suficientemente grande.*

Por su parte, Car [10] ha demostrado el siguiente análogo del teorema de Cheng Jing-run:

**Proposición 2.4.** *Todo polinomio par  $h(X)$  en  $F_q[X]$ , de grado  $h$  suficientemente grande, puede expresarse como una suma  $h(X) = p(X) + q(X)$ , donde  $p(X)$  es un polinomio irreducible de grado a lo sumo  $h$  y  $q(X)$  es un polinomio irreducible o el producto de dos polinomios irreducibles. Además, si  $G(h)$  es el número de tales expresiones, entonces*

$$G(h) \geq (0,33) \frac{2^{h+1}}{h^2} N(h) \varphi(h)^{-1} \times \prod_{\substack{p(X) \nmid h(X) \\ p(X) \in \mathcal{P}(q; X)}} \left( 1 - \frac{1}{\varphi(h)^2} \right)$$

Recientemente, Webb [39], usando un análogo de la criba de A. Selberg en  $F_q[X]$ , ha demostrado lo siguiente:

**Proposición 2.5.** *Sea  $h(X)$  en  $F_q[X]$  un polinomio de grado  $h$ . Sea  $N(h+1; h(X))$  el número de polinomios primos y unitarios de grado  $h+1$ , para los cuales  $p(X) + h(X)$  es irreducible. Entonces*

$$N(h+1; h(X)) \leq C \frac{q^{h+1}}{(h+1)^2}$$

donde  $C$  es una constante. Además,  $N(h+1; h(X)) = s +$  número de irreducibles unitarios  $p(X)$  tales que  $h(X) + p(X)$  es irreducible y  $\partial p(X) \leq h/2$ , donde  $s$  es el cardinal del "resultado de la criba".

Poseemos evidencias de que posiblemente  $N(h+1; h(X)) > 0$ , con lo cual la condición  $q \gg h$  parece no ser necesaria en la proposición 2.1.

### Las conjeturas de Fermat y Catalan

La famosa conjetura de Fermat sobre la inexistencia de soluciones enteras de la ecuación

$$(3.1) \quad x^n + y^n - z^n = 0, \\ (x,y) = (x,z) = (y,z) = 1,$$

si  $n \geq 3$ , es muy conocida. Los esfuerzos hechos por demostrarla han generado una enorme cantidad de excelente matemática, lo que por sí solo bastaría para justificarlos. A los interesados en conocer detalles de estos esfuerzos recomendamos vehementemente la lectura del erudito libro de Ribenboim [32]. Menos conocida es la siguiente conjetura de Catalan [11]:

*Las únicas potencias consecutivas enteras son 8 y 9.*

Es decir, la única solución en enteros  $x, y, m, n$ , mayores que 1, de la ecuación

$$(3.2) \quad x^m - y^n = 1$$

está dada por  $x = n = 3$  é  $y = m = 2$ . La ecuación (3.2) es un caso particular de la llamada conjetura de **Cassels-Catalan**:

*Para enteros fijos  $a, b$  y  $c$ , distintos de cero, la ecuación*

$$(3.3) \quad ax^m + by^n = c$$

*tiene sólo un número finito de soluciones enteras  $x, y, m, n$  que satisfacen  $m \geq 3$ ,  $n, |x|, |y| \geq 2$ ,*

pues basta tomar  $a = -b = c = 1$ . En 1976, **Tijdeman** [36] demostró que en este caso la conjetura de **Cassels-Catalan** es correcta; es decir, si existen potencias consecutivas de números enteros, éstas aparecen en número finito, sin que aún podamos decidir si 8 y 9 sean las únicas.

El estudio de estas ecuaciones en los anillos de polinomios se puede realizar sin suponer de entrada que los coeficientes estén en un cuerpo finito  $\mathbb{F}_q$ . Es decir, podemos estudiar soluciones en  $K[X]$ , donde  $K$  es en principio un cuerpo arbitrario. En efecto, en 1879 **Liouville** [30] demostró que si  $x(X), y(X)$  y  $z(X)$  son polinomios *no constantes* de coeficientes en el cuerpo  $\mathbb{C}$  de los números complejos, que cumplen las condiciones  $(x(X), y(X)) = (x(X), z(X)) = (y(X), z(X)) = 1$ , entonces no pueden satisfacer la ecuación (3.1) si  $n \geq 3$ . Dicho de otra manera, la conjetura de **Fermat** es válida en el anillo  $\mathbb{C}[X]$  si excluimos las múltiples soluciones constantes de (3.1). En

1880, **Korkine** [29] dió una demostración algebraica, más elegante, del resultado de **Liouville**, quien había utilizado la teoría de funciones de variables complejas. El problema lo retoma casi un siglo después, en 1969, **Greenleaf** [17], quien da una nueva demostración elemental utilizando ideas básicas de la teoría de las ecuaciones algebraicas (al parecer **Greenleaf** desconocía el trabajo de **Korkine**). Un poco más tarde, en 1974, **Natanson** [31] anota que la demostración de **Greenleaf** continúa siendo válida en un cuerpo de característica  $\ell > 0$  siempre y cuando  $\ell \nmid n$  (esta condición es importante por razones de separabilidad), pues  $x(X) = X + 1, y(X) = X - 1$  y  $z(X) = X$  son soluciones de (3.1) en  $K[X]$  si  $n = 3$  y  $K$  es un cuerpo de característica 3. En el mismo trabajo, **Natanson** demuestra que la conjetura de **Catalan** es correcta en  $K[X]$  si la característica  $\ell$  de  $K$  no divide a  $mn$ ; más precisamente, si  $\ell \nmid mn$  la ecuación (3.2) no tiene soluciones no constantes en  $K[X]$ . Más recientemente, en 1984, **Ribenboim** [33] generaliza el resultado de **Natanson** a una clase más amplia de ecuaciones.

Para beneficio del lector, daremos aquí las demostraciones de los resultados de **Greenleaf** y **Ribenboim**, obteniendo de contera el de **Natanson**.

**Proposición 3.1 (Greenleaf)** *Sea  $K$  un cuerpo de característica  $\ell \geq 0$ . Si  $\ell \nmid n$  y  $n > 2$ , entonces no existen  $x(X), y(X), z(X) \in K[X]$ , *no constantes, que satisfagan la ecuación (3.1). Es decir, las únicas soluciones posibles de la ecuación de Fermat en  $K[X]$  son polinomios constantes.**

*Demostración.* Supongamos que (3.1) tenga soluciones en  $K[X]$  y que  $K$  sea algebraicamente cerrado. Tomemos entonces  $x(X)$ ,  $y(X)$  y  $z(X)$  en forma tal que  $r = \max \{ \partial x(X), \partial y(X), \partial z(X) \}$  sea mínimo. Sea  $\zeta$  una raíz primitiva  $n$ -ésima de 1, la cual pertenece a  $K$  puesto que  $\ell \nmid n$ . Bajo estas condiciones, (3.1) puede escribirse así:

$$(3.4) \quad x(X)^n = \prod_{k=0}^{n-1} [z(X) - \zeta^k y(X)]$$

en  $K[X]$ . Como  $z(X)$  é  $y(X)$  son primos entre sí, los polinomios  $z - y$ ,  $z - \zeta y, \dots, z - \zeta^{n-1} y$  son primos entre sí dos a dos (esto es de fácil verificación). De aquí resulta, usando la factorialidad de  $K[X]$ , que  $z(X) - \zeta^k y(X) = g_k(X)^n$ , donde  $g_k(X) \in K[X]$ . Consideremos ahora el  $K$ -espacio vectorial generado por  $z(X)$  é  $y(X)$ , el cual tiene dimensión 2. Es claro entonces que  $z(X) - y(X)$ ,  $z(X) - \zeta y(X)$ ,  $z(X) - \zeta^2 y(X)$  pertenecen a este subespacio. Por tanto, son linealmente dependientes sobre  $K$ . Luego existen  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  en  $K$ , no todos nulos, tales que

$$\alpha_0 g_0(X)^n + \alpha_1 g_1(X)^n = \alpha_2 g_2(X)^n$$

Ahora bien, como  $K$  es algebraicamente cerrado existen  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  en  $K$  tales que  $\alpha_i = \beta_i^n$  ( $i = 0, 1, 2$ ). Luego (3.1) tiene una solución  $\beta_0 g_0(X)$ ,  $\beta_1 g_1(X)$ ,  $\beta_2 g_2(X)$  en  $K[X]$ , polinomios primos entre sí, tales que  $\max \{ \partial \beta_i g_i(X) \} \leq r/n < r$ , lo que contradice la minimalidad de  $r$ . Supongamos finalmente que  $K$  no sea algebraicamente cerrado y consideremos su clausura algebraica  $K^\wedge$ . Entonces si  $x(X)$ ,  $y(X)$  y  $z(X)$  en  $K[X]$  satisfacen (3.1), también la satisfacen en  $K^\wedge[X]$ . Luego  $x(X)$ ,  $y(X)$ ,  $z(X) \in K^\wedge$ . Pero  $K^\wedge \cap K[X] = K$ .

**Proposición 3.2. (Ribenoim)**  
Sean  $m, n > 2$ ,  $\ell \nmid mn$ . Si  $x(X)$ ,  $y(X) \in K(X)$  satisfacen  $y(X)^n = P(x(X))$ , donde  $P(t) \in K[t]$  es un polinomio de grado  $m$  y raíces distintas, entonces  $x(X)$  é  $y(X)$  pertenecen a  $K$ .

*Demostración.* Como en la proposición anterior, podemos suponer que  $K$  es algebraicamente cerrado sin perder sustancialmente la generalidad. Demostremos ahora que si  $x(X) \in K$  entonces  $y(X) \in K$ . En efecto, si  $x(X) \in K$ , entonces  $y(X)^n = c \in K$ ; como  $K$  es algebraicamente cerrado, existe  $d \in K$  tal que  $d^n = c$ . Pero  $\ell \nmid n$ , de modo que  $K$  contiene las raíces  $n$ -ésimas de la unidad y, por consiguiente,

$$[y(X) - d] [y(X) - \zeta d] \dots [y(X) - \zeta^{n-1} d] = 0.$$

Esto obliga a que  $y(X) \in K$ . Recíprocamente, si  $y(X) \in K$  y  $Q(t) = P(t) - y(X)^n \in K[t]$ , entonces  $x(X)$  es una raíz de  $Q(t)$ . Como  $K$  es algebraicamente cerrado,  $x(X) \in K$ . Sea ahora

$$P(t) = a_0 t^m + a_1 t^{m-1} + \dots + a_m = a_0 \prod_{i=1}^m (t - r_i)$$

donde  $a_i, r_i \in K$  ( $i=1, \dots, m$ ), todos los  $r_i$  son distintos y  $a_0 \in K, a_0 \neq 0$ . Sean  $x = x_1/x_0, y = y_1/y_0$ , con  $x_0, x_1, y_0, y_1 \in K[X]$  y supon-gamos, además, que  $(x_0, x_1) = (y_0, y_1) = 1$ . Entonces

$$y_1^m x_0^m = (x_0, a_0 x_0^m + \dots + a_m x_0^m) y_0^n$$

Como

$$(x_0, a_0 x_0^m + \dots + a_m x_0^m) = 1,$$

resulta

$$y_0^n = h x_0^m, \text{ donde } h \in K[X].$$

De  $(y_0, y_1) = 1$  se obtiene:

$$(3.5) \quad a_0 x_0^m + \dots + a_m x_0^m = h' y_1^n x_0^m,$$

donde  $h' \in K[X]$ . Por tanto,  $hh' = 1$  y necesariamente  $h, h' \in K[X]$ . Sea  $d \in K$  tal que  $d^n = h'$ ; entonces, de (3.5):

$$(dy_1)^n = a_0 \prod_{i=1}^m (x_1 - r_i x_0).$$

Como las raíces  $r_i$  son todas distintas, los polinomios  $x_1 - r_i x_0$  son primos dos a dos. Luego, como  $K[X]$  es factorial, cada  $x_1 - r_i x_0$  es una potencia n-ésima en  $K[X]$ :

$$x_1 - r_i x_0 = h_i^n \quad (i = 1, \dots, m), \quad h_i \in K[X].$$

Dado que  $m \geq 3$ , los elementos  $x_1 - r_1 x_0, x_1 - r_2 x_0, x_1 - r_3 x_0$  son K-linealmente dependientes en el K-espacio generado por  $x_0$  y  $x_1$  en  $K[X]$ , el cual tiene dimensión 2. Por tanto, existen  $b_i \in K$  ( $i = 1, 2, 3$ ), no todos nulos, tales que

$$0 = b_1(x_1 - r_1 x_0) + b_2(x_1 - r_2 x_0) + b_3(x_1 - r_3 x_0) = b_1 h_1^n + b_2 h_2^n + b_3 h_3^n$$

Más aún, todos los  $b_i$  son distintos de 0, pues  $(x_0, x_1) = 1$ . Sean, pues,  $c_i \in K$  tales que  $c_i = b_i^n$  ( $i=1, 2, 3$ ), de modo que

$$(c_1 h_1)^n + (c_2 h_2)^n + (c_3 h_3)^n = 0.$$

Por la proposición 3.1,  $h_1, h_2, h_3 \in K$ . Usando ahora la observación hecha al comienzo de la demostración, vemos que  $h_i^n = x_1 - r_i x_0$  implica que  $x_1 - r_i x_0 \in K$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Esto implica

a su vez que  $(r_1 - r_2)x_0 \in K$  y, en consecuencia, que  $x_0$  y  $x_1$  pertenecen a  $K$ , lo cual es contrario a la hipótesis,

**Proposición 3.3. (Natanson)** *La ecuación (3.2) no tiene soluciones no constantes en  $K[X]$  si  $m, n \geq 2$  y  $\ell \nmid mn$ .*

*Demostración.* Tomemos  $P(t) = t^n - 1, \ell \nmid mn$ . Si  $m, n > 2$ , apliquemos la proposición 3.2. Si  $m = 2$  y  $n > 2$ , tenemos  $y^n = x^2 - 1 = (x - 1)(x + 1)$ . Como  $(x + 1, x - 1) = 1$ , existen  $h, k \in K[X], (h, k) = 1$ , tales que  $x + 1 = h^n, x - 1 = k^n$ . Entonces  $h^n - k^n = 2$ , de donde  $(2^{1/n})^n + k^n + ((-1)^{1/n} h)^n = 0$ , lo que produce una solución no constante de la ecuación de Fermat (3.1), contrariamente a la proposición 3.1. De manera semejante se procede en los casos  $m > 2$  y  $n = 2$  ( $\ell \nmid 2$ ). Observemos finalmente que si  $m = n = 2$  y  $x, y \in K[X]$  satisfacen  $1 = (x - y)(x + y) = x^2 - y^2$ , entonces tanto  $x - y$  como  $x + y$  pertenecen a  $K$  y, por consiguiente,  $x$  é  $y$  también pertenecen a  $K$ .

Volvamos ahora a la conjetura de **Cassels-Catalan** en  $K(X)$ , empezando por observar que si  $m = n = 2$ , la ecuación (3.2) admite soluciones no constantes en  $K(X)$ :

$$\left( \frac{x^2 - 1}{x^2 + 1} \right)^2 - \left( \frac{2\sqrt{-1}x}{x^2 + 1} \right)^2 = 1$$

si  $\sqrt{-1} \in K$ , aunque no las admita en  $K[X]$ . Por otra parte, usando el resultado de **Ribenboim**, la ecuación (3.3) no admite soluciones no constantes en  $K(X)$  si  $m, n > 2$  y  $\ell \nmid mn$ . Todo esto conduce a preguntarnos qué sucede con la con-

jetura de Cassels-Catalan en una extensión algebraica finita  $L$  de  $K(X)$ , o lo que es casi lo mismo en el cuerpo de funciones de una variedad proyectiva regular (no singular). La respuesta a esta pregunta la da el siguiente resultado de Silverman [35]:

**Proposición 3.4.** *Sea  $K$  un cuerpo de característica  $\ell$  (posiblemente con  $\ell = 0$ ), y sea  $L/K$  el cuerpo de funciones de una variedad proyectiva regular. Fijemos  $a, b, c \in L^*$ .*

*Entonces sólo hay un número finito de parejas de enteros  $m, n \geq 2$  (primos con  $\ell$  si  $\ell \neq 0$ ) para las cuales la ecuación (3.3) tiene siquiera una única solución no constante  $x, y \in L, x, y \notin K$ .*

*Además, para cualquier par particular  $(m, n)$  de éstos sólo habrá un número finito de soluciones  $x, y \in L$ , a menos que:*

(i) *a/c sea una potencia  $m$ -ésima y  $b/c$  una potencia  $n$ -ésima en  $L$ , en cuyo caso pueden existir infinitas soluciones  $(x, y) = (\alpha(a/c)^{1/m}, \beta(b/c)^{1/n})$  con  $\alpha, \beta \in K$  que cumplen  $\alpha^m + \beta^n = 1$ ; ó*

(ii)  *$(m, n) \in \{(2, 2), (2, 3), (3, 2), (2, 4), (4, 2), (3, 3)\}$ , en cuyo caso la ecuación de Cassels-Catalan define una curva de género 0 ó 1 sobre  $L$ .*

De modo que las soluciones no constantes de (3.3), con  $m, n > 2$ , sólo pueden aparecer si  $L/K(X)$  es una extensión propia de  $K(X)$ . Sería muy interesante estudiar tanto (3.3) como (3.2) en los cuerpos cuadráticos de funciones algebraicas sobre  $K = \mathbb{F}_q$ , cuya estructura es bien conocida desde Artin [5], en el sentido de precisar en el resultado de Silverman la forma de sus soluciones y su cantidad.

## La hipótesis de Riemann y las conjeturas de Weil

En un artículo trascendental de ocho páginas, *Ueber die Anzahl der Primzahlen unter eine gegebenen Grösse* [34], Riemann introduce la función de variable compleja

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \prod_p \left( 1 - p^{-s} \right)^{-1},$$

que converge absoluta y uniformemente si  $\Re(z) > 1$ , para intentar "calcular" el número  $\pi(x)$  de primos menores que  $x$  mediante una "fórmula analítica", que no vamos a discutir aquí. La importancia del artículo de Riemann no estriba tanto en sus resultados como en los métodos que inaugura, los que en manos de Hadamard, von Mangoldt y de la Vallée-Poussin, por ejemplo, condujeron a demostraciones correctas de la fórmula de Riemann para  $\pi(x)$  y del llamado *teorema de los números primos*. Las personas interesadas en obtener más detalles sobre este trabajo de Riemann pueden hojear el interesante libro de H. M. Edwards [14]

La función  $\zeta(s)$  puede prolongarse analíticamente a todo el plano complejo, con excepción del polo  $s = 1$ , usando una ecuación funcional, dada por Riemann, en la cual interviene la función factorial  $\Gamma(s)$ . Al estudiar los ceros de la función  $\zeta(s)$  (ver, para detalles, [14] y [34]), Riemann concluye que es "muy probable" que lo siguiente sea cierto:

*Todos los ceros de  $\zeta(s)$  están en la recta  $\Re(s) = 1/2$ .*

Esta es la famosa *hipótesis de Riemann*, incluida por Hilbert [24]

en su celebrada lista de problemas de 1900. Hasta hoy nadie ha podido demostrarla ni invalidarla, aunque sabemos [18], por ejemplo, que existen números complejos  $s$  que satisfacen  $\zeta((1/2 + it) = 0$  y que su cantidad es infinita.

Cuando trasladamos el problema al anillo  $\mathbb{F}_q[X]$ , obtenemos el siguiente análogo de la función  $\zeta$  de Riemann:

$$\zeta^*(s) = \sum_{a \in \mathbb{M}(q;X)} |a|^{-s} = \sum_{k=0}^{\infty} \left[ \sum_{\partial a = k} 1 \right] q^{-ks},$$

de donde

$$(4.1) \quad \zeta^*(s) = \sum_{k=0}^{\infty} q^{-k(s-1)} = (1 - q^{1-s})^{-1}.$$

Claramente la serie en (4.1) converge absoluta y uniformemente si  $\Re(s) > 1$  y define así una función analítica en este semiplano. Pero  $1/(1 - q^{1-s})$  es una función meromorfa en  $\mathbb{C}$  con un único polo en  $s = 1$  (pues  $\lim_{s \rightarrow 1^+} (1 - q^{1-s})^{-1} = +\infty$ ), de modo que  $\zeta^*(s)$  admite como prolongación analítica a la función  $(1 - q^{1-s})^{-1}$ . Para tener en cuenta la llamada "valuación en  $\infty$ ", se acostumbra definir la función zeta de  $\mathbb{F}_q(X)$  por la ecuación:

$$\zeta(s, \mathbb{F}_q(X)) = (1 - q^{-s})^{-1}(1 - q^{1-s})^{-1},$$

la cual evidentemente no posee ceros y satisface entonces trivialmente la hipótesis de Riemann, lo que de por sí no es muy interesante. Sin embargo, si en vez de  $\mathbb{F}_q(X)$  tomamos una extensión finita  $L$  de  $\mathbb{F}_q(X)$ , es decir, un cuerpo aritmético de funciones algebraicas,

la situación tiene otro cariz. En efecto, en este caso la función zeta de  $L$  está dada por

$$(4.2) \quad \zeta(s, L) = \zeta(s, \mathbb{F}_q(X)) r(s, L),$$

donde  $r(s, L)$  es un polinomio en  $q^{-s}$ . Se puede ver ([40]) que con el cambio de variables  $u = q^{-s}$ , (4.2) deviene

$$(4.3) \quad Z(u, L) = Z(u, \mathbb{F}_q(X)) P(u) \\ = P(u)(1 - u)^{-1}(1 - qu)^{-1},$$

donde

$$(4.4) \quad P(u) = \prod_{i=1}^{2g} (1 - \alpha_i u) \in \mathbb{Z}[u],$$

$\alpha_i \bar{\alpha}_i = q$  ( $1 \leq i \leq 2g$ ) y  $g$  es el género del cuerpo  $L$ . Por tanto los ceros de (4.2) corresponden a los ceros de (4.4). Pero Weil [40] ha demostrado también que todos los ceros de (4.4) satisfacen  $|\alpha_i| = q^{-1/2}$ . Como  $|q^{-(\sigma+it)}| = q^{-\sigma}$  si  $s = \sigma + it$ , resulta entonces que  $s = \sigma + it$  es un cero de  $\zeta(s, L)$  sólo si  $s = 1/2 + it$ . Es decir, la función zeta  $\zeta(s, L)$  del cuerpo aritmético de funciones  $L$  satisface la hipótesis de Riemann.

Naturalmente, Weil atacó el problema a sabiendas de que Artin [5] ya había demostrado la hipótesis para algunos casos de extensiones cuadráticas de  $\mathbb{F}_q(X)$  y la había conjeturado en el caso más general de los cuerpos aritméticos de funciones sobre  $\mathbb{F}_q$ . Por otra parte, la demostración de Weil se realiza estudiando la "función zeta de un polinomio homogéneo regular" (no singular) sobre cualquier extensión algebraica de  $\mathbb{F}_q$ , cosa que es esencialmente equivalente a estudiar la función zeta de un cuerpo aritmético de funciones sobre



$F_q$ . Este hecho condujo a Weil [41] a introducir la función zeta de una variedad algebraica sobre  $F_q$  y a proponer una serie de conjeturas, entre las cuales estaba la hipótesis de Riemann para estas nuevas funciones zeta, no sin antes demostrarlas para cierto tipo de hipersuperficies proyectivas. Algunas de estas conjeturas de Weil fueron demostradas muy rápidamente, pero sólo en 1973 pudo Deligne demostrar que efectivamente la función zeta de una variedad algebraica sobre  $F_q$  satisface la hipótesis de Riemann, lo que muchos consideran una de las grandes proezas de este siglo. Para un análisis de la demostración de Deligne y una discusión de los aspectos históricos de las conjeturas de Weil, recomendamos mirar el artículo de Katz [28].

### La conjetura de Artin

Empecemos mencionando que el problema de determinar los números primos  $p$  para los cuales un número entero dado  $a$  es raíz primitiva módulo  $p$  (es decir, aquellos primos  $p$  para los cuales la clase residual  $a$  genera al grupo cíclico  $(\mathbb{Z}/\mathbb{Z}p)^*$  de  $p-1$  elementos), lo investigó Gauss para el caso particular  $a = 10$ , en el Artículo 303 de sus *Disquisitiones Arithmeticae* [15], dedicado al desarrollo decimal periódico de fracciones de denominador  $p$ . Precisamente Gauss conjeturó que

*El número de primos  $p$  para los cuales 10 es raíz primitiva módulo  $p$  es infinito.*

Una condición necesaria y suficiente para que  $a$  sea una raíz primitiva módulo el primo  $p$  está contenida en la siguiente proposición:

**Proposición 5.1.** *Un entero  $a$  es raíz primitiva del número primo  $p$  si, y sólo si,  $(a,p) = 1$  y  $a$  no satisface ninguna de las congruencias*

$$a^{(p-1)/q} \equiv 1 \pmod{p}$$

*cuando  $q$  recorre los distintos divisores primos de  $p-1$ .*

*Demostración.* En efecto, si alguna de las congruencias del enunciado subsiste y dado que  $(p-1)q < (p-1)$ , es imposible que  $a$  pueda ser raíz primitiva módulo  $p$ . Recíprocamente, si  $(a,p) = 1$  y  $a$  no satisface ninguna de las congruencias anteriores y suponemos que  $a \equiv 1 \pmod{p}$  para algún  $d < p-1$ , sabemos que  $d \mid (p-1)$ , de modo que tendríamos  $(p-1)/d = uq$ , donde  $q$  es un divisor primo de  $p-1$ . Por consiguiente,  $(p-1)/d = uq$ ,  $a^{(p-1)/d} = a^{uq} \equiv 1 \pmod{p}$ , lo que contradice la hipótesis hecha.

En lo que sigue usaremos la siguiente notación:

$A(a) = \{ p; p \text{ es un primo y } a \text{ es raíz primitiva módulo } p \}$ .

Con ella la conjetura de Gauss puede expresarse diciendo que  $A(10)$  es infinito. Desde el siglo XIX se conocía que para algunos  $a$  el conjunto  $A(a)$  era infinito. Por ejemplo:

**Proposición 5.2.**  $A(2)$  es infinito.

*Demostración.* Según la proposición 5.1, 2 es raíz primitiva de un primo de la forma  $p = 4q + 1$  si, y sólo si, 2 no satisface ni

$$2^4 \equiv 1 \pmod{4q+1}$$

ni

$$2^{2q} \equiv 1 \pmod{4q+1}.$$

Como  $15 \equiv 0 \pmod{4q+1}$  es imposible pues ni 3 ni 5 son de la

forma  $4n+1$  si  $q > 1$ , la primera de estas congruencias es imposible si  $q > 1$ . Por otra parte, para un primo  $p \equiv 1 \pmod{4}$  se tiene

$$2^{(p-1)/2} = 2^{2q} \equiv \left( \frac{2}{4q+1} \right) \pmod{4q+1},$$

donde  $(2/p)$  es el símbolo de Legendre. Si  $p = 4q+1 = 8m+5$ , sabemos [38] que  $(2/p) = -1$ ; luego, en este caso, la congruencia  $2^{2q} \equiv 1 \pmod{4q+1}$  es imposible. Pero, un famoso teorema de Dirichlet sobre las progresiones aritméticas, nos dice que el conjunto de los primos  $p$  que satisfacen  $p \equiv 5 \pmod{8}$  es infinito, pues  $(5,8) = 1$ . Como  $p \equiv 5 \pmod{8}$  implica que  $p \equiv 1 \pmod{4}$ , resulta entonces que el número de primos de la forma  $p = 4q+1$  que hacen  $(2/4q+1) = -1$  es infinito, lo que muestra que  $A(2)$  también lo es.

Pero  $A(a)$  también puede ser finito o vacío. Por ejemplo, si  $a = x^2$  es un cuadrado perfecto ( $x \in \mathbb{Z}$ ), obtenemos de la identidad de Fermat,  $x^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$  la relación  $a^{(p-1)/2} \equiv 1 \pmod{p}$ , la que indica que si  $p \nmid x$  y  $p$  es impar, entonces  $p \in A(a)$ . Pero si  $p \mid x$  es claro que  $p \notin A(a)$ . Luego  $A(a) = \emptyset$ . Por otro lado, dado que  $(-1)^2 = +1$ , vemos que  $p \in A(-1)$  si  $p-1 > 2$ . Pero  $-1$  es una raíz primitiva módulo 3; es decir,  $A(-1) = \{3\}$ .

Lo anterior, más un razonamiento heurístico de tipo probabilístico -además de seductor- que puede encontrarse explicado en [7], [16] o [25], llevó a Artin, en 1927, en el curso de una conversación con Hasse, a proponer la siguiente conjetura:

*Si  $a \neq 0$ ,  $+1$  y no es un cuadrado perfecto, entonces  $A(a)$  es infinito.*

Esta conjetura ha sido demostrada por Hooley [25] bajo el supuesto de que la extensión natural de la hipótesis de Riemann a la función zeta de Dedekind de ciertas extensiones galoisianas de  $\mathbb{Q}$  es válida.

El análogo de la conjetura en  $\mathbb{F}_q[X]$  fue demostrado, en 1937, por Bilharz [7], un alumno de Hasse, también bajo el supuesto de que la hipótesis de Riemann para las funciones algebraicas sobre cuerpos finitos sea válida. Afortunadamente para Bilharz, Weil demostró la validez de esta hipótesis, tal como lo hemos indicado anteriormente. Pasamos en seguida a precisar este análogo.

Recordemos que en  $\mathbb{F}_q[X]$  el papel de los números primos lo tienen los polinomios irreducibles unitarios. Si  $p(X)$  es uno de estos polinomios, de grado  $r$ , entonces sabemos que  $(\mathbb{F}_q[X]/(p(x)))$  es un cuerpo finito de  $q^r$  elementos y que  $(\mathbb{F}_q[X]/(p(X)))^*$  es un grupo cíclico de  $q^r - 1$  elementos. Como en el caso de los números enteros, un polinomio  $a(X) \in \mathbb{F}_q[X]$  se dice una raíz primitiva módulo  $p(x)$  si la clase residual  $\bar{a}(X)$  genera el grupo cíclico  $(\mathbb{F}_q[X]/(p(x)))^*$ . Dado  $a(X)$  designamos con

$$A(a(X)) = \{p(x) \in \mathbb{P}(q;X) ; a(X) \text{ es raíz primitiva módulo } p(X)\}.$$

En esta situación subsiste también el análogo de la proposición 5.1.

Ahora bien, si  $a(X) = b(X)^\ell$ , donde  $\ell$  es primo y  $\ell \mid (q^r - 1)$ , vemos que

$$a(X)^{(q^r - 1)/\ell} \equiv b(X)^{q^r - 1} \equiv 1 \pmod{p(X)},$$

$(q^r-1)/\ell < q^r - 1$ , lo que muestra que  $A(a(X)) = \emptyset$  si  $a(X)$  es una potencia  $\ell$ -ésima de un divisor  $\ell$  de  $q^r-1$ . También, si  $a(X) = a$  es un polinomio constante, entonces  $a$  solo puede ser raíz primitiva de polinomios primos  $p(x) = X - b$  de grado 1, es decir sólo si la clase residual  $a$  tiene orden  $q-1$  en el grupo  $(\mathbb{F}_q[X]/(X-b))^* = \mathbb{F}_q^*$ .

De estos polinomios hay exactamente  $q$ ; luego  $A(a)$  es finito si  $a(x) = a$  es constante. Todo esto condujo a la siguiente conjetura:

*Si  $a(X) \in \mathbb{F}_q[X]$  no es constante ni es una potencia  $\ell$ -ésima de un primo  $\ell$  que divide a  $q-1$ , entonces  $A(a(X))$  es infinito.*

La demostración de Bilharz se reduce a verificar que la llamada *densidad de Dirichlet* de  $A(a(X))$  es  $> 0$ , lo que implica que este conjunto es infinito, y conduce de manera natural a usar las funciones zeta de Dedekind de cierto tipo de extensiones galoisianas de  $\mathbb{F}_q(X)$ , para las cuales ya sabemos es válida la hipótesis de Riemann.

En realidad Bilharz demuestra su teorema para la situación más general en que  $\mathbb{F}_q(X)$  es reemplazado por una de sus extensiones algebraicas finitas  $k$  y en vez de polinomios primos se habla de *divisores primos de  $k$* . Es interesante anotar, finalmente, que en el caso  $k = \mathbb{F}_q(X)$  la demostración de que  $A(X)$  es infinito no requiere de la hipótesis de Riemann [7].

**La conjetura de Borevich y Shafarevich sobre la serie de Poincaré de un polinomio de coeficientes  $\ell$ -ádicos**

En [8, problema 9, pág. 47] Borevich y Shafarevich hicieron

la siguiente pregunta: dado un primo racional fijo  $\ell$ , sea  $\mathbb{Q}_\ell$  el cuerpo de los números  $\ell$ -ádicos y  $\mathbb{Z}_\ell$  el anillo de los enteros  $\ell$ -ádicos. Para un polinomio  $H(t_1, \dots, t_s)$  en  $\mathbb{Z}_\ell[t_1, \dots, t_s]$  denotemos con  $c(n; H)$  al número de ceros de la reducción  $H_n(t_1, \dots, t_s)$  de  $H(t_1, \dots, t_s)$  en el anillo residual  $\mathbb{Z}_\ell/\ell^n\mathbb{Z}_\ell$ . ¿Es entonces la serie de Poincaré de  $H$

$$(6.1) P(H; U) := \sum_{n=0}^{\infty} c(n; H) U^n \in \mathbb{Z}[[U]],$$

donde  $c(0; h) = 1$ , una función racional de  $U$ ? Respuestas parciales a esta pregunta se conocían antes de 1973 (para esto remitimos a [13]), año en el cual Igusa ([26],[27]) dió una respuesta general afirmativa, basada en el teorema de resolución de singularidades en característica cero demostrado antes por Hironaka. Sus resultados, sin embargo, no muestran cómo calcular efectivamente (6.1) como el cociente de dos polinomios en  $U$ . Más tarde, Denef [13] dió una nueva elegantísima demostración de la conjetura, usando esencialmente el hecho que  $\mathbb{Q}_\ell$  admite eliminación de cuantificadores, con lo cual evitaba el profundo teorema de Hironaka. Relacionada con esta conjetura existe la siguiente, debida a Hayes y Nutt [23]:  $P(H; U) = q(U)/r(U)$ , donde  $q(U)$  y  $r(U)$  son polinomios en  $\mathbb{Z}[U]$  que cumplen las siguientes condiciones:  $q(0) = 1$  y  $r(U)$  es el producto de polinomios de la forma  $1 - \ell^m U^n$ , donde  $m \geq 0$  y  $n \geq 1$  son enteros para los cuales subsiste la desigualdad  $m \leq ns$ . Estos autores han denominado esta aserción la Q-conjetura.

Dada la analogía existente entre los cuerpos aritméticos de característica cero y los de

característica  $> 0$  (es decir, las extensiones algebraicas finitas de  $\mathbb{F}_q(X)$ ), es natural plantearse la misma pregunta en este último caso. Sin embargo, en éste no existe un teorema general de resolución de singularidades ([1],[2]), ni sabemos si los anillos que interesan admiten eliminación de cuantificadores ([6]). Por estas razones parece que un ataque directo usando métodos elementales à la Abhyankar, podría ser interesante. En efecto, nosotros hemos demostrado, en algunos casos especiales, la validez del análogo de la conjetura de Borevich y Shafarevich y, de contera, de la Q-conjetura, usando propiedades aritméticas simples del cuerpo  $L((Z))$  de las series meromorfas formales sobre un cuerpo finito  $L$ , puesto que le problema puede reducirse a esta situación, como pasamos a verificar ([4]).

Si  $K$  es un cuerpo aritmético de característica  $\ell > 1$ , es decir, una extensión algebraica finita de  $\mathbb{F}_\ell(X)$ , y si  $p$  es un divisor primo de  $K$ , consideremos el completado  $K_p$  de  $K$  en  $p$ . Si  $w_p$  representa a la correspondiente valuación discreta, denotemos con  $\mathcal{O}_p = \{x \in K_p ; w_p(x) \geq 0\}$  y  $\pi\mathcal{O}_p = \{x \in K_p ; w_p(x) > 0\}$ , donde  $w_p(\pi) = 1$ , al anillo de los enteros  $p$ -ádicos y el único ideal primo de  $\mathcal{O}_p$ , respectivamente. En esta situación,  $L_p = \mathcal{O}_p / \pi\mathcal{O}_p$  es una extensión finita de  $\mathbb{F}_\ell$ , con, pongamos,  $q$  elementos. Con esta notación nuestra conjetura puede expresarse así:

Sea  $H(t_1, \dots, t_s) \in \mathcal{O}_p(t_1, \dots, t_s)$  y sea  $c(n; h)$  el número de ceros de la reducción de  $H$  en el anillo residual  $\mathcal{O}_p / \pi^n \mathcal{O}_p$  ( $n = 1, 2, \dots$ ). Entonces

$$(6.1) \quad P(H; U) := \sum_{n=0}^{\infty} c(n; H) U^n \in \mathbb{Z}[[U]],$$

donde  $c(0; h) = 1$ , es una función racional de  $U$ .

Como  $\mathcal{O}_p = L_p[[Z]]$ ,  $L_p = \mathcal{O}_p / \pi\mathcal{O}_p$ ,  $\pi\mathcal{O}_p = (Z)$ , basta demostrar la conjetura en un anillo  $L[[Z]]$ , donde  $L$  es un cuerpo finito de característica  $\ell$  y  $q$  elementos. Más precisamente, es suficiente demostrar que si  $c(n; H)$  designa al número de ceros de  $H$  en el anillo residual  $L[[Z]]/(Z^n)$ , entonces (6.1) es una función racional de  $U$ .

El punto de partida nuestro es la versión especial del teorema de Taylor para la reducción  $H_n(t_1, \dots, t_s)$  módulo  $(Z^n)$  del polinomio  $H(t_1, \dots, t_s) \in L[[Z]][t_1, \dots, t_s]$  que nos permite concluir que un cero de  $H_n(t_1, \dots, t_s)$  produce exactamente  $q^s - 1$  ceros de  $H_{n+1}(t_1, \dots, t_s)$  si la proyección de este cero módulo  $(Z)$  es un cero regular de  $H_1(t_1, \dots, t_s)$ , y en caso contrario, es decir, cuando esa proyección es un cero singular de  $H_1(t_1, \dots, t_s)$ , produce exactamente  $q^s$  si es que  $H_{n+1}(t_1, \dots, t_s)$  admite ceros que *descienden* del cero dado de  $H_n(t_1, \dots, t_s)$ . Por ejemplo, si todos los ceros de  $H_1(t_1, \dots, t_s)$  son regulares, obtenemos

$$P(H; U) = 1 + c(1; H) \frac{U}{1 - q^{s-1}U}$$

donde  $c(1; H)$  es el número de ceros de  $H_1(t_1, \dots, t_s)$ . El problema aparece cuando  $H_1(t_1, \dots, t_s)$  admite ceros singulares. El caso más sencillo de esta situación es el monomio

$$H(t) = (t - \alpha(Z))^e,$$

de la sola variable  $t$ , donde  $\alpha(Z) = \alpha_0 + \alpha_1 Z + \alpha_2 Z^2 + \dots \in L[[Z]]$  y  $e \geq 1$ , para el cual encontramos

$$P(H; U) = 1 + \frac{U[1 + qU + \dots + q^{c-1}U^{c-1}]}{1 - q^{c-1}U^c}$$

Utilizando este resultado es posible entonces demostrar que la serie de Poincaré de un polinomio arbitrario en una sola variable:

$$H(t) = \beta(0) + \beta(1)t + \dots + \beta(m)t^m,$$

$$\beta(m) \neq 0,$$

$\beta(i) \in L[[z]]$  ( $0 < i < m$ ) es una función racional de  $U$ . También es posible demostrar que la serie de Poincaré

$$\text{de un monomio } H(t_1, \dots, t_s) = t_1^{c_1} \dots t_s^{c_s}$$

es racional. Lo mismo para las formas fuertemente degeneradas [4].

## BIBLIOGRAFIA

1. ABHYANKAR, S. 1975. *High-School algebra in algebraic geometry*. Historia Mathematica 2, 567-572.
2. ————. 1976. *Historical ramblings in algebraic geometry and related algebra*. Amer. Mat. Monthly 83, 409-449.
3. ALBIS, V. S. 1988. *Lecciones sobre la teoría aritmética de polinomios*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. (Policopiado.)
4. ALBIS, V.S. & CHAPARRO, R. 1989. *On a conjecture of Borevich and Shafarevich in arithmetic function fields*. (Manuscrito.)
5. ARTIN, E. 1924. *Quadratische Körper in Gebiete der höheren Kongruenzen I, II*. Math. Zeitschrift 19, 153-246.6
6. BERLINE, C. & CHERLIN, G. 1981. *QE rings in characteristic p*. Proceedings of the Storrs Conference.
7. BILHARZ, H. 1937. *Primdivisoren mit vorgegebener Primitivwurzeln*. Math. Ann. 114, 476-492.
8. BOREVICH, Z. I. & SHAFAREVICH, I. R. 1966. *Number Theory*. New York: Academic Press.
9. CAR, M. 1984. C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. A273, 201-204.
10. CAR, M. 1984. *Le théorème de Chen pour  $F_q[X]$* . Diss. Math., 54 págs.
11. CATALAN, E. 1842. *Problème 48*. Nouvelles Annales de Mathématiques 1, 520.
12. CHEN, Jing-run. 1966. *On the representation of a large even integer as the sum of a prime and the product of at most two primes*. Xexue Tongbao 17, 385-386.
13. DENEJ, J. 1984. *The rationality of the Poincaré series associated to the p-adic points on a variety*. Inv. Math. 77, 1-23.
14. EDWARDS, H. M. 1974. *Riemann's Zeta Function*. New York: Academic Press.
15. GAUSS, C. F. 1801. *Disquisitiones Arithmeticae*. Leipzig = *Recherches Arithmétiques*. Paris: Courcier, 1806.
16. GOLDSTEIN, L. J. *Density questions in algebraic number theory*. Amer. Math. Monthly 78, 342-353.
17. GREENLEAF, N. 1969. *On Fermat's equation in  $C(t)$* . Amer. Math. Monthly 76, 808-809.
18. HARDY, G. H. 1914. *Sur les zéros de la fonction  $\zeta(s)$  de Riemann*. C. R. Acad. Sci. Paris 158, 1012-1014.
19. HASSE, H. 1952. *Ueber die Artinsche Vermutung verwandte Dichtefrage*. Ann. Acad. Sci. Fennicae, Ser. A, I, Math.-Phy. 116.
20. HAYES, D. R. 1963. *A polynomial analog of the Goldbach conjecture*. Bull. Amer. Math. Soc. 69, 115-116.
21. ————. 1963. *Correction to "A polynomial..."*. Bull. Amer. Math. Soc. 69, 493.
22. ————. 1966. *The expression of a polynomial as a sum of three irreducibles*. Acta Arith. 11, 461-488.
23. HAYES, D. R. & NUTT, M. D. 1982. *Reflective functions on p-adic fields*. Acta Arith. 40, 229-248.
24. HILBERT, D. 1902. *Problèmes futures des mathématiques*. C. R. 2ème. Congr. Int. Math. Paris.
25. HOOLEY, C. 1967. *On Artin's conjecture*. J. reine angew. Math. 225, 209-220.
26. IGUSA, J.-I. 1974. *Complex powers and asymptotic expansions. I*. J. reine angew. Math. 268/269, 110-130. II 278-279 (1975), 307-321.. I
27. ————. 1977. *Some observations on higher degree characters*. Amer. J. Math. 99, 393-417.
28. KATZ, N. 1976. *An overview of Deligne's proof of the Riemann hypothesis for varieties over finite fields*. Proc. of Symposia in Pure Math., Vol. 28, 275-305.
29. KORKINE, A. 1880. *Sur l'impossibilité de la relation algébrique  $X^n + Y^n + Z^n = 0$* . C. R. Acad. Scie. Paris 90, 303-304.

30. LIOUVILLE, R. 1879. *Sur l'impossibilité de la relation algébrique  $X^n + Y^n + Z^n = 0$* . C. R. Acad. Scie. Paris 87, 1108-1110.
31. NATANSON, M. 1974. *Catalan's equation in  $K(t)$* . Amer. Math. Monthly 81, 371-373.
32. RIBENBOIM, P. 1979. *13 Lectures on Fermat's Last Theorem*. New York/Heidelberg/Berlin: Springer-Verlag.
33. ———— 1984. *Remarks on existentially closed fields and diophantine equations*. Ren. Sem. Math. Univ. Padova 71, 229-237.
34. RIEMANN, B. 1859. *Ueber die Anzahl der Primzahlen unter einer gegebenen Grösse*. In *Gesammelte Werke*. New York: Dover, 1953.
35. SILVERMAN, J. H. 1982. *The Catalan equation over function fields*. Trans. Amer. Math. Soc. 273, 201-205.
36. TIJDEMAN, R. 1976. *On the equation of Catalan*. Acta Arith. 29, 197-209.
37. VINOGRADOV, I. M. 1937. *La representación de un número impar como la suma de tres números primos* (en ruso). Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 139-142.
38. ———— 1971. *Fundamentos de la teoría de los números*. Moscú: Mir.
39. WEBB, W. A. 1983. *Sieve methods for polynomial rings over finite fields*. J. of Number Theory 16, 343-355.
40. WEIL, A. 1948. *Sur les courbes algébriques et les variétés qui s'en déduisent*. Paris: Hermann.
41. ———— 1949. *Number of solutions of equations in a finite field*. Bull. Amer. Math. Soc. 55, 497-508.

# LA ENERGÍA SOLAR: DESARROLLO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE I & D\*

por

Humberto Rodríguez M.\*\*

## Resumen

Rodríguez, H.: La energía solar, desarrollo actual y perspectivas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 505-509, 1990. ISSN 0370-3908.

Se plantea la importancia de la radiación solar. Se presentan diferentes alternativas de utilización artificial de la energía solar, se hace un recuento de los avances logrados, en el medio colombiano y se plantean varias posibilidades de investigación y desarrollo.

## Introducción

La energía solar es la energía radiante emitida por el sol en la forma de ondas electromagnéticas. El sol es una estrella, en cuyo interior reinan temperaturas entre  $8 \text{ y } 40 \times 10^6 \text{ K}$ . La temperatura de su superficie es mucho más baja,  $5800 \text{ K}$ . El sol emite aproximadamente  $3.8 \times 10^{23} \text{ kW}$ , de los cuales la tierra intercepta  $1.7 \times 10^{14} \text{ kW}$ . De esta manera, la tierra es efectivamente un gran colector solar.

De la potencia interceptada por la tierra, 35% es reflejada al espacio, 43% se transforma en calor a baja temperatura y es reradiada al espacio y cerca de 22% mueve el ciclo de evaporación y precipitación de la biósfera. Una cantidad menor de 0.5% es transformada en la energía cinética de los vientos y las olas, y es acumulada en las plantas gracias a la fotosíntesis.

La energía solar de esta manera es responsable del clima, del ciclo del agua, de los vientos y del crecimiento de las plantas. Esta utilización natural de la energía solar pertenece a nuestra vida cotidiana y pasa por ello inadvertida, pero es tan importante la energía solar que nuestro planeta depende totalmente de ella y sin ella no existiría la vida en la tierra.

La energía solar es también directa o indirectamente, el origen de todas las fuentes de energía de que hoy disponemos (exceptuando la energía nuclear, la geotérmica y la maremotriz). Los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas) son energía solar acumulada.

Si se considera globalmente la energía que fluye en la tierra, la energía solar representa más del 99% de esta mientras que la liberada por la actividad humana no representa el 1%. A pesar de la insignificancia de la actividad humana desde el punto de vista cuantitativo, ésta tiene ondas repercusiones sobre el medio ambiente y el clima debido a los nocivos impactos de la tecnología energética en uso, mientras que la energía solar es la forma natural de energía para nuestro planeta: No produce polución sino vida y está disponible desde hace tres mil millones de años y lo estará durante los próximos tres mil millones de años.

\* Estudio científico leído en el recinto de la Academia el 25 de octubre de 1989 con ocasión de su posesión como académico correspondiente.

\*\* Profesor Asociado, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia. — Apartado Aéreo: 100102 Bogotá D.E.



Alternativamente a la utilización natural de la energía solar, se tiene la utilización artificial. Es a ésta a la que en adelante nos referiremos.

La historia de la tecnología muestra como la humanidad ha buscado incesantemente nuevas formas de energía, abundantes y baratas. Las nuevas formas de energía han desplazado a las viejas y a la energía solar; luego se han producido "crisis de energía", se ha retornado a viejas formas de energía y a la energía solar hasta el "descubrimiento" de otras nuevas formas, y así sucesivamente. De esta manera, el desarrollo de la tecnología solar ha estado sometida a vaivenes.

A raíz de la última crisis de energía de 1973, la humanidad volvió a la energía solar. Los países comenzaron programas de investigación para estudiar su utilización. Hoy en día, los presupuestos para Investigación y Desarrollo (I & D) de la energía solar han disminuido sustancialmente en todos los países, principalmente debido a la caída de precios del petróleo.

Sin embargo, de la última crisis de energía han quedado resultados muy positivos para la energía solar: Tecnologías muy prometedoras recibieron un impulso definitivo que ha asegurado su existencia futura y se comenzaron proyectos, algunos impensables hoy en día sin la energía solar.

El objetivo de esta conferencia es presentar de una manera global cual ha sido el desarrollo de la energía solar en los últimos años y mostrar cuales son las perspectivas de I & D en nuestro país.

## 1. Energía Solar

Al atravesar el espacio, la densidad de potencia de la radiación solar disminuye con el inverso del cuadrado de la distancia. A la distancia media sol-tierra de  $150 \times 10^6$  km, esta densidad de potencia es de  $1353 \text{ W/m}^2$ . Esta magnitud se conoce como constante solar. Otra característica importante de la radiación solar en el espacio es que se trata sólo de radiación directa.

La radiación solar al interactuar con la atmósfera terrestre, sufre cambios tanto cuantitativos como cualitativos. Las moléculas absorben y dispersan la radiación, de tal suerte que a nivel terrestre la intensidad es menor que en el espacio y adicionalmente a la radiación directa se tiene la difusa.

La energía solar a nivel terrestre depende entonces de factores climatológicos que están fuera del control del hombre y que no son fácilmente predecibles.

Para utilizar la energía solar es necesario conocer localmente su disponibilidad, esto es, la cantidad de energía que recibe una superficie durante un período de tiempo dado. Generalmente, se em-

plea el promedio mensual de la energía solar diaria sobre una superficie horizontal. Por lo tanto, para conocer la disponibilidad de la energía solar en una localidad es necesario conocer el promedio de la radiación solar diaria para cada mes. De una manera más general, el promedio anual de la radiación solar diaria o la energía solar recibida por una superficie horizontal durante un año.

La disponibilidad de energía solar en Colombia varía desde niveles de 2000 a 2100 kWh/m<sup>2</sup> en la Guajira, 1800 en la Costa y Llanos Orientales, 1600 en la zona Andina y 1400 en el Chocó y Costa Pacífica. Los valores para la Guajira corresponden a aproximadamente al 85% de los valores máximos medidos en zonas desérticas de Africa y Asia Menor. El potencial disponible en el país es entonces elevado. Pero más importante es el hecho de que esta energía está distribuida muy uniformemente durante el año, reduciéndose significativamente los problemas de almacenamiento de energía.

## 2. Desarrollo actual

La utilización artificial de la energía solar en Colombia data desde antes de la colonia, cuando nuestros indígenas la empleaban para la producción de sal (en la Costa) y el secado de productos alimenticios. Más recientemente, en los años 30, las compañías bananeras en la Costa dotaron las casas y campamentos de calentadores solares, algunos aún hoy en día en servicio.

Posteriormente, en la Universidad de Santander en los años sesenta, con el auspicio de la UNESCO, se adelantaron trabajos en el área de la energía solar, especialmente calentadores y destiladores solares.

Ya en la década del setenta, después de la crisis de energía del 73, las universidades de Los Andes, Nacional de Bogotá y Medellín, Valle y otras, y organizaciones como el Centro Las Gaviotas, empezaron con la experimentación de sistemas solares para diversas aplicaciones. El fruto de estas actividades es el grado de desarrollo actual alcanzado, el cual sin lugar a dudas, coloca a Colombia entre los países donde la utilización de la energía solar ha alcanzado un desarrollo significativo.

### 2.1. Aplicaciones térmicas

La utilización más simple de la energía solar es su transformación en calor para diferentes aplicaciones térmicas, siendo la más difundidas, el calentamiento de agua para uso doméstico, el secado de granos y productos agrícolas, y la destilación de agua.

El sistema de calentamiento de agua más desarrollado es el de termosifón. Este sistema consiste esencialmente de un colector solar y de un tanque de almacenamiento de calor. En el colector solar, la

energía solar se transforma en calor, el cual se transfiere al agua dentro del colector. La circulación entre los colectores y el tanque se realiza por termosifón.

Actualmente, hay en el país cerca de 15 fabricantes de sistemas solares. La mayoría de los colectores emplean tubería de cobre, aislamiento de poliuretano o fibra de vidrio y tienen vidrio corriente por cubierta.

Los tanques de almacenamiento, fuertemente aislados, son o no presurizables. Los presurizables se fabrican generalmente de láminas de hierro galvanizado. Con el fin de prolongar un poco más su vida útil, se suelen pintar interiormente con pintura anticorrosiva o son vitrificados (esmaltados).

Los sistemas abiertos (no directamente presurizables) emplean tanques de asbesto-cemento y de plástico.

El costo de un calentador solar para una familia de cinco personas varía entre \$ 250 000 y \$ 300 000 (entre US\$ 600 y US\$ 750). Estos costos de inversión son elevados cuando se comparan contra los de un calentador eléctrico (factor 6) o uno de gas (factor 4) y obviamente su adquisición sólo es justificable si se considera el costo durante el ciclo de vida del calentador solar.

El panorama actual es de especial importancia. Se ha masificado el uso de los calentadores solares, principalmente en los proyectos del Banco Central Hipotecario en Bogotá. En este proyecto se instalarán aproximadamente 11.000 calentadores solares, fabricados por el Centro Las Gaviotas (el mayor fabricante en el país), constituyéndose en un programa sin precedentes en Colombia y en Latinoamérica.

También hay sistemas mayores, con áreas que llegan a alcanzar hasta casi 500 m<sup>2</sup>, empleados en el suministro de agua caliente para cafeterías y piscinas.

Otros dispositivos son los destiladores y secadores solares. Actualmente se fabrican comercialmente pequeños destiladores con un área de 1 m<sup>2</sup>. Estos destiladores producen cerca de 3 litros diarios de agua destilada al día, en la Guajira.

Finalmente, se han desarrollado varios prototipos de secadores solares. Estos aún se encuentran en fase de investigación aunque ya hay algunos prototipos sirviendo en empresas. Es importante anotar que en el caso del secado solar, el problema es más un problema de secado de cada producto antes que de energía solar.

## 2.2. Generación de electricidad

La transformación directa de la energía solar en electricidad mediante celdas solares se ha consti-

tuido en una excelente alternativa para la generación de electricidad a pequeña escala en lugares remotos, frente a los sistemas tradicionales que presentan dificultades en el suministro de combustibles y mantenimiento y operación.

Hay esencialmente dos aplicaciones: Las telecomunicaciones y el suministro de energía a hogares campesinos.

Los sistemas fotovoltaicos se emplean masivamente en programas como el de Telecomunicaciones Rurales de TELECOM (Empresa Nacional de Telecomunicaciones). Hoy hay más de 6.000 sistemas empleados en telecomunicaciones, instalados principalmente por TELECOM, EDA (Empresas Departamentales de Antioquia) y varias compañías privadas.

Actualmente, el programa de Telecomunicaciones Rurales de Telecom ha emprendido uno de los más ambiciosos programas para llevar los servicios de telecomunicaciones a los Territorios Nacionales. Este programa, con la cobertura actual, sería impensable sin la energía solar.

Los sistemas fotovoltaicos también han penetrado enormemente en el sector rural de Colombia. Estos sistemas suministran energía eléctrica a hogares campesinos en zonas apartadas del país, en lugares que carecen de electricidad y a los que el estado difícilmente les podría suministrar energía en el corto plazo, debido a limitaciones económicas. Estos sistemas fotovoltaicos proveen la energía necesaria para la iluminación, radio, televisión y radiotelefonía. Actualmente hay más de 12 000 sistemas en esta aplicación.

El Grupo de Energía Solar de la Universidad Nacional, ha participado activamente tanto a nivel de investigación como de asistencia técnica tanto a las compañías de telecomunicaciones como a los usuarios individuales. En materia de investigación, se ha trabajado principalmente en celdas de CdS-Cu<sub>2</sub>S y actualmente se estudian otros materiales promisorios.

## 2.3. Otros aspectos

A nivel investigativo, el interés y el apoyo han disminuido en el sector universitario. Las actividades de investigación se centran en las universidades Nacional, Andes, Valle y Pontificia Bolivariana, en el IAN (Instituto de Asuntos Nucleares) y en firmas e instituciones privadas como el Centro Las Gaviotas.

La introducción de normas técnicas para equipos solares ha recibido impulso del ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas). Sin embargo, aún no se prueban sistemáticamente los sistemas solares. Así, el comprador no tiene ninguna certeza de lo que compra, diferente de las especifica-

ciones y rendimiento térmico prometido por el fabricante.

El desarrollo institucional ha sido lento. Por un lado, el Ministerio de Minas y Energía delegó en el IAN las actividades en energía solar y otras energías no convencionales.

Por otro lado, CORELCA (Corporación Eléctrica de la Costa Atlántica) y el ICA (Instituto Colombiano Agropecuario) con la cooperación de la agencia alemana GTZ (Sociedad Alemana de Cooperación Técnica), crearon PESENCA (Programa Especial de Energía de la Costa Atlántica. PESENCA, que comenzó a operar en mayo de 1985, tiene como objetivo el aprovechamiento adecuado de la energía (en todas sus formas) en la Costa Atlántica. Como objetivo inmediato, impulsar la energización rural en la Costa y propender por el uso racional de la energía en esta región.

En el campo de la energía solar, PESENCA viene adelantando diferentes actividades. Realizó el estudio de Energía Solar de la Costa Atlántica. En este se determinó el potencial solar de esta región del país, que resultó elevado y apropiado para diversas aplicaciones. Este estudio pertenece a un conjunto de estudios sectoriales de importancia para el conocimiento de la situación energética de la Costa y para la planificación de su desarrollo.

PESENCA ha propiciado la creación de empresas de energía solar en la Costa y estimulado su desarrollo, al implementar sistemas demostrativos (sólo en energía solar más de 35) y divulgar su uso, constituyéndose estas empresas en factores del desarrollo local y nuevas fuentes de empleo y actividad económica. También ha fortalecido las pocas empresas inicialmente existentes, al darles asistencia técnica para el mejoramiento de sus equipos. Las empresas de energía solar en la Costa Atlántica ya han instalado varios centenares de sistemas solares, principalmente fotovoltáicos.

Con su "Centro de Demostración y Prueba de Equipos de Fuentes Nuevas y Renovables", en la Granja Turipaná del ICA (cerca de Montería), PESENCA espera no sólo instalar equipo demostrativo sino probarlo, para que así las empresas e instituciones interesadas en mejorar sus productos y desarrollar nuevos puedan conocer el rendimiento de los mismos e introducir las mejoras respectivas.

PESENCA se ha constituido en un programa de vanguardia en el país en el campo de las fuentes de energía nuevas y renovables, que conjuntamente con las firmas privadas y el apoyo institucional respectivo, podrán en el transcurso de los próximos años mejorar la utilización de la energía en la industria y el suministro de energía a habitantes de zonas aisladas, actualmente carentes de este vital servicio.

En 1979 se creó SOCES (Sociedad Colombiana de Energía Solar y Energías No Convencionales). Esta asociación aglutina a más de 150 personas e instituciones interesadas en el desarrollo de las energías no convencionales. Realiza congresos y conferencias, entre los cuales merece destacarse el VI Congreso Latinoamericano de Energía Solar, recientemente celebrado (Cartagena, mayo 1989).

### 3. Perspectivas de I & D

La energía solar tiene enormes posibilidades en el país. Exploraremos las posibilidades de I & D en tres áreas: Radiometría, aplicaciones térmicas y generación de electricidad en pequeña escala.

#### 3.1. Radiometría

La determinación de las características de la radiación solar en Colombia es no sólo importante para futuros trabajos en energía solar sino también como información fundamental para estudiar el clima y comprender mejor las modificaciones que actualmente se están presentando en la atmósfera y el impacto que éstas tendrán sobre nuestra región.

Resulta entonces importante establecer una red radiométrica que permita mejorar la información sobre radiación solar, principalmente para la determinación de la radiación solar global, brillo solar (magnitud para la cual ya hay una extensa red de instrumentos), radiación sobre superficies inclinadas, radiación difusa y su relación con la radiación global, balance radiativo en suelos y otras superficies de interés. Es necesario también sistematizar y mantener actualizada la información sobre radiación solar.

Para la calibración de instrumentos radiométricos es importante el montaje de un laboratorio apropiado en donde sea posible calibrar instrumentos así como desarrollar instrumentos adecuados y de bajo costo.

#### 3.2. Aplicaciones térmicas

Las posibilidades de I & D en el sector térmico se centran principalmente en los siguientes campos:

##### 3.2.1. Nuevos colectores solares

Los colectores actualmente en uso en el país son fabricados con láminas metálicas y tubería de cobre. Los materiales empleados inciden desfavorablemente en el costo de los sistemas, afectando la economía del ciclo de vida de los mismos. Una alternativa es buscar nuevos materiales que permitan la reducción de costos de los sistemas.

### 3.2.2. Acumulación de calor

En los sistemas solares, el calor se almacena generalmente en la forma de calor sensible en el agua. Existe sin embargo, la alternativa de utilizar el calor latente de las transiciones de fase sólido-líquido de algunas sustancias. Empleando estas sustancias se podrían diseñar y construir sistemas de almacenamiento de calor compactos, con múltiples aplicaciones no sólo en energía solar sino también en procesos industriales.

### 3.2.3. Sistemas y prueba de sistemas solares

Los sistemas solares empleados en el país no han sido sistemáticamente probados. Con el fin de caracterizar los productos, permitiendo así que el usuario conozca sus características y que el fabricante los pueda mejorar, es de vital importancia para el desarrollo de la energía solar probar los sistemas de calentamiento de agua.

### 3.2.4. Refrigeración solar

La refrigeración de productos en zonas rurales es una necesidad de los campesinos y de las organizaciones interesadas en el desarrollo agroindustrial del país. No existen refrigeradores solares confiables y con costos suficientemente reducidos. Se pueden entonces investigar diferentes procesos y sistemas existentes mas no aún suficientemente desarrollados.

### 3.2.5. Destilación solar

El agua potable es una necesidad rural. Se puede investigar la destilación solar como parte de un proceso de potabilización de agua. Los destiladores actuales presentan en general rendimientos bajos, que es posible mejorar sin aumentar desproporcionadamente sus costos.

### 3.2.6. Secado de productos agrícolas

El secado tradicional de productos con energía solar es una técnica ampliamente utilizada en el país. El secado solar tecnificado no ha sido aún suficientemente investigado y desarrollado.

### 3.2.7. Arquitectura

La arquitectura podría resultar enormemente beneficiada de los estudios de energía solar. Es posible calcular las cargas térmicas sobre fachadas y cubiertas y de esta manera, mediante diseño arquitectónico, reducirlas. Además, también se puede estimar muy bien la contribución de la radiación directa y difusa en la iluminación de recintos.

## 3.3. Generación de electricidad

La investigación en celdas solares se adelanta en los países industrializados con miras a satisfacer las necesidades de los países en desarrollo. Rápidamente se ha venido haciendo una transición de la tecnología estándar de fabricación de celdas a partir de monocristales de silicio por la fabricación de módulos solares con tecnología de películas delgadas. Esta nueva tecnología requiere de inversiones costosas que en el mediano plazo no estamos, por lo menos a nivel nacional, en capacidad de acometer. De acuerdo con lo anterior, las posibilidades se limitan a la fabricación de celdas por el sistema tradicional y al desarrollo y mejoramiento de los sistemas utilizados.

Los sistemas solares actualmente suministrados a los campesinos en el país adolecen de varias deficiencias, principalmente, baterías no apropiadas y reguladores de carga con disfunciones. Igualmente ocurre con los electrodomésticos que les suministran. Es entonces de especial importancia desarrollar sistemas mejores y de mayor confiabilidad.

# LA IMPORTANCIA DE LOS CROMOSOMAS POLITENICOS EN LA DETERMINACION TAXONOMICA DE LOS SIMULIDOS\*

por

Paulina Muñoz de Hoyos\*\*

## Resumen

Muñoz de Hoyos, P.: La importancia de los cromosomas politénicos en la determinación taxonómica de los simúlidos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 16 (66): 511-520, 1990. ISSN 0370-3908.

Se explica porqué en la familia Simuliidae la aplicación de los métodos taxonómicos convencionales no es suficiente para la identificación correcta de las especies y cuál es la utilidad de los cromosomas politénicos en la resolución de este problema. Se detallan los pasos a seguir para el análisis de los cromosomas politénicos y se proporcionan algunos ejemplos de especies latinoamericanas para señalar la importancia que tiene la citotaxonomía, en la familia Simuliidae, para caracterizar las especies crípticas dentro de una morfoespecie.

## Introducción

La identificación precisa de las especies es un requisito para llevar a cabo estudios en biología básica en aspectos morfológicos, fisiológicos, ecológicos, filogenéticos, de comportamiento. Si las especies son vectores de algún parásito que produzca una enfermedad, la posición taxonómica es indispensable para el conocimiento de su papel como vector y la subsecuente formulación de estrategias para su control.

Muchas especies del género *Simulium* son relativamente inócuas. Sin embargo, las hembras hematófagas de algunas de ellas tienen gran valor epidemiológico en la transmisión de *Onchocerca volvu-*

*lus* Leuckart, 1893 y *Mansonella ozzardi* Manson, 1897 al hombre, filarias causantes de la oncocercosis y la mansonelosis respectivamente, dolencias presentes en ciertas regiones de Colombia. Por la hematofagia y la toxicidad de sus picaduras, la presencia de los simúlidos impide que los animales domésticos se alimenten y descansen adecuadamente y por lo tanto reducen la producción de carne, leche, huevos y otros productos animales y ocasionan disfunción reproductiva que se traduce en problemas de orden económico.

Los simúlidos, vulgarmente conocidos como jejenes, moscas negras, borrachudos y rodadores y pertenecientes al orden Diptera, suborden Nematocera, familia Simuliidae, han sido poco estudiados en nuestro medio. No se conocen datos sistemáticos, de distribución geográfica, ni inventarios de las especies; no existe una colección de referencia y menos aún claves adecuadas para su clasificación. Las descripciones son escasas, a veces están basadas en pocos ejemplares y sobre una sola etapa de su ciclo de vida y han sido producto de colecciones aisladas en áreas donde se encuentran las condiciones

\* Estudio científico pronunciado en el recinto de la Academia el 22 de octubre de 1989 con ocasión de su posesión como académica correspondiente.

\*\* Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales, Apartado Aéreo 7495, Bogotá, D.E.

lógicas apropiadas que proporcionan el hábitat adecuado para el desarrollo de los estadios inmaduros.

Los escasos trabajos realizados en el país están relacionados con las especies vectores (Barreto et al., 1970; Little y D'Alessandro, 1971; Tidwell et al., 1980a, b, c), con estudios morfotaxonomicos de algunas regiones frías de los Andes (Wygodzinsky 1953, 1971, 1973a, b, c.; Moncada y Bueno, 1977; Bueno et al., 1979; Moncada et al., 1980; Wygodzinsky y Coscarón, 1982; Muñoz de Hoyos et al., 1982, 1984) y con aspectos citotaxonomicos de los simúlidos de la región de La Calera, Cundinamarca (Duque, 1980; Moreno, 1982; Duque et al., 1988).

El objetivo del presente trabajo es explicar porqué en la familia Simuliidae la aplicación de los métodos taxonomicos convencionales no es suficiente para identificar correctamente las especies y cómo se emplea la citología cromosómica en la resolución de este problema. Adicionalmente, se proporcionan algunos ejemplos de estudios citotaxonomicos realizados en especies vectores de *Onchocerca volvulus* en Latinoamérica y se presentan los resultados resumidos de los trabajos efectuados con simúlidos de la región de La Calera.

### Sistemas de clasificación

Particularmente a nivel supraespecífico, el sistema de clasificación más aceptado por los investigadores en simúlidos es el propuesto por Crosskey. El divide la familia Simuliidae en dos subfamilias, Parasimuliinae (norteamericana) y Simuliinae (cosmopolita). Esta última contiene dos tribus, Prosimuliini con 20 géneros (10 neotropicales: *Araucnephia*, *Araucnephioides*, *Cnephia*, *Cnesia*, *Cnesiama*, *Gigantodax*, *Lutzsimulium*, *Mayacnephia*, *Paraustrosimulium*, *Tlalocomya*) y Simuliini con dos géneros, *Austrosimulium* (Australasia) y *Simulium* (cosmopolita). En el género *Simulium* reconoce 45 subgéneros de los cuales 12 son neotropicales: *Cerqueirellum*, *Chirostilbia*, *Coscaroniellum*, *Ectemnaspis*, *Hemicnetha*, *Inaequalium*, *Notolepria*, *Psaroniocompsa*, *Psilopelmia*, *Pternasphata*, *Simulium* y *Trocodagmia* (Crosskey 1981, 1987).

En Colombia están registradas sólo 32 especies de las 300 especies neotropicales del género *Simulium* y 3 de las 29 especies del género *Gigantodax*. Estos datos indican la magnitud del trabajo que es necesario emprender para conocer la fauna de los simúlidos en el país.

### Clasificación morfológica

La clasificación de los simúlidos no es una tarea sencilla, se requieren delicados métodos de disección de larvas, pupas, adultos hembras y adultos machos para evidenciar, a mayor aumento, las diferentes estructuras morfológicas y compararlas con las características anotadas en las claves existentes.

Los tres estadios del ciclo de vida poseen varios atributos con valor taxonómico tales como el dibujo del apotóma cefálico, la forma de la escotadura gular, la amplitud del puente postgenal, la disposición de los dientes del hipostomjo, la morfología del esclerito y las agallas anales en la larva; el aspecto, textura y refuerzos anteriores del capullo, la estructura y número de los filamentos respiratorios, la presencia de tricomas y distribución de los papelets en el frontoclipeo y el arreglo de los ganchos en las regiones dorsal y ventral del abdomen de la pupa; la conformación de los ojos, el tamaño de los segmentos antenales, la presencia o ausencia de dientes en el cibario, la venación y presencia de pelos y setas en las venas del ala, el aspecto de las patas y la proporción de los órganos genitales en el adulto.

Cuando se inicia el estudio de los simúlidos de una región determinada estas características contribuyen, en primera instancia, a conformar grupos específicos de individuos semejantes con rasgos morfológicos comunes. Sin embargo, los miembros de la familia Simuliidae presentan una gran homología morfológica en los estadios de larva, pupa e imago que hace difícil su clasificación. Cada morfoespecie puede estar conformada por un complejo de especies crípticas o gemelas. Como consecuencia, al trabajar en la identificación de los simúlidos es esencial utilizar otros métodos para obtener detalles, diferentes a los morfológicos, que ayuden a caracterizar los individuos.

### Otros métodos

Gracias al avance de las Ciencias Naturales existen hoy día la Citotaxonomía y la Quimiotaxonomía áreas que, aplicadas a la taxonomía, son de gran valor, más cuando la especiación ocurre en ausencia de una diferenciación morfológica notable, como ocurre en esta familia. Algunas de estas herramientas, que ayudan a solucionar los problemas de clasificación, son: la citogenética, el análisis de hidrocarburos cuticulares, la electroforesis enzimática y la hibridización del ADN.

- La citogenética, especialmente relacionada con los cromosomas politénicos, ha sido empleada, con éxito, en la identificación de las especies crípticas. Es una herramienta eficaz en la diferenciación de especies biológicas válidas. Las citologías cromosómicas se han utilizado en simúlidos desde los años 50. Esta técnica ofrece la ventaja de que después de extraer las glándulas salivares de la larva los restos pueden guardarse para futuros estudios morfológicos.
- El análisis de hidrocarburos cuticulares por cromatografía de gas líquido, puesto en práctica desde 1981 por Carlson y Walsh, es un método ideal debido a que el espécimen no se daña, puede llevarse a cabo en una estructura cu-

ricular aislada y aplicarse a ejemplares de museo.

- Las variaciones alélicas de las enzimas son particularmente útiles en la identificación de las especies gemelas. La electroforesis enzimática permite procesar gran número de ejemplares muestreados en un área extensa. Sin embargo, es necesario trabajar con individuos vivos o preservados en congelación que se destruyen completamente, situación desventajosa en estudios taxonómicos.
- La hibridización de ADN para estimar las secuencias divergentes, se aplica en simúlidos desde 1972 (Teshima, 1972). El procedimiento es muy laborioso, lento y además, requiere grandes cantidades de ADN y por lo tanto no es útil para procesos taxonómicos rutinarios. El análisis de ADN es el método más directo para demostrar la variación genética por no tener la intervención del medio ambiente.

#### Citotaxonomía

La principal contribución de la citología a la sistemática de simúlidos ha sido la demostración de que la morfoespecie del taxónomo está conformada por especies genéticamente diferentes, especies isomórficas que componen un complejo de especies crípticas, especies estrechamente relacionadas pero que están aisladas reproductivamente. Estas especies hermanas pueden ser definidas en términos de las características de los cromosomas de las glándulas salivares, llamados cromosomas politénicos.

#### ¿Qué son los cromosomas politénicos?

En 1881 Balbiani evidenció unas estructuras peculiares en los núcleos de ciertas células secretoras de *Chironomus*. Posteriormente Heitz y Bauer en 1933 y Painter en 1934 identificaron esas estructuras como cromosomas, y hoy se sabe que se encuentran en las células de los tejidos de secreción tales como: túbulos de Malpighio, recto, intestino y glándulas salivares de los Diptera. También se han hallado en algunas plantas (Nagl, 1969), en algunos ciliados (Ammermann, 1968) y en *Collembola Casagnau*, 1971).

Son cromosomas especializados en el sentido de que cada uno contiene ácidos nucleicos específicos y componentes proteínicos y a la vez toman una estructura apropiada a su situación. Son cromosomas de núcleos interfásicos que se forman por varias repeticiones sucesivas de cada par homólogo íntimamente sinapsado donde las cadenas hijas no se separan. Como consecuencia, cada cromosoma consiste de muchas fibras paralelas (aproximadamente 1024) dispuestas a lo largo de su eje con los cromómeros poco espaciados que forman, como resultado de la politenia, un patrón de bandas característico de cada brazo cromosómico y de cada especie. El pa-

trón de bandeamiento de los cromosomas politénicos representa la expresión más completa de la alternancia regular de cromómeros —bandas— y regiones intercromoméricas —interbandas—, aún en cromátides individuales. Hay gran variación en la posición, grosor y morfología de cada banda por la misma diversificación en los cromómeros individuales que la forman.

Algunas bandas con expresión génica se encuentran en estado de expansión. Esta actividad genética es una característica del estado de desarrollo del individuo, así que los cambios en la expresión se pueden seguir con la aparición o desaparición de estos sitios activos, conocidos como "puffs" cromosómicos.

Para cada tejido y en diferente tiempo, durante el desarrollo larval, existe un patrón característico de "puffs" (Beerermann, 1952). Generalmente se aprecia un aumento del número de ellos antes de las mudas larvales momentos donde hay producción de ecdisona (hormona de la muda) elaborada por la glándula protorácica y que controla el desarrollo de los "puffs".

Los "puffs" parecen formarse de una simple banda, ocasionalmente de un par de bandas. Existen unos "puffs" de mayor tamaño, llamados anillos de Balbiani, donde no se puede determinar cuál banda, en el sitio del anillo, corresponde al locus activo.

La correspondencia entre el "puff" y el sitio activo para la síntesis de RNA se ha demostrado con estudios autorradiográficos desde 1964 con los trabajos de Pelling quien determinó que cada "puff" es un sitio de transcripción y su tamaño depende de la actividad de la banda o bandas que lo forman.

El valor taxonómico de los cromosomas es universalmente reconocido; Rothfels (1979, 1981a, b) demostró que las diferencias en el patrón de bandas cromosómicas permite del reconocimiento de especies crípticas en simúlidos lo que ha llevado al aumento en el número de citoespecies en esta familia.

Los simúlidos son un material excelente para los estudios citogenéticos por el tamaño y la claridad de los cromosomas politénicos de las glándulas salivares de las larvas y el número reducido de ellos. La mayoría de las especies estudiadas tienen 3 pares de cromosomas. Hasta la fecha sólo se conocen dos excepciones: *Cnephia lapponica* (Petrova, 1972) y algunos miembros del grupo *Eusimulium aureum* (Dunbar, 1958) que poseen 2 pares de cromosomas.

#### Procedimiento para el estudio de los cromosomas politénicos

Después de hacer la disección, fijación, coloración y montaje de las glándulas salivares de la larva de último estadio, reconocida por poseer el histo-

blasto de los filamentos respiratorios de color oscuro y tomar las microfotografías de los mejores complementos cromosómicos, se miden los cromosomas para conocer su longitud.

Los cromosomas se nombran con números romanos, en orden decreciente de tamaño, con los brazos corto y largo designados como S y L, respectivamente y los segmentos proximal, central y distal al centrómero como p, c y d respectivamente.

El complemento entero se divide en 100 secciones, la proporción asignada a un brazo es determinada por la contribución, en porcentaje, del brazo a la longitud total del complemento. Las secciones se numeran de 1 a 100 iniciándose en IS y finalizando en IIII. Es así como, por lo general el cromosoma I se divide en 42 secciones, el cromosoma II en 30 y el III en 28.

### Identificación de marcadores

#### — Marcadores universales

Para identificar cada brazo cromosómico se tienen en cuenta la posición y orientación de los marcadores universales propios de la familia Simuliidae que, en su mayoría, son grupos de bandas con forma y disposición característica. Por su condición de universales lo más apropiado es mantener su designación en Inglés. Entre ellos se pueden mencionar los siguientes:

IS =	"3" basales tasa y platillo	(basal "3") ("cup & saucer")
IL =	marcador mayor "3" subterminales patrón del telómero	("marker") (subterminal "3")
IIS =	Anillo de Balbiani Cordón de zapato central a la doble burbuja Trapezoide	("Balbiani ring") ("shoestring") ("double bubble") ("Trapezoid (al)")
III =	3 bandas bien definidas Parabalbiani	("3 sharp") ("Parabalbiani")
IIIS =	grupo de bandas pesadas ampolla telómero festoneado	("heavy band group") ("blister") ("frazzled end")
IIII =	banda basal pesada marcador basal 3 grupos pesados	("heavy basal band") ("basal marker") ("three heavy groups")

#### — Marcadores específicos

La Región organizadora nucleolar (RON), donde tiene lugar la síntesis del ARNr, a causa de su movilidad dentro del genoma, no se emplea como marcador universal para identificar un brazo de un cromosoma. Sin embargo, en cada especie, su posición se conserva.

Otros marcadores específicos aplicables para el señalamiento de una especie son: banda gris

("gray band"), bloques ("blocks"), cuello ("neck"), cápsula ("capsule"), diente de sierra ("sawtooth"), región esponjosa ("spongy") y grieta ("crak").

### Análisis banda por banda

Una vez identificados los brazos de los cromosomas se lleva a cabo el análisis banda por banda de cada brazo con el fin de determinar:

- La posición y morfología de la región centromérica.

El centrómero puede corresponder a una banda conspicua, gruesa, bien teñida o a una banda difícil de precisar. En este último caso, el pareamiento ectópico que ocurre entre los centrómeros de los cromosomas, señala la ubicación del centrómero. Si este pareamiento no se evidencia, se emplea la técnica de coloración de bandas C para localizarlo. Con el fin de clasificar los cromosomas como metacéntricos, submetacéntricos o acrocéntricos se estudian los cromosomas mitóticos del cerebro de la larva, cromosomas donde el centrómero se aprecia con facilidad.

- La presencia o ausencia de cromocentro

Es la región donde se concentran los centrómeros de los cromosomas. El cromocentro no es tan común en este grupo de animales como si lo es en las especies del género *Drosophila*.

- La presencia de inversiones fijas o interespecíficas.

- La presencia y frecuencia de polimorfismos cromosómicos intraespecíficos (inversiones flotantes, heterobandas, expresión de bandas).

Las inversiones implican alteraciones en el orden de los genes. Generalmente se forman cuando ocurren dos rompimientos en un cromosoma y el segmento roto se inserta en el mismo lugar pero en posición invertida. Las inversiones que no incluyen el centrómero se llaman paracéntricas y las que lo incluyen pericéntricas. Las inversiones pueden ocurrir en un cromosoma o en los dos cromosomas homólogos. En el primer caso se tiene una inversión heterocigótica que en los cromosomas politénicos se puede notar como un lazo de inversión.

Las inversiones se numeran independientemente de acuerdo con el brazo en el cual ocurren y con el orden de su descubrimiento. Estas pueden ser: inversiones sobrepuestas, en tandem e incluidas, independientes o relacionadas con el segmento sexual y se señalan, de acuerdo con su característica, de la siguiente manera:

Inversiones fijas = subrayadas = IS - 3

Inversiones sobrepuestas separadas por una coma = IS-1, 2



Inversiones en tandem e incluidas, separadas por un punto = IS-1.2

Inversiones independientes separadas por un signo + = IS-1 + 4.

- La diferenciación estructural del segmento determinante del sexo

En simúlidos no existe un cromosoma sexual. Se cree que el sexo es determinado por un locus simple o al menos por una porción muy corta del cromosoma, siendo los machos, en la mayoría de los casos, el sexo heterogamético. El segmento puede situarse en cualquier brazo y parece obedecer a un sistema de transposon (Brockhouse, 1985). Los transposones son esencialmente gimnastas genéticos, son segmentos pequeños de ADN capaces de saltar de un cromosoma a otro.

- Y por último, el grado de asinapsamiento entre los cromosomas homólogos.

La presencia de individuos heterocigotos, es decir, con regiones amplias asinapsadas, confirma la hibridización de especies y la ausencia, entre poblaciones simpátricas, asegura el aislamiento reproductivo y por lo tanto reafirma la existencia de verdaderas especies. Una de las maneras más seguras para demostrar el verdadero aislamiento reproductivo entre las especies crípticas es a través de los cruces entre ellas cuando se tienen las especies colonizadas en el laboratorio, condición no alcanzada con relativo éxito hasta la fecha en los simúlidos.

#### Utilidad de los estudios de los cromosomas politénicos

Al tener en cuenta los datos morfológicos y las características de los cromosomas politénicos y examinar las variaciones dentro de la población analizada pueden definirse las citoespecies o especies crípticas dentro de la morfoespecie estudiada. Por lo tanto, los estudios citogenéticos basados en el análisis de los cromosomas politénicos revelan la existencia de un complejo de especies y certifican su posición taxonómica.

Es muy probable que cuando se tengan definidas las especies crípticas, con base en toda la información que arrojan los cromosomas politénicos, estudios intensivos de ellas revelen diferencias morfológicas menores, variaciones en aspectos de distribución geográfica, ciclo de vida, preferencias de hábitat (temperatura del agua, sustrato de adhesión de las larvas), número de generaciones por año, especificidad para la comida de sangre, potencial vectorial y susceptibilidad a parásitos. En simúlidos los resultados morfológicos y citogenéticos deben ser incorporados a la taxonomía.

El análisis de los cromosomas politénicos por otra parte, proporciona ciertos elementos para de-

terminar relaciones evolutivas en un número considerable de especies (Rothfels, 1987) y permite la construcción de filogenias basadas en arreglos secuenciales de los cromosomas. Para realizar un estudio filogenético detallado se requiere muestrear una zona geográfica amplia para ubicar los centros de especiación, determinar si ésta es simpátrica o alopátrica y considerar el papel jugado por el segmento determinante del sexo y los polimorfismos autosómicos (Rothfels y Featherston, 1981). Al tomar en conjunto los datos de distribución y diferenciación genética se cree que la especiación en simúlidos no ocurre a través de divergencia alopátrica adaptativa (Snyder y Linton, 1984).

#### Estudios citotaxonómicos con especies latinoamericanas

Por la importancia que tiene la citotaxonomía en la clasificación de las especies vectores es conveniente hacer un resumen de lo que han hecho los investigadores con especies latinoamericanas.

- La morfoespecie *Simulium ochraceum*, vector de la *Onchocerca volvulus* en América Central, está constituida en Guatemala por tres citoespecies denominadas A, B y C (Hirai y Uemoto, 1983). La especie A presenta a su vez tres citotipos: a, b y c siendo la citoespecie "c" la importante en la transmisión de *Onchocerca volvulus* (Hirai, 1985; Hirai et al., 1987).
- El estudio citotaxonómico de la morfoespecie *Simulium metallicum*, principal vector de *Onchocerca volvulus* en la zona norte de Venezuela (Lewis e Ibáñez de Aldecoa, 1962) y vector secundario en Guatemala, se inició en Guatemala con el trabajo de Hirai y Uemoto en 1984. Ellos diferenciaron dos especies crípticas: *S. metallicum A* y *S. metallicum B*. con base en la localización de la región organizadora nucleolar y en el bandeamiento C de los cromosomas (Hirai, 1983, 1985, 1987a, b). En *S. metallicum A* la región organizadora nucleolar está situada en el brazo corto del cromosoma II y la región centromérica está formada por una banda punteada. En *S. metallicum B* la región organizadora nucleolar se ubica en el brazo corto del cromosoma I y la región centromérica corresponde a una banda intensa y oscura, citotipo donde los centrómeros tienden a formar un pseudocromocentro.

Las investigaciones de Hirai (1985, 1987b) con *S. metallicum* de Venezuela revelaron que todos corresponden al citotipo. *S. metallicum A* por portar la región organizadora nucleolar en la sección 54 del brazo corto del cromosoma II. Al efectuar el análisis banda por banda de los cromosomas politénicos y comparar el mapa cromosómico con *S. metallicum A* se evidenciaron dos citoespecies diferentes, *S. metallicum D* y *S. metallicum E*:

Citoespecie	Inversiones fijas	Segmento sexual	Polimorfismo autosómico (frec.)
<i>S. metallicum</i> D	IL-A	X1=IIL-B	IS-A(0.07-0.18)
	IL-B	X2=IIL-B+A	IIL-B, C (0.02)
	IL-C.D.+E.	Yo= standard	IIL-E (0.02)
	IIIL-A		IIIL-C (0.02)
<i>S. metallicum</i> E	IL-A	Xo= standard	IS-A (0.07-0.18)
	IL-B	Yo= standard	IIIS-A (0.03)
	IL-C. D + E		IIIS-B (0.02)
	IIIL-A		

senta cromosomas sexuales diferenciados ni polimorfismo autosómico.

De estas tres formas, la *Cayapa* es la que está incriminada directamente en la transmisión de *Onchocerca volvulus* en el Ecuador (Shelley et al., 1986).

El estudio de esta morfoespecie, encontrada en países limítrofes, tiene gran importancia para Colombia por ser el único vector de *Onchocerca volvulus* en el país.

#### El equipo de trabajo y los estudios colombianos

Antes de comentar los resultados globales obtenidos dentro del Programa de Investigación "Biología de los Simúlidos de Colombia" considero procedente dar a conocer los nombres de quienes han trabajado en el Programa de Investigación titulado "Biología de los simúlidos de Colombia" e integran actualmente el "Grupo de Simúlidos" de la Universidad Nacional de Colombia: las Biólogas Martha Lucía Bueno y Ligia Moncada quienes trabajaron en el inventario específico de los simúlidos de la región de La Calera y por fortuna continúan en la línea de investigación, los estudiantes de la carrera de Biología: Jairo Campos, Claudia Moreno, Rafael Miranda, Libia Hernández, Xatli Martínez, Antonio Mejía y Victoria Acero quienes preparan sus trabajos de grado, bajo mi dirección, con los simúlidos de la región de Chisacá, Usme, Cundinamarca. A ellos debo añadir los nombres de los biólogos Sofía Duque, Helena Moreno y Orlando Torres quienes trabajaron en etapas previas del programa de investigación pero que no toman parte hoy en el estudio de los simúlidos de Chisacá. La intervención de todos ellos ha sido muy activa y su aporte es digno de mencionar.

En el Instituto Nacional de Salud al iniciar en 1975 el estudio de los simúlidos de Colombia, motivados sólo por la importancia médica de ellos, se seleccionó un sitio de trabajo cercano a Bogotá para conocerlos, para estudiar su morfología, para evidenciar su variación, estandarizar técnicas de montaje e iniciar una colección. Se decidió levantar el inventario específico de la región de La Calera, Río Teusacá, Cundinamarca, donde se encontraron 7 especies: 4 del género *Simulium*: *S. ignescens*, *S. schmidtummi*, *S. muiscorum* y *S. sp* y 3 del género *Gigantodax*: *G. ortizi*, *G. cervicornis* y *G. wygodzinskyi*, dos de ellas descritas por nosotros y cuyos nombres fueron dados en honor a los muiscas y al doctor Wygodzinsky, conocedor de nuestros simúlidos.

En el estudio morfotaxonomico se presentaron dos situaciones difíciles: La primera relacionada con la morfoespecie *S. ignescens*, cuyas larvas y pupas no mostraron diferencias morfológicas notorias pero los adultos exhibieron variación en el co-

— *Simulium oyapockense*, morfoespecie antropofílica muy común en algunas regiones de Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guayanas y Venezuela, es la especie vectora de *Onchocerca volvulus* en el sur de Venezuela y en Brasil. Es un complejo de dos especies crípticas, la forma Manabi y la forma Berm Querer (Procunier et al., 1987).

— *Simulium exiguum*, principal vector de *Onchocerca volvulus* en el Ecuador (Shelley y Arzube, 1985), único vector en Colombia (Tidwell et al., 1980b) y vector esporádico en el norte de Venezuela (Lewis e Ibáñez de Aldecoa, 1962; Duke, 1970), es una morfoespecie que presenta grandes variaciones en su comportamiento, capacidad vectorial, actividad de picar y preferencias por hábitats determinados, condiciones que muy probablemente están relacionadas con la existencia de diferentes citotipos (Shelley, 1988). Procunier et al., (1985) trabajando con material proveniente de varias regiones de Ecuador demostraron la presencia de tres especies crípticas dentro de la morfoespecie con base en las variaciones que presentó el cromosoma IIL:

*Forma Cayapa*: considerada como la forma standar, es una especie monomórfica, sin cromosomas sexuales diferenciados y sin polimorfismo autosómico.

*Forma Aguarico*: Difiere de la forma anterior por dos inversiones fijas, incluidas IIL-3.4 que involucran los marcadores parabalbiani y banda gris, por dos inversiones ligadas al sexo: IIL-1 = Y1 y IIL-1, IIS-2 = Y2 y por 7 inversiones flotantes con frecuencias variables:

IL-1 (54.3%), IL-2 (13%). IIS-1 (54.1%), IIS-3 (4.3%), IIL-2 (13%), IIIS-1 (9.5%), IIIL-1 (17.4%).

Las formas *Cayapa* y *Aguarico* son simpátricas, sin embargo, no se observó ningún ejemplar que indicara hibridización entre las dos, situación que refuerza el aislamiento reproductivo entre ellas.

*Forma Bucay*: Difiere de la forma *Cayapa* por la presencia de dos inversiones en Tandem IIL5+6 que involucran al marcador parabalbiani, no pre-

lor del mesonoto, tanto en intensidad como en extensión del dibujo dorsal del mismo y en la pigmentación de las patas. La segunda con la morfoespecie *S. muiscorum* donde los adultos poseían tamaños diferentes. Al tener presente la frecuencia de especies crípticas en los simúlidos, se decidió hacer, con Sofía Duque y Helena Moreno, el estudio de los cromosomas politénicos de estas dos especies pensando que tanto *S. ignescens* como *S. muiscorum* eran complejos de especies.

— *Simulium ignescens* Roubaud, 1906

Al examinar las preparaciones y fotografías de los cromosomas politénicos de las larvas cuyo histoblasto presentaba 10 filamentos branquiales, característica propia de *S. ignescens*, se evidenciaron rasgos muy sobresalientes que indicaron la presencia de, por lo menos, dos citoespecies dentro de esta morfoespecie. Estas características fueron: La morfología de la región centromérica, la posición de la RON y la ubicación del anillo del Balbiani.

Al llevar a cabo el análisis banda por banda de los diferentes brazos de los cromosomas se evidenció que las dos citoespecies poseen la misma secuencia de bandas en IS, IL, IIIS pero difieren en IIS, IIL y III L por la presencia de algunas inversiones y el cambio de posición de varios marcadores (Fig. 1).

*S. ignescens* se caracterizó por poseer centrómeros débiles, por llevar la RON en IIIS y el Anillo de Balbiani en IIS distal al centrómero. Igualmente, presentó dos polimorfismos en IIS: una inversión subterminal, parcialmente ligada al sexo, que produce un cambio en la posición del Anillo de Balbiani denominada IIS-1 y una heterobanda, no relacionada con el sexo. En IIL presentó una inversión: IIL-1. En III S mostró 5 inversiones flotantes intraespecíficas nombradas III S-1, III S-2, III S-3, III S-4 y III S-5.

La otra citoespecie, denominada *Simulium* "C" se definió por poseer los centrómeros conspi-

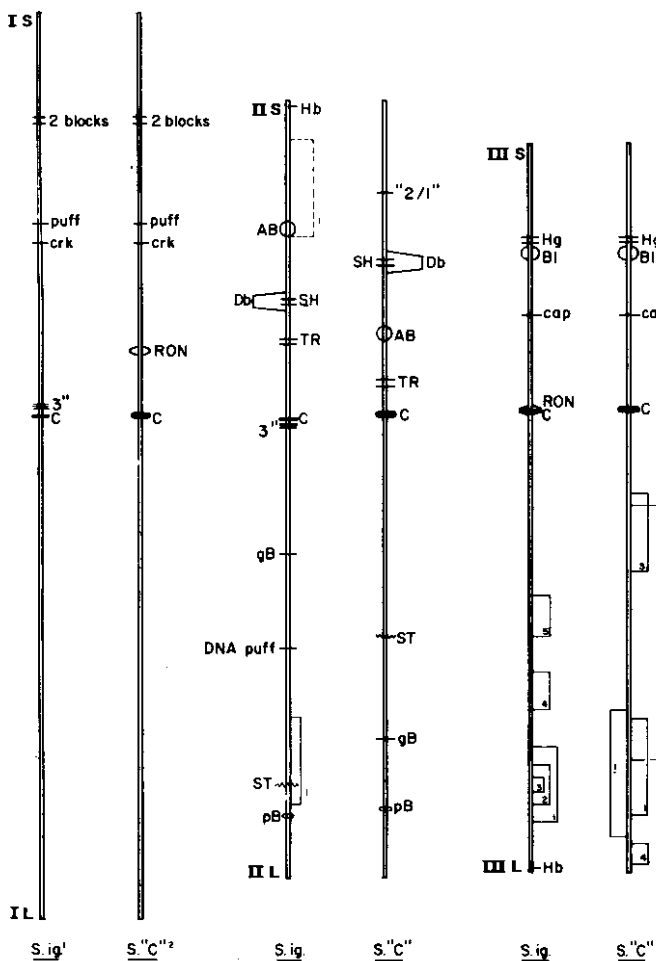


Figura 1. Comparación de los cromosomas I, II y III de *S. ignescens* y *S.* "C". Los paréntesis a la derecha indican inversiones flotantes; a la izquierda inversiones fijas. El paréntesis punteado indica la inversión parcialmente ligada al sexo. AB = anillo de Balbiani. BI = ampolla. C = centrómero. c. y s. = tasa y platillo. cap. = cápsula. crk = grieta. Db = doble burbuja. gB = banda gris. Hb = heterobanda. Hg = grupo pesado. pB = parabalbiani. RON = región organizadora nucleolar. SH = shoestring. ST = sawtooth. TR = trapezoide.

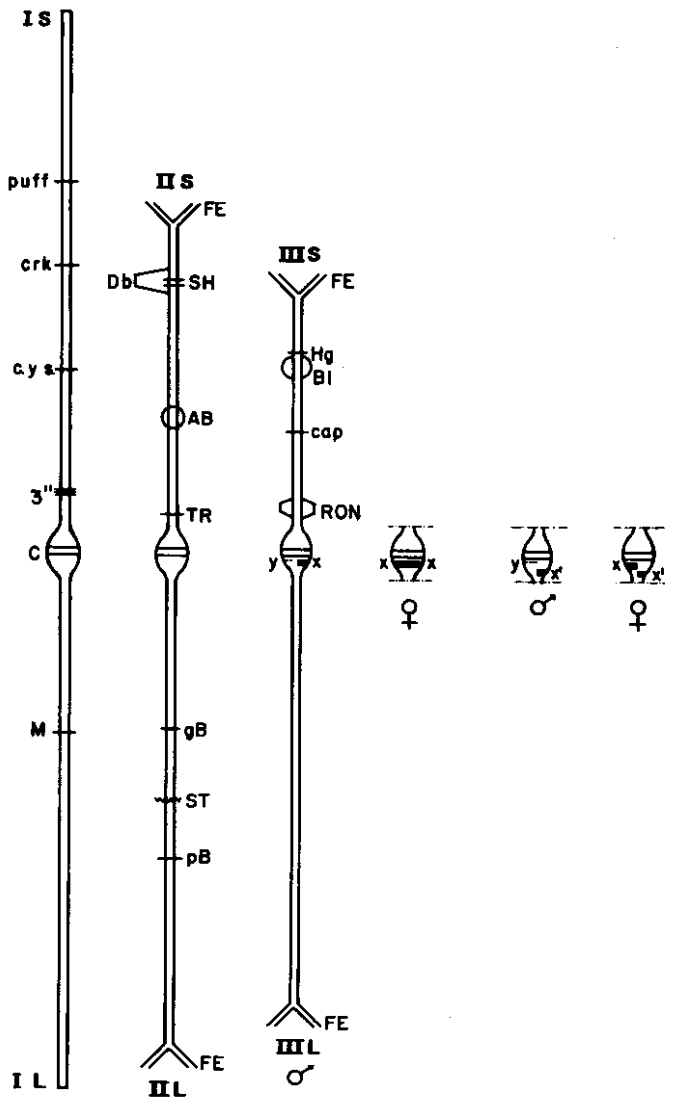


Figura 2. Representación gráfica del complemento cromosómico de *Simulium muiscorum*. AB = anillo de Balbiani. BI = ampolla. C = centrómero. c. y s. = tasa y platillo. cap. = cápsula. crk = grieta. Db = doble burbuja. FE = telómero festoneado. gB = banda gris. Hg = grupo pesado. pB = parabalbiani. RON = región organizadora nucleolar. SH = cordón de zapato. ST = diente de sierra. TR = trapezoide. M = marcador.

cuos, la RON en IS, el Anillo de Balbiani en IIS pero proximal al centrómero, una inversión fija en III L llamada III L-1 y 4 inversiones flotantes en III L conocidas como III L-C1, III L-C2, III L-C3 y III L-C4 (Duque et al., 1988).

Estos criterios sirvieron para identificar dos citoespecies: *S. ignescens* y *Simulium* "C". La citoespecie llamada *Simulium* "C" es una especie nueva y su descripción está en proceso de elaboración actualmente.

— *Simulium muiscorum* Bueno, Moncada y Muñoz de Hoyos, 1979.

Al analizar las fotografías de los cromosomas politénicos de las larvas que poseían un histoblasto constituido por 12 filamentos branquiales, rasgo propio de *S. muiscorum*, se encontró una inversión III L-1, paracéntrica, flotante o intraespecífica, que involucra el segmento diferencial del sexo (Fig. 2).

Este segmento se identificó como una heterobanda, proximal al centrómero, homocigótica en hembras y heterocigótica en machos.

En este caso, los resultados logrados llevaron a concluir que *S. muiscorum* de la región de La Calera, por lo pronto, debe ser considerada como una morfoespecie (Moreno, 1982).

### Conclusiones

El estudio minucioso de los cromosomas politénicos de las glándulas salivares de las larvas de los simúlidos es una herramienta valiosa en la taxonomía para registrar las especies crípticas dentro de una morfoespecie.

Considerando que muchas de las morfoespecies constituyen complejos de especies gemelas (morfológicamente similares) los simúlidos no pueden identificarse solamente por métodos taxonómicos convencionales.

Se recomienda que las descripciones taxonómicas incluyan, en lo posible, referencias citológicas y estén sustentadas con láminas y fotografías de los cromosomas politénicos.

### BIBLIOGRAFIA

- AMMERMANN, D. 1968. Synthese und abbau der nucleinsäuren während der entwicklung des macronukleus von *Stylonychia mytilus* (Protozoa, Ciliate). *Chromosoma* 25: 107-120.
- BARRETO, P., TRAPIDO, H. & V. H. LEE. 1970. Onchocerciasis in Colombia. Entomologic findings in the first observed focus. *Am. J. Trop. Med. Hugg.*, 19: 837-841.
- BEERMANN, W. 1952. Chromomerenkonstanz und spezifische modifikationen der chromosomen-struktur in der entwicklung und organdifferenzierung von *Chironomus tentans*. *Chromosoma* 5: 139-198.
- BROCKHOUSE, C. 1985. Sibling species and sex chromosomes in *Eusimulium vernum* (Diptera: Simuliidae). *Can. J. Zool.* 63: 2145-2161.
- BUENO, M.L., MONCADA, L. & P. MUÑOZ DE HOYOS. 1979. Simuliidae (Insecta: Diptera) de Colombia. I. Nueva especie de *Simulium* (Hemicnetha). *Caldasia* 12 (60): 581-594.
- CARLSON, D.A. & J.F. WALSH. 1981. Identification of two West African blackflies (Diptera: Simuliidae) of the *Simulium damnosum* species complex by analysis of cuticular paraffins. *Acta tropica* 38: 235-239.
- CASSAGNAU, P. 1971. Les chromosomes salivaires polytenes chez *Bilobella grassei* (Denis) (Collemboles: Neanuridae). *Chromosoma* 35: 57-83.
- CROSSKEY, R.W. 1981. Simulii taxonomy - the contemporary scene: 3-18. In *Blackflies: The future for biological methods in integrated control*. Ed. M. Laird. Academic Press. New York and London. xii + 399 pp.
- 1987. Part VIII. Black fly species of the world. 32. An annotated checklist of the world blackflies (Diptera: Simuliidae). In *Black Flies: Ecology, Population Management, and Annotated World list*. Eds, Chung, KE and Merrit, R.W. The Pennsylvania State University. USA: XV + 528 pp.
- DUKE, B.O.L. 1970. *Onchocerca-Simulium* complex. VI. Experimental studies on the transmission of Venezuela and West African strains of *Onchocerca volvulus* by *Simulium metallicum* and *Simulium exiguum* in Venezuela. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology* 64: 421-431.
- DUNBAR, R.W. 1958. The salivary gland chromosomes of two sibling species of black flies included in *Eusimulium aureum* Fries. *Can. J. Zool.*, 36: 23-44.
- DUQUE, S. 1980. Estudio citogenético de *Simulium ignescens* Roubaud, 1906. Trabajo de Grado. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia.
- DUQUE, S., MUÑOZ DE HOYOS, P. & K.H. ROTHFELS. 1988. The polytene chromosomes of *Simulium* (Ectemnaspis) *ignescens* Roubaud and the related species *Simulium* "C", both from Colombia. *Can. J. Zool.*, 66: 303-309.
- HEITZ, E. & H. BAUER. 1933. Beweise für die chromosomen natur der kernschleifen in den knäuelkernen von *Bibio hortulanus*. *IZ. Zellforsch* 17: 68-82.
- HIRAI, H. 1983. A cytogenetic study of *Simulium metallicum* obtained from Guatemala and Venezuela. In a Comparative study on onchocerciasis between South and Central Americas. ed. by Tada, I. Shimoda Printing & Co. Ltda., pp. 66-67.

- . 1985. The salivary gland chromosomes of *Simulium metallicum* Bellardi from northern Venezuela. In a Comparative study on onchocerciasis between South and Central Americas. Ed. I. Tada. Shimoda Printing Co. Ltd., Kumamoto. pp. 66-73.
- . 1987a. C-banding patterns in polytene chromosomes of *Simulium metallicum* complexes A and B. In a Comparative study on onchocerciasis between South and Central Americas. Ed. I. Tada. Shimoda Printing Co. Ltd., Kumamoto, pp. 39-47.
- . 1987b. Cytotype of *Simulium metallicum* in Miranda, an endemic area in northern Venezuela, for onchocerciasis. In a Comparative study on onchocerciasis between South and Central Americas. Ed. I. Tada. Shimoda Printing Co. Ltd., Kumamoto. pp. 48-52.
- HIRAI, H. & K. UEMOTO. 1983. The analysis of salivary gland chromosomes of *Simulium ochraceum* from Guatemala and México. Jpn. J. Sanit. Zool., 34: 120.
- . 1984. The polytene chromosome analysis in *Simulium metallicum* complex from Guatemala. Jpn. J. Sanit. Zool. 35: 188.
- HIRAI, H., UEMOTO, K. & J. O. OCHOA. 1987. Polytene chromosome polymorphisms of *Simulium ochraceum* Walker (Diptera: Simuliidae) the main vector for Central American onchocerciasis. Am. J. Trop. Med. Hyg. (en prensa).
- LEWIS, D.J. & R. IBAÑEZ DE ALDECOA. 1962. Simuliidae and their relation to onchocerciasis in Northern Venezuela. Bull. Wld. Hlth. Org. 27: 449-464.
- LITTLE, M.D. & A.D'ALESSANDRO. 1971. Oncocercosis en Colombia. Hallazgos Parasitológicos en el Primer foco observado. Acta Méd. Valle II: 49-54.
- MONCADA, L. & M.L. BUENO. 1977. Inventario específico y algunos aspectos biológicos de los Simúlidos del Río Teusacá. Trabajo de Grado. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia.
- MONCADA, L., MUÑOZ DE HOYOS, P. & M.L. BUENO. 1980. Simuliidae (Insecta: Diptera) de Colombia. III. Descripción de una nueva especie de *Gigantodax* Enderlein, 1925, *Caldasia* 13 (62): 301-311.
- MORENO, C.H. 1982. Estudio citogenético de *Simulium* (Hemictetha) *muiscorum* Bueno, Moncada y Muñoz de Hoyos, 1979. Trabajo de Grado. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia.
- MUÑOZ DE HOYOS, P., BUENO, M.L. & L. MONCADA. 1982. Simuliidae (Insecta: Diptera) de Colombia. II. Especies de Simúlidos registradas en Colombia. *Scientiae* 1 (2): 141-146.
- . 1984. Simuliidae (Insecta: Diptera) de Colombia. IV. Clave gráfica para la identificación de los Simúlidos de la Región de La Calera, Cundinamarca. *Biomédica* 4: 14-24.
- NAGL, W. 1969. Puffing of polytene chromosom in a plant (*Phaseolus vulgaris*). *Naturwissen-schaften* 56: 221-222.
- PAINTER, T.S. 1934. Salivary chromosomes and the attack on the gene. *J. Hered.* 25: 465-476.
- PELLING, C. 1964. Ribonukleinsäure-synthese des riesen-chromosomen autoradiographische un tersuchungen an *Chironomus tentans* Chromosoma 15: 71-122.
- PETROVA, N.A. 1972. Kariotipicheskie osobennosti Karelskoji moshkis is roda *Cnephia*. *Tsitologiya* 14: 769-773.
- PROCUNIER, W.S., SHELLEY, A.J. & M. ARZUBE. 1985. Sibling species of *Simulium exiguum* (Diptera: Simuliidae), the primary vector of onchocerciasis in Ecuador. *Rev. Ecuat. Hig. Med. Trop.* 35 (2): 49-59.
- . 1987. Cytological identification of *Simulium oyapockense* Manabi form (Diptera: Simuliidae). A potential vector of onchocerciasis in Ecuador. *Trop. Med. Parasit.* 38: 71.
- ROTHFELS, K.H. 1979. Cytotaxonomy of black flies (Simuliidae). *Ann. Rev. Entomol.* 24: 507-539.
- . 1981a. Cytotaxonomy: Principles and their application to some northern species complexes in *Simulium*: 19-29. In *Blackflies: The future for biological methods in integrated control*. Ed. M. Laird. Academic Press. New York and London xii + 399 pp.
- . 1981b. Cytological approaches to the study of blackfly systematics and evolution. In *Application of genetics and cytology in insect systematics and evolution*. Edited by M.W. Stock. Proceedings of a symposium, National Meeting of the Entomological Society of América, Atlanta, GA, December 1-2, 1980. Forest, Wildlife and Range Experiment Station, University of Idaho, Moscow, ID. pp. 67-83.
- . 1987. Cytological approaches to black fly taxonomy: 39-52. In *Black flies: Ecology, Population management and annotated world list*. Eds. Chung, K.E. and Merritt. The Pennsylvania State University. USA. xv. 528 pp.
- ROTHFELS, K.H. & D.W. FEATHERSTON. 1981. The population structure of *Simulium vittatum*. the IIL-1 and IS-7 sibling species. *Can. J. Zool.* 59:1857-1883.
- SHELLEY, A.J. 1988. Vector aspects of the epidemiology of onchocerciasis in Latin América. *Ann. Rev. Entomol.* 30: 337-366.
- SHELLEY, A.J. & M. ARZUBE. 1985. Studies on the biology of Simuliidae (Diptera) at the Santiago onchocerciasis focus in Ecuador, with special reference to the vectors and disease transmission. *Transaction of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 79: 328-338.
- SHELLEY, A.J., PROCUNIER, W.S. & M. ARZUBE. 1986. Direct incrimination of *Simulium exiguum* Cayapa form as a vector of *Onchocerca volvulus* in Ecuador. *Transaction of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 80: 845.
- SNYDER, T.P. & M.C. LINTON, 1984. Population structure in blackflies: allozymic and morphological estimates for *Prosimulium mixtum* and *P. fuscum* (Diptera: Simuliidae). *Evolution* 38: 942-956.
- TESHIMA, I. 1972. DNA-DNA hybridization in blackflies (Diptera: Simuliidae). *Can. J. Zool.* 50: 931-940.
- TIDWELL, M.A., TIDWELL, M. & P. MUÑOZ DE HOYOS. 1980a. Development of *Mansonella ozzardi* in a black Fly species of the *Simulium sanguineum* group from eastern Vaupés, Colombia. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 29: 1209-1214.
- TIDWELL, M.A., TIDWELL, M., MUÑOZ DE HOYOS, P. & A. CORREDOR. 1980b. *Simulium exiguum* the vector of *Onchocerca volvulus* on the Rio Micay Colombia. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 29: 377-381.
- TIDWELL, M.A., TIDWELL, M., MUÑOZ DE HOYOS, P., CORREDOR, A. & P. BARRETO. 1980c. Vectores de *Onchocerca volvulus* y *Mansonella ozzardi* en Colombia. *Colombia Medica* 11: 119-127.
- WYGODZINSKY, P. 1953. Sobre algunos simúlidos de los países andinos (Diptera). *Ann. Inst. Med. Reg. Univ. Nac. Tucumán* 3 (3): 321-337.

- 1971. Descriptions and redescrptions of species of the blackfly genus *Simulium* from the northern Andes (Simuliidae: Diptera). American Museum Novitates (2447): 1-38.
- 1973a. On a species of *Simulium* (*Ectemnaspis*) from the northeaster United States (Diptera). J. New York. Ent. Soc. 81: 10-12.
- 1973b. A Blackfly of the subgenus *Simulium* (*Psaroniocompsa*) (Simuliidae : Diptera) from the high Andes of Colombia American Museum Novitates (2513) 1-11.
- 1973c. Diagnoses of new species of *Gigantodax* Enderlein (Simuliidae: Diptera) from the northern Andes. J. New York Entomol. Soc. 81 (4): 243-246.
- WYGODZINSKY, P. & S. COSCARON. 1982. Description of three unusual species of the black fly subgenus *Simulium* (*Ectemnaspis*) from the Andes of Colombia (Diptera: Simuliidae). American Museum Novitates 2736: 1-13.

# LA CONVERGENCIA DE PLACAS EN EL NOROCCIDENTE SURAMERICANO Y EL ORIGEN DEL NIDO DE BUCARAMANGA\*

por

Carlos E. Coral-Gómez\*\*

## Resumen

Coral, C.E.: La convergencia de placas en el Noroccidente Suramericano y el origen del Nido de Bucaramanga. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 521-529, 1990. ISSN 0370-3908.

El "Nido de Bucaramanga" corresponde a una de las regiones más sismoactivas del mundo. Se presenta la hipótesis de que el "Nido" apareció como consecuencia de una alta concentración de esfuerzos causada por la convergencia hacia el Bloque Andino de las placas litosféricas mayores de la región (Caribe, Nazca y Suramérica). La existencia del "nido" se explica no como un caso particular o aislado de subducción, sino como una manifestación propia de la sismicidad derivada de la convergencia de placas.

## Abstract

Due to its characteristics of seismicity, the "Bucaramanga Earthquake Nest" (BEN), is considered one of the most seismoactive regions not only of South America, but of the entire world. Although there exist diverse explanations of the "BEN" connected with the subduction of a plate, or segment of it, the knowledge of its origin and related geodynamic processes remain an open question. The results recently obtained by the author suggest the hypothesis according to which, the "BEN" could appear as a consequence of a high concentration of tectonic stress caused by the convergence toward the Andean Block of the three major lithospheric plates of the region: Caribbean, Nazca and South America. In the frame of this hypothesis, the occurrence of the "BEN" could not be considered as an isolate or particular case of subduction, but as the natural manifestation of seismicity derived from the convergence of plates.

---

\* Trabajo ganador del "Premio Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 1987" convocado en el área de Ciencias de la Tierra. Se publica la primera parte; en una próxima entrega se concluirá su publicación.

\*\* Geofísico (Ph. D.) Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, A.A. 14490, Bogotá, D.E.

## Introducción

... Es preferible mantener una hipótesis que en el futuro pueda resultar errónea, a no mantener ninguna.

D. Mendeleiev.

Es de común conocimiento que el proceso sísmico de una región está determinado por la forma en que se desarrollan y combinan los procesos de acumulación continua de esfuerzos tectónicos en el interior de la Corteza terrestre y el Manto superior, y la liberación de éstos en el momento del terremoto. Dicho de otra manera, el transcurso del proceso sísmico de una región dada está definido completamente por la naturaleza de los campos de esfuerzos elásticos presentes en ella. Los resultados de múltiples investigaciones muestran que el proceso de aparición y distribución de los esfuerzos elásticos en el cuerpo de nuestro planeta es demasiado complicado y depende de una gran cantidad de factores. Se ha establecido particularmente, que la estructura geologo-tectónica de la región y las propiedades fisicomecánicas de las rocas que la conforman, desempeñan un papel muy importante en la formación y distribución de los campos de esfuerzos elásticos que originan los terremotos. De lo anterior se desprende que para resolver con éxito el problema del pronóstico de terremotos tanto en su forma operativa o "estratégica", a corto tiempo, como en su forma cartográfica o "zonación sísmica", a largo plazo; no es suficiente estudiar sólo la variación de diferentes parámetros sísmicos en la superficie terrestre, sino que se hace necesario, además, estudiar la estructura del medio donde se suceden los fenómenos sísmicos y su interrelación con los diferentes bloques o estructuras tectónicas que lo rodean y que conllevan a la acumulación de la energía elástica, cuya liberación repentina produce los terremotos.

Aunque hasta los momentos actuales se ha acumulado una cantidad apreciable de datos y existen algunas ideas acerca de la sismicidad y riesgo sísmico en Colombia, aún no se han estudiado suficientemente los procesos físicos que ocurren en los focos de los terremotos colombianos, ni tampoco se han analizado las relaciones que pueden existir entre los focos sísmicos y las características específicas de la estructura profunda como son la composición, estado de compresión y otras propiedades físicas del medio geológico.

El presente trabajo pretende avanzar un poco en el conocimiento de las principales causas tectono-físicas que originan los terremotos en Colombia. En él se analizan las características particulares de la sismicidad en la región de Santander y se discuten los posibles mecanismos tectónicos que podrían originarla.

## Condiciones profundas de la sismicidad en la región de Santander

El Departamento de Santander es una de las regiones sísmicas más activas del territorio colombiano. En esta región se localizan los focos sísmicos de profundidad intermedia denominados "Nido de Bucaramanga", el cual, por sus características, se hace semejante a las zonas focales del Indo-Kush en Afganistán y de Branchea en los Cárpatos orientales, Rumania. La existencia de este tipo de fuentes sísmicas es un fenómeno aislado en la sismicidad de las regiones continentales no sólo de Suramérica sino del mundo entero.

El área epicentral de Santander se localiza en la falda occidental de la Cordillera Oriental, en una latitud donde las cadenas montañosas que forman los Andes colombianos alcanzan su mayor anchura. Dicha región se caracteriza por el cambio repentino de rumbo, que experimenta la Cordillera Oriental, al variar su orientación de NE a NO. (Fig. 1).

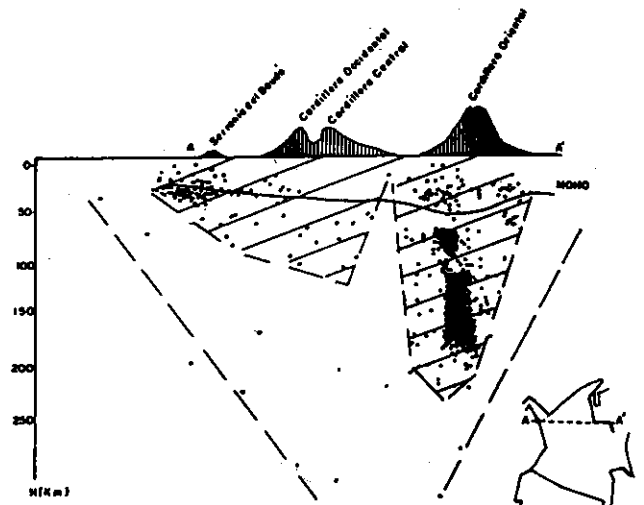
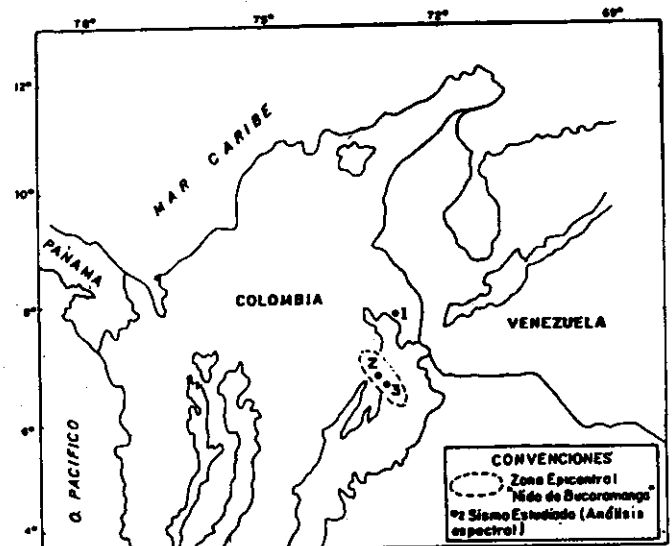


Figura 1. Zona epicentral de la región de Santander (Nido de Bucaramanga) y perfil esquemático de la corteza y el manto y su relación con la sismicidad. (Coral-Gómez 1985b, 1987).



El investigador colombiano Gómez-Padilla (1980), ha notado que la dirección general de la zona sísmica de Santander coincide con la dirección del cauce de los ríos Chicamocha y Sogamoso. Según el mencionado autor, dicha dirección podría estar asociada con cierta zona tectónica de especial importancia dentro de la Cordillera Oriental, ya que precisamente en el lugar en que esta Cordillera cambia su orientación, cerca de las coordenadas 72.3W y 6.5N, empieza la franja sísmica y además, se levanta la cumbre de mayor altura de la Cordillera Oriental: el Pico Ritacuba (5.493 m) en la Sierra Nevada del Cocuy.

El territorio de la zona epicentral alrededor del Nido de Bucaramanga se caracteriza por un alto grado de fracturamiento y múltiples plegamientos y fallas. Además, de las fallas principales existe una serie de fallas de segundo orden que cruzan la región en diferentes direcciones. Paralelamente a la Cordillera Oriental se extienden las principales fallas de la región, conocidas como falla Santa Marta-Bucaramanga y la falla Suárez, con rumbos en dirección Noroeste y Noreste respectivamente. Algunos trabajos de campo realizados recientemente en la región de Bucaramanga han señalado que las fallas Santa Marta-Bucaramanga, Suárez y además las fallas Boyacá-Belén, Gachetá-Chicamocha, Carmen, San Vicente y Salinas muestran actividad tectónica en el cuaternario. Con excepción de la falla Santa Marta-Bucaramanga, todas las fallas nombradas son fallas inversas con desplazamientos en dirección del buzamiento y una posible componente de rumbo sinistral. La falla Santa Marta-Bucaramanga también es inversa pero el desplazamiento principal es de rumbo sinistral (Woodward-Clyde Consultants, 1982).

En el diagrama rosa de fracturas-unidad de la región estudiada (Coral-Gómez, 1987), se ve claramente un prominente máximo en dirección Noreste, el cual corresponde a la dirección general del rumbo de fracturamiento de la región. También se hace visible un máximo de dirección noroeste que coincide con el rumbo de la falla Santa Marta-Bucaramanga.

La zona de mayor actividad sísmica en Santander está limitada a un área relativamente pequeña, cerca de unos 10.000 Km<sup>2</sup>, entre las coordenadas 72.5 - 73.5 W y 6.3 - 7.3 N, aproximadamente (Fig. 1). La distribución de la densidad focal en la región muestra que la gran mayoría de los terremotos con magnitud Ms mayor que 4.0 tiene su origen en una zona de profundidad intermedia entre los 140 y 170 km (Coral-Gómez, 1985a, b). Sólo en el intervalo de tiempo entre 1964 y 1973, la Oficina para la Localización de Epicentros (USA), informó de 180 terremotos con epicentros en esta región y profundidades entre 140 y 175 Km y magnitudes mayores o iguales a 4.2.

Estudios del proceso sísmico temporal (Coral-Gómez, 1985b) han mostrado que la distribución

del número de terremotos en el tiempo no es constante, sino que se observa un crecimiento cuasi-periódico de la actividad sísmica con relación a un cierto nivel promedio. En los terremotos de la litósfera ( $H < 100$  Km), se puede apreciar claramente una agrupación notable en intervalos de tiempo aproximadamente iguales a 4 años, mientras que los terremotos de mayor profundidad ( $H \geq 100$  Km) parecen agruparse en intervalos de 7 a 8 años aproximadamente. Este crecimiento periódico de la sismicidad no se puede considerar como la presencia de premonitores (foreshocks) ni réplicas (aftershocks) de un terremoto mayor, ya que en la región no se registran terremotos de gran magnitud y además el aumento de la sismicidad se prolonga por tiempo bastante largo.

Esta forma de distribución temporal de sismos, con largos períodos de aumento en la frecuencia sísmica, es semejante al tercer tipo en la clasificación de Mogi (1963) o sea, el número de terremotos en la unidad de tiempo crece hasta un máximo, el cual se sostiene durante algún tiempo y luego decrece sin que se presente una "sacudida" fuerte principal.

Los perfiles verticales de la zona sísmica de Santander (Fig. 2) ilustran muy bien la ubicación espacial de los hipocentros aglomerados más continuamente en el intervalo de 120 a 180 Km. Como se ve en los perfiles levantados en diferentes direcciones azimutales, es difícil escoger una dirección concreta de la zona de Benioff, por la cual pudiera sumergirse alguna placa litosférica como se ha propuesto por diferentes autores (Santo, 1969; Dewey, 1962; Isacks, Molnar, 1971; Pennington, 1981). Vale la pena recordar que los citados autores no llegaron a un común criterio acerca de la dirección de subducción y del carácter de interacción entre las placas litosféricas propuestas para esta región. Esta situación contradictoria es, posiblemente, un resultado del análisis incompleto que se ha hecho de la configuración particular de la zona focal que se observa, la cual forma una especie de "cuña", con su vértice en la región del Nido de Bucaramanga.

Los focos más profundos ( $H \geq 100$ ) se separan de los focos corticales por una capa delgada casi asísmica. Además, la mayor porción de energía sísmica se libera de los focos profundos localizados en el Manto superior.

La distribución focal y de energía sísmica liberada según la profundidad, (Fig. 3) ilustra claramente la existencia de dos regiones o capas sísmicas que se diferencian entre sí por la intensidad o rapidez con que liberan la energía elástica acumulada. Así por ejemplo, durante el período de tiempo de 1958 a 1978, de 509 terremotos registrados con magnitud mayor o igual a 3.5, sólo 65, o sea, aproximadamente el 12% de todo el conjunto, tenían profundidad focal menor a 100 Km. También se debe anotar que en dicha zona se registra una gran

cantidad de sismos pequeños, cerca de 300 por mes, cuya profundidad, en la mayoría de los casos, es difícil de encontrar.

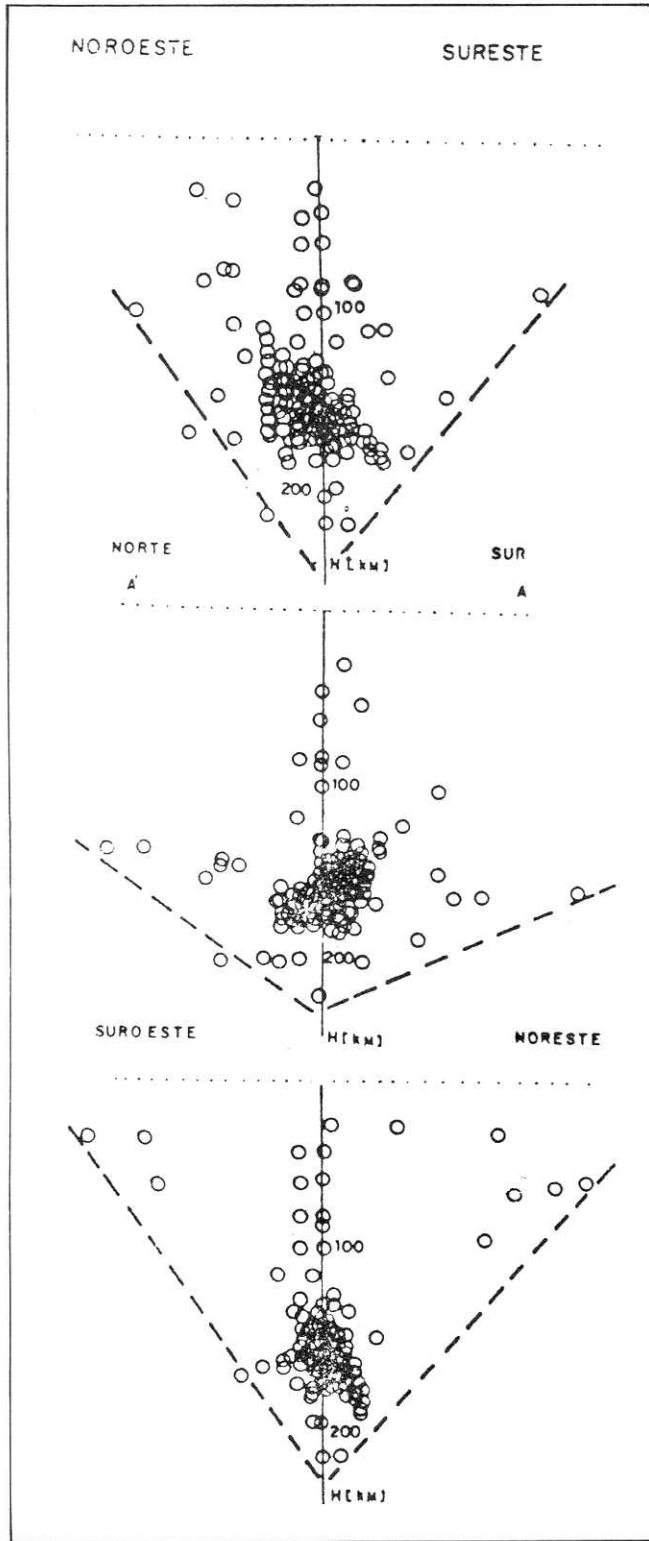


Figura 2. Perfiles verticales de sismicidad en la zona sísmica de Santander.

Este crecimiento anormal de la liberación de energía sísmica con la profundidad que manifiesta una alteración de la regla generalmente observada en la mayoría de las regiones sísmicas del mundo, también se observa en la zona sísmica de Branchea en los Cárpatos Orientales (Karnik, 1971). Es natu-

ral esperar que las propiedades específicas de la estructura de la Corteza y el Manto superior de la zona se encuentren reflejadas en las características particulares de distribución de los focos sísmicos en la región de Santander.

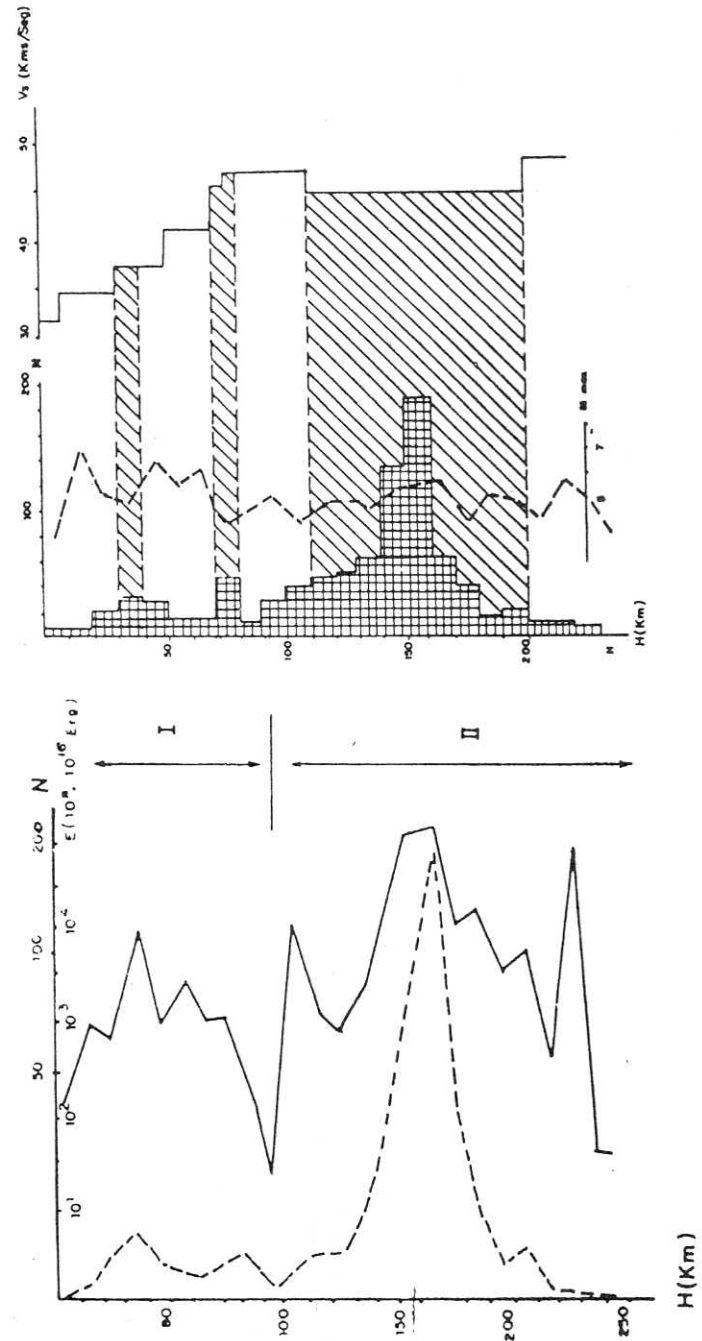


Figura 3. Distribución de la sismicidad y la energía sísmica liberada con la profundidad en la región de Santander y modelo de velocidades en la Cordillera Oriental. (Colar-Gómez, 1985b).

El estudio de la propagación de ondas sísmicas superficiales permitió encontrar la distribución de velocidad de las ondas transversales en el Manto superior para la trayectoria Quito-Bogotá (Leeds, 1977). Los resultados obtenidos indican la existencia de una zona de bajas velocidades a profundidades entre 110-200 Km, dentro de la cual, la disminución en la velocidad de las ondas transversales alcanza 0.2 Km/seg.

**Coral-Gómez** (1985a, b; 1987) ha mostrado que existe cierta correspondencia entre las características de velocidad de la Corteza y del Manto superior con la distribución de la sismicidad en profundidad (Fig. 3). Como se puede observar en la Fig. 3, el "canal de onda" o zona de bajas velocidades del Manto superior en la Cordillera Oriental, le corresponde el máximo de focos sísmicos, como también el máximo de la energía sísmica liberada por los terremotos del Nido de Bucaramanga.

En contraste con lo anterior, **Pennington et al.** (1981), establecieron que la zona sísmica del Nido de Bucaramanga presenta elevados valores del coeficiente de calidad  $Q$ , mayores que 1.000, lo cual es característico de zonas litosféricas rígidas, que transmiten muy bien la energía sísmica. Los autores nombrados (**Pennington et al.**, 1981), también mostraron que los registros sísmicos de focos localizados "encima" del Nido, se diferencian de los registros típicos de terremotos asignados al Nido propiamente dicho. Los sismogramas de terremotos ubicados "dentro" del Nido tienen un carácter más complejo que los sismogramas de los sismos externos a él. Una diferencia análoga en los registros de sismos localizados a diferente profundidad también fue observada por **Shebalin (Dobriev, Shukin, 1974)** en la región sísmica de Branchea en los Cárpatos Orientales. Este hecho parece indicar ante todo, diferencias en la complejidad del proceso sísmico a diferentes profundidades.

Por su parte, el resultado del estudio de parámetros focales mediante análisis espectral (**Coral-Gómez, Sarmiento, 1986**), mostró valores muy bajos en la caída de esfuerzos en los sismos del Nido, lo cual podría indicar que la actividad sísmica se concentra en una zona bastante "frágil", no apta para acumular grandes esfuerzos. Además, el análisis tectonofísico de los mecanismos focales de 4 eventos sísmicos localizados a profundidades del Nido de Bucaramanga (**Coral-Gómez, 1985b, 1987**) muestra soluciones compatibles con esfuerzos compresivos concentrados en la zona.

## Discusión

Las particularidades observadas en el comportamiento del proceso sísmico a diferentes profundidades, así como también la relación de la sismicidad con las propiedades mecánicas de la estructura profunda de la región de Santander, nos inducen a suponer la existencia de ciertas diferencias, tanto laterales como verticales, de las características físicas y de composición de las regiones litosféricas y del Manto que toman parte en la formación de la zona focal.

Investigaciones sísmicas detalladas, dirigidas a estudiar las inhomogeneidades horizontales del Manto superior en algunas regiones sísmicas del Planeta (**Kanamori, 1971; Barazangi, Isacks, 1971; Kuzin, 1972; Vinnik et al., 1974; 1975**) muestran

que las zonas focales de terremotos de intermedia y mayor profundidad, se caracterizan por tener velocidades de ondas sísmicas relativamente altas en comparación con las velocidades bajas del Manto en los bloques adyacentes. Las zonas focales, con las cuales están asociadas los terremotos intermedios, por lo general, se muestran en forma de embudo, o cuña de alta velocidad, con profundidades que van desde las primeras decenas de kilómetros hasta 150 — 200 Km. Este tipo de estructura de zona focal se encuentra especialmente en el Pamir Indo Kush y en los Cárpatos (**Vinnik et al., 1977; Shukin, Liustij, 1981**).

Como se sabe, el Pamir-Indo Kush se presenta como un nudo tectónico muy complejo ubicado en el empalme de una serie de cadenas montañosas del cinturón Alpino-Himalayo, en el Asia Central. Una de las características particulares de esta región es la existencia de una reducida zona de extraordinaria actividad sísmica ubicada en el Manto superior hasta una profundidad de unos 300 Km., la cual se concentra en límites de unos 100 Km. de ancho por unos 300 Km. de largo en dirección NE — SW.

La zonación de velocidades de ondas sísmicas longitudinales en el Manto superior del Pamir-Indo Kush (**Vinnik et al., 1977**), muestra como resultado un bloque interno con elevada velocidad de propagación de las ondas sísmicas, en cuyo borde nororiental se encuentra la región sismoactiva del Manto superior.

Observaciones sismológicas realizadas en Tadjikistán (URSS) muestran que los registros de los terremotos de la zona Pamir-Indo Kush, localizados a profundidades mayores de 70 Km indican altas frecuencias (10—20 Hz). La producción de tan altas frecuencias exige la existencia de altos valores en el factor de calidad mecánica  $Q$  del Manto superior, mientras que por lo general se ha notado que en el Manto superior el factor  $Q$  es bastante bajo. El conjunto de datos análogos obtenidos en las estaciones sismológicas de la India y Pakistán, a partir de los sismos del Indo Kush, también señalan que, a diferencia de la situación observada en las áreas insulares oceánicas, la zona sismoactiva del Indo-Kush está rodeada de una vasta zona de elevado valor de  $Q$ , no menor de 1 000 (Fig. 4) (**Shukin, Liustij, 1981**).

De acuerdo con **Vinnik et al. (1977)**, el bloque "rígido" de alto factor de calidad mecánica, el cual se encuentra rodeado de un material "blando", está sometido a la acción de esfuerzos tectónicos que se concentran en su borde oriental, provocando, de esta manera, la alta sismicidad observada en la zona. Al parecer, los esfuerzos se originan por una compresión horizontal, relacionada, posiblemente, con las principales fuerzas compresionales del Cinturón Himalayo.

Un cuadro semejante se observa en la región de Branchea en los Cárpatos Orientales en Rumania.

Es conocido que en la región donde la estructura montañosa Alpina de los Cárpatos Orientales cambia su orientación de noroeste a suroeste, existe una pequeña área donde se concentran los epicentros de la zona focal de Branchea. Los hipocentros de los terremotos se localizan más comúnmente en el intervalo de 100–150 Km de profundidad, de donde se desprende también, el mayor porcentaje de energía sísmica.

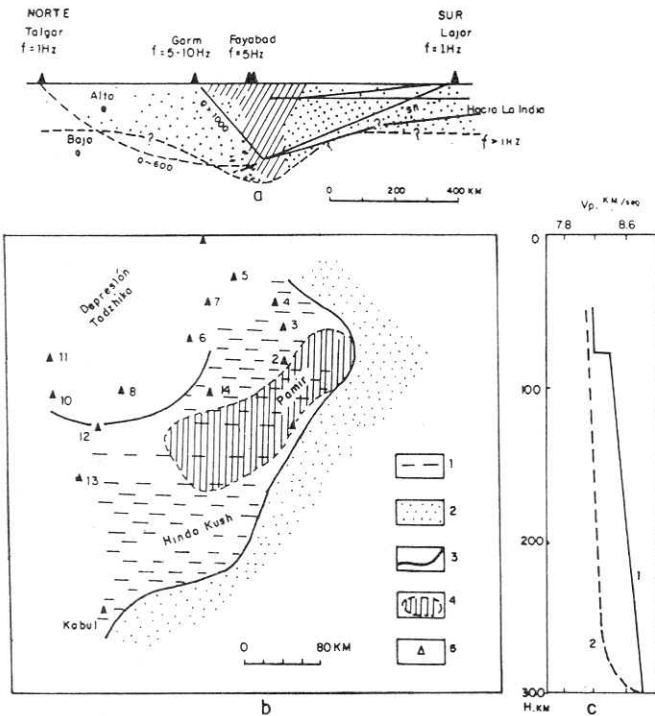


Figura 4. Caracterización de la zona focal del Pamir-Indo Kush. a. Perfil esquemático de la zona de alto factor de calidad Q. b. Inhomogeneidades de velocidad en el Manto. 1. Zona de alta velocidad; 2. Zona de baja velocidad; 3. Límite de bloques; 4. Zona de mayor actividad sísmica; 5. Estaciones sismológicas. c. Perfiles de velocidad para los bloques del manto. 1. Zona focal de alta velocidad; 2. Zona periférica de baja velocidad (Adaptado de Vinnik et al, 1977; Shukin, Liustij, 1981).

Ya en 1965 T. Yosif analizó el problema de la existencia de una capa de bajas velocidades en el Manto superior del territorio rumano. Con base en curvas hodocronas de ondas longitudinales y transversales fueron definidas las velocidades de las ondas sísmicas longitudinales y transversales en el Manto superior de la región, las distribuciones de velocidad obtenidas permitieron establecer la disminución de velocidades a profundidades entre 100–150 Km. Para las ondas P, esta disminución es casi imperceptible y se encuentra en los límites de exactitud de las medidas, pero para las ondas S, se expresa con mayor claridad alcanzando un valor de 0.2 Km/seg (Fig. 5) (Dobrev, Shukin, 1974).

Investigaciones más detalladas acerca de la distribución de velocidades de las ondas sísmicas longitudinales en la zona de Branchea pusieron de manifiesto un efecto de crecimiento de la velocidad de la onda P a profundidades de 100–170 Km. El

valor de velocidad encontrado es semejante a los valores característicos de los bloques litosféricos con estructura de tipo “plataforma” (Shukin, Liustij, 1981).

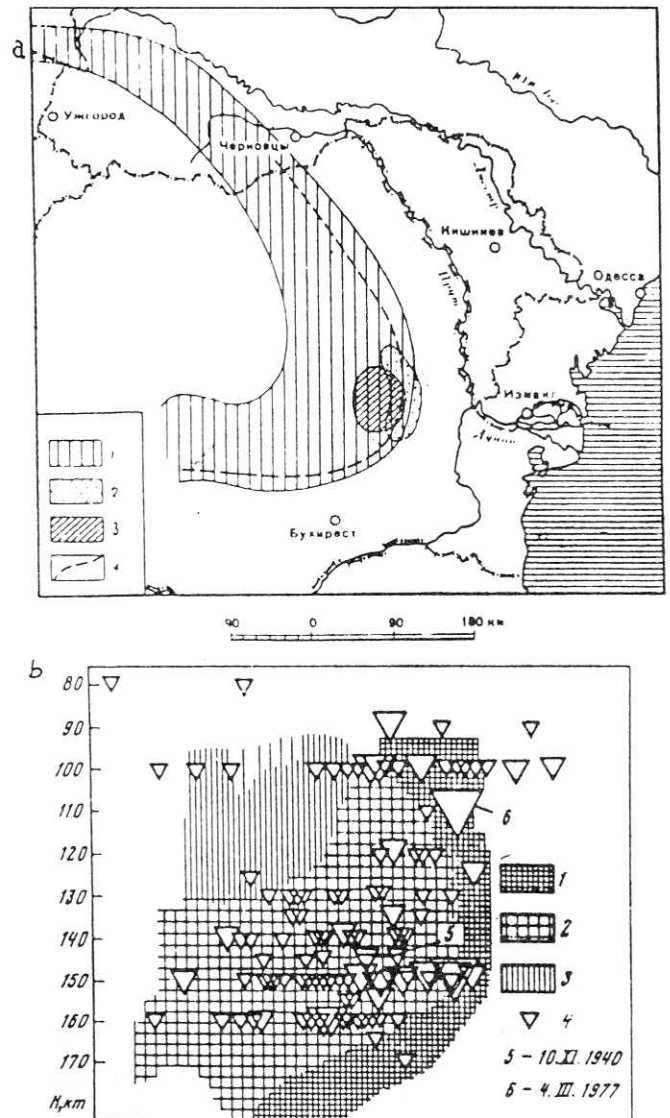


Figura 5. Caracterización de la zona focal branchea. a. Esquema de los principales elementos sismotectónicos. 1. Curvatura de los Cárpatos Orientales; 2. Región de máximo hundimiento del pie de monte Precarpatíco; 3. Zona epicentral de fuertes terremotos de profundidad intermedia; 4. Falla profunda principal. b. Comparación del perfil de velocidad en el Manto (NW – SE) con los focos sísmicos. 1.  $V_p \geq 8.0$  Km/seg; 2.  $7.75 < V_p < 8.0$  Km/seg; 3.  $7.5 < V_p < 7.75$  Km/seg; 4. Focos de terremotos de diferente magnitud; 5. y 6. Terremotos de fecha indicada (Tomado de Kondorskaya et al, 1980).

Al igual que en el Manto del Pamir-Indo Kush, en la zona sísmica del Nido de Bucaramanga también se ha establecido la existencia de elevados valores de Q, mayores que 1 000 para las ondas P. Sin embargo, como lo expresaron Molnar et al. (1976), en el caso de Pamir-Indo Kush, estos altos valores de Q “no reflejan, necesariamente, una lámina delgada que se sumerge en el medio circundante”. Es decir, aunque los valores altos de Q son característicos de la litósfera, la existencia de éstos a profundidades del Manto, no es demostración de una sub-

ducción de litósfera oceánica bajo el continente, sino que más bien, refleja características posiblemente más complejas del medio en estas regiones.

Como se puede apreciar en el Fig. 2, es muy difícil escoger alguna dirección concreta de la zona de Benioff por la cual pudiera sumergirse una supuesta placa litosférica en la región del Nido de Bucaramanga. La zona focal que se observa forma una especie de cuña bastante prolongada, hasta una profundidad de unos 200–220 Km. Al parecer, esta zona que se caracteriza por altos valores de  $Q$ , y es adyacente a la zona de bajas velocidades que se observa en el Manto de la Cordillera Oriental, indica que la litósfera en esta región tiene un espesor supremamente grande, posiblemente no menor a la profundidad focal máxima de los terremotos del Nido de Bucaramanga.

Según se puede apreciar, la semejanza tanto de estructura profunda como de las características del proceso sísmico en la zona focal del Indo-Kush, Branchea y el Nido de Bucaramanga no es una simple casualidad, sino que responde más bien a causas geodinámicas semejantes. Si observamos detalladamente la morfología de estas regiones nos damos cuenta que los focos profundos aparecen en las zonas de curvatura de las estructuras montañosas: Branchea en el arco de los Cárpatos Orientales, Indo-Kush en el arco del Pamir y Suroriente de Afganistán, el Nido de Bucaramanga en el arco de la Cordillera Oriental. Otras regiones de tipo semejante se encuentran en el arco de Gibraltar, en el arco del Tirreno (Calabro-Peloritano) y en otros lugares (Gorshkov, 1984).

Se sabe que uno de los principales factores que definen el origen de los terremotos es la presencia en la litósfera de campos de esfuerzos tectónicos, los cuales aparecen como resultado de diferentes procesos internos. De acuerdo con las ideas actuales, las posibles causas de estos esfuerzos son: Las deformaciones termoelásticas, las cuales aparecen como resultado de las variaciones en el tiempo y el espacio de la temperatura interna de la Tierra; las diferenciaciones de densidad; las corrientes del Manto; el flujo gravitacional de las masas montañosas; etc. (Magnitzky, 1965; Magnitzky, Artiushkov, 1978). Además, como resultado de las investigaciones de Rikunov y sus colaboradores (1979, 1980 a, b) se ha establecido que el medio geológico, bajo la acción de un campo dinámico deformativo puede cambiar el carácter de radiación de la energía sísmica (emisión sísmica).

También existe la suposición de que la interrelación espacio-temporal de los terremotos está relacionada con la aparición de ondas de deformaciones tectónicas que se manifiestan en la migración de terremotos. Hasta los momentos actuales, el fenómeno de migración ha sido confirmado por muchos investigadores (Gubin, 1960; Pustovitenko,

Kamenobrodsky, 1976; y otros). Sin embargo, el mecanismo que lleva a la aparición de las ondas de esfuerzo tectónico todavía no se ha logrado explicar.

Como hemos visto, la distribución temporal, y espacio-temporal de los sismos en la región de Santander es similar al tercer tipo de distribución según la clasificación de Mogi (1963). Según Mogi, esta forma de desarrollo de la sismicidad con variaciones periódicas prolongadas del número de sismos en la unidad de tiempo, es característico de zonas con alto nivel de fracturamiento, donde los esfuerzos ejercidos se concentran en un volumen pequeño, o en zonas muy fracturadas donde los esfuerzos crecen paulatinamente, lo cual conlleva a la formación de dislocaciones locales pequeñas, aún mediante esfuerzos relativamente no muy grandes, sin que se precipite una sacudida o "rompimiento" fuerte principal.

De esta manera, las características de deformación y los resultados del análisis tectonofísico de los mecanismos focales del Nido de Bucaramanga, así como también el alto fracturamiento en la región de Santander y los rasgos particulares de la sucesión espacio-temporal de la sismicidad, nos lleva a concebir la existencia de esfuerzos tectónicos crecientes concentrados en la región del Nido de Bucaramanga, los cuales provocan el proceso de sismicidad observado en esta región.

Todo parece indicar que la sismicidad en la región de Santander aparece en condiciones de compresión subecuatorial (en dirección este-oeste aproximadamente) y es ocasionada por el crecimiento de los esfuerzos tectónicos concentrados en la zona donde la Cordillera Oriental cambia su orientación. El bloque "blando" de bajas velocidades en el Manto de la Cordillera determina la concentración de los esfuerzos en el bloque "rígido", de alto factor de calidad  $Q$ , presente en la zona focal del Nido de Bucaramanga (Fig. 6) (Coral-Gómez, 1985b).

En favor de esta hipótesis hablan los resultados obtenidos, independientemente por M. James (1985), quien analiza el movimiento de las placas de la región al evidenciar una colisión entre la miniplaca del Bloque Andino y la placa Norteamericana desde el mioceno medio. Aunque James estudia sólo la parte más occidental del territorio colombiano como posible zona de colisión, sin considerar el Nido de Bucaramanga, sus resultados muestran un vector atribuible a la fricción de contacto y la deformación interna del Bloque Andino, cuya dirección  $N84.1^\circ E$  coincide aproximadamente con la dirección promedio ( $N79^\circ E$ ) de los ejes de compresión de los mecanismos focales observados en el Nido (Coral-Gómez, 1985b). Este resultado nos permite concebir la idea de que la convergencia de placas hacia el Bloque Andino, determina el incremento de los esfuerzos de compresión que se concentran en la zona del Nido de Bucaramanga.



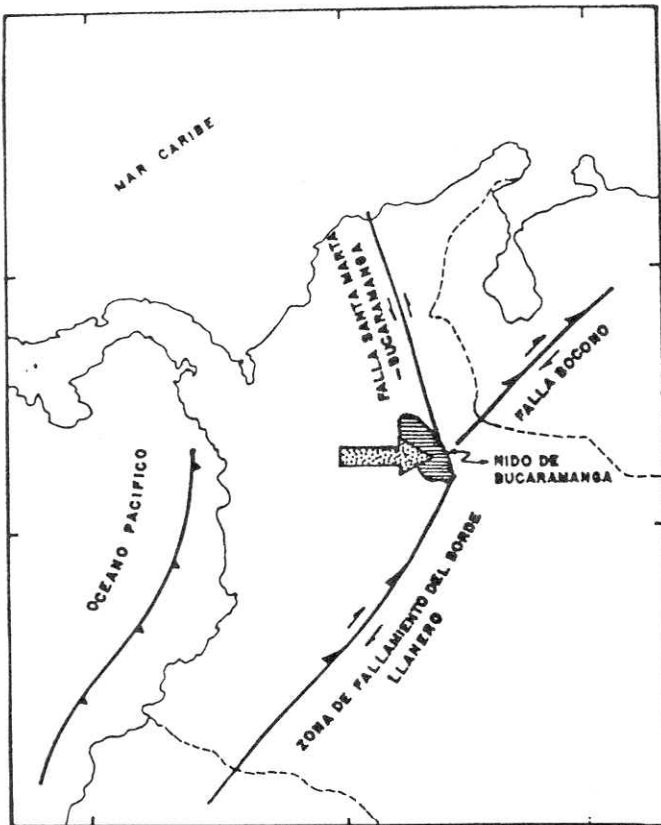


Figura 6. Esquema sísmodinámico de la región Santander (Cordillera Oriental). La flecha indica la dirección de los ejes de compresión en el Nido de Bucaramanga.

### Conclusiones

Aunque los valores altos (mayores que 1 000) del factor de calidad mecánica  $Q$  son característicos del material litosférico, la existencia de éstos a profundidades del Manto en la región sísmica del Nido de Bucaramanga, en Santander, no es, necesariamente, demostración de una subducción de litósfera oceánica bajo el continente, sino que más bien refleja características posiblemente más complejas del medio en esta región. La zona focal de esta región, caracterizada por elevados valores de  $Q$ , forma una especie de "cuña" litosférica que se incrusta hasta una profundidad de unos 200–220 Km y al parecer está circundada por una zona de bajas velocidades de ondas sísmicas, detectada en el Manto de la Cordillera Oriental.

La estimación y comparación de los parámetros de la fuente de los sismos estudiados nos permite concluir que los sismos de la región de Santander corresponden a focos con valores "bajos" de la caída de esfuerzos. Los valores relativamente mayores de esfuerzos tangenciales totales y caída de esfuerzos se observan en los focos profundos, correspondientes al Nido de Bucaramanga.

El alto fracturamiento en la región sísmica de Santander, las características de los parámetros focales, así como también la distribución espacio-temporal de la sismicidad y la orientación de los ejes de compresión y planos nodales de mayor probabilidad en los mecanismos focales del Nido de Bucaramanga, indican la existencia de fuerzas compresionales concentradas en la zona.

Los resultados obtenidos nos permiten establecer que la sismicidad en la región de Santander aparece en condiciones de compresión subecuatorial y que está condicionada al crecimiento de los esfuerzos tectónicos en el recodo que la Cordillera Oriental forma al cambiar su orientación de NNE a NNO. La presencia de un bloque "blando" de bajas velocidades en el Manto de la Cordillera favorece la concentración de los esfuerzos en el bloque "rígido", de elevados valores de  $Q$ , que se observa en la zona focal del Nido de Bucaramanga. Este incremento de esfuerzos tectónicos concentrados en la región del Nido de Bucaramanga parece tener su origen en la convergencia de las placas litosféricas del área hacia el Bloque Andino.

Se debe tener en cuenta que si la región de Santander está sometida a esfuerzos laterales continuos concentrados en el "Nido de Bucaramanga", aunque éste sea muy profundo, no se excluye la posibilidad de que el continuo esfuerzo rompa el "equilibrio" de la región y desestabilice alguna o varias de las fallas presentes, dando origen a terremotos de gran magnitud, por lo cual se hace indispensable el desarrollo de programas científicos especiales encaminados a investigar la dinámica de la región y evaluar el verdadero riesgo sísmico de la zona.

### REFERENCIAS

- BARAZANGI, M. & ISACKS, B.L. 1971. Lateral variations of seismic waves in the Upper Mantle above the Tonga Island arc deep anomaly in the Upper Mantle, *J. Geophys. Res.*, 76 (35).
- CORAL-GOMEZ, C. 1985 a. Estructura Interna y Sismicidad del Territorio Colombiano. Mem. VI Congr. Latinoamericano de Geología, Bogotá, 2: 337-355.
- . 1985b. Contribución al estudio de la actividad sísmica en Santander (Colombia). Mem. VI Congr. Latinoamericano de Geología, Bogotá, 2: 271-291.
- . 1987. Los terremotos en Colombia y Características de su origen profundo. Univ. Nacional de Colombia, Bogotá, 200 pp. (Manuscr.).
- CORAL-GOMEZ, C. & L. SARMIENTO-ROJAS. 1986. Resultados preliminares del estudio de parámetros focales en la región de Santander (Colombia), *Rev. CIAF*, 11 (1-3): 435-455.
- DEWEY, J.W. 1972. Seismicity and Tectonics of Western Venezuela. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 62: 1711-1751.

- DOBREY, T. B. & K. SHUKIN.** 1974. Campos geofísicos y sismicidad en el oriente de la región Cárpatos-Balcánes. *Nauka*, Moscú, 170 pp. (En ruso).
- GOMEZ-PADILLA, J.** 1980. Actividad sísmica en el departamento de Santander. *Bol. Geología, UIS, Bucaramanga*, 14 (28): 3-23.
- GORSHKOV, G. P.** 1984. Sismotectónica regional del sur de la URSS. (Cinturón Alpino), *Nauka*, Moscú, 271 p. (En ruso).
- GUBIN, I. E.** 1960. Leyes de las manifestaciones sísmicas en Tadzhikistán (URSS) Edit. Academia de Ciencias de la URSS, Moscú 464 p.
- ISACKS, B. & P. MOLNAR.** 1971. Distribution of the stresses in the descending lithosphere from global survey of focal-mechanism solutions of mantle earthquakes. *Rev. Geophys. and space physics*, 9:103-174.
- JAMES, M.** 1985. Evidencias de colisión entre la miniplaca del Bloque Andino y la placa Norteamericana desde el Mioceno medio. *Mem VI Congr. Latinoamericano de Geología*, Bogotá, 1: 71-87.
- KANAMORI, H.** 1971. Great earthquakes at island arcs and the lithosphere. *Tectonophysics*, 12: (3).
- KARNIK, V.** 1971. Seismicity of the European area. *Praha*, T. 2.
- KONDORSKAYA, H. V., SLAVINA, L. B. & SHUKIN, Y. K.** 1980. Estructura y dinámica de la litósfera en la región de los Cárpatos y la región de los terremotos profundos de Branchea, según datos sismológicos y geofísicos. En: *Geofísica, geología y fenómenos naturales catastróficos; Geología de los margenes continentales*. *Nauka*, Moscú, pp. 89-101. (En ruso).
- KUZIN, I.L.** 1972. Velocidad de las Ondas Elásticas en la zona focal de Kamchatka. *Izv. Akad. Nauka, Fizika Zemli*. No. 12 (En ruso).
- LEEDS, A.** 1977. Velocidades del Manto en la región Colombia-Ecuador. En: *La transición océano-continente en el suroeste de Colombia*. *Inst. Geofísico, Univ. Javeriana, Bogotá*, pp. 237-238.
- MAGNITZKY, V.A.** 1965. Estructura interna y física de la Tierra. *Nedra*, Moscú, 379 p. (En ruso).
- MAGNITZKY, V.A. & ARTIUSHKOV, E.V.** 1978. Algunos problemas generales de la dinámica de la Tierra. En: *La tectonósfera de la Tierra*. *Nauka*, Moscú, pp. 487-525. (En ruso).
- MOGI, K.** 1963. Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms. The fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (3th paper). *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.*, 41 (3): 615-658.
- MOLNAR, P., RAUTIAN, T. G. & JALTURIN, V.I.** 1976. Composición espectral de los terremotos de Pamir-Indo Kush, una testificación de la existencia de una zona de alto factor de calidad en el Manto Superior. En: *Compendio de trabajos científicos Soviético-Americanos acerca del pronóstico de terremotos*. *Donish, Dushanbe, Moscú*, 1 (1): 140-158. (En ruso).
- PENNINGTON, W.D.** 1981. Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of Northwestern South America. *J. Geophys. Res.*, 86: 753-770.
- PENNINGTON, W.D., MOONEY, W.D., HISSENHOVEN, R., MEYER, H., RAMIREZ, J.R. & MEYER, R.** 1981. Resultados de un estudio de reconocimiento de microsismos en Bucaramanga, Colombia. En: *Investigaciones geofísicas sobre las estructuras océano-continentales del occidente colombiano*. *Inst. Geofísico, Univ. Javeriana, Bogotá*, pp. 49-62.
- PUSTOVITENKO, B. G. & KAMENOBRODSKY, A. G.** 1976. Características de la migración de los focos sísmicos en Crimea. En: *Investigaciones sobre física de terremotos*. *Nauka*, Moscú, pp. 184-193 (En ruso).
- RIKUNOV, L.N., JAVROZHKIN, O. B. & TZIPLAKOV, V.V.** 1979. Variaciones temporales de los ruidos sísmicos de alta frecuencia. *Izv. Akad. Nauk URSS, Fizika Zemli*, No. 11: 72-77 (En ruso).
- . 1980a. Periodicidad de mareas luno-solares en las líneas espectrales de las variaciones temporales de los microsismos de alta frecuencia. *Dokl. Akad. Nauk URSS*, 252 (3): 577-580 (En ruso).
- . 1980b. Análisis de los espectros de las envolventes de los microsismos de alta frecuencia después de los terremotos de Alekeinsky y México en marzo de 1979. *Dokl. Akad. Nauk URSS*, 252 (4): 836-838. (En ruso).
- SANTO, T.** 1969. Characteristics of seismicity in South America. *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ.*, 47: 635-672.
- SHUKIN, Y. K. & LIUSTIJ, T.E.** 1981. Geodinámica y sismicidad. En: *Resúmenes de ciencia y técnica (Geología general No. 14)*. *BINITI*, Moscú, 87 p. (En ruso).
- VINNIK, L. P. & LENARTOVICH, E.L.** 1975. Inhomogeneidades horizontales de velocidad en el Manto Superior y la Tectónica de los Cárpatos y el Cáucaso. *Izv. Akad. Nauk URSS, Fizika Zemli*, 11: 3-14 (En ruso).
- VINNIK, L.P. & LUKK, A.A.** 1974. Inhomogeneidades laterales del Manto Superior bajo el Pamir-Indo Kush. *Izv. Akad. Nauk URSS, Fizika Zemli*, No. 1 (En ruso).
- VINNIK, L.P., LUKK, A.A. & NERSESOV, I.L.** 1977. Nature of the intermediate deep seismic zone of the Pamir-Indo-Kush. *Tectonoph.*, 38 (1):35-43.
- WOODWARD-CLYDE Consultants,** 1982. Aprovechamiento hidroeléctrico de los ríos Fonce y Suárez. *Estudio de prefactibilidad Sismotectónica*. *ISA*, Bogotá.

# CLONAJE DE FRAGMENTOS DE ADN DE *Plasmodium falciparum* Y SU POSIBLE USO EN EL DIAGNOSTICO DE LA MALARIA\*

por

Fernando Angel-Sánchez, Ana Elizabeth López-Salazar  
y Hernán Acosta-Díaz

## Resumen

Angel, F., López, A. & H. Acosta: Clonaje de fragmentos de ADN de *Plasmodium falciparum* y su posible uso en el diagnóstico de la malaria. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 531-541, 1990. ISSN 0370-3908.

Se establece la biblioteca genómica de ADN total en la cepa FCB-1, plásmido pUC 18 mediante clonación de fragmentos. El máximo nivel de detección obtenido es de 0.1 ng equivalente a 1 000 parásitos por muestra de sangre infectada; dicho nivel permite su utilización como herramienta en el desarrollo de métodos para el diagnóstico de la malaria en Colombia.

## Introducción

A pesar de las grandes medidas de control que han sido tomadas, la malaria continúa siendo una enfermedad de alta incidencia en el mundo (1). El incremento en la resistencia a las drogas por parte del parásito y a los insecticidas por parte del insecto transmisor han contribuido al crecimiento de la enfermedad, la cual afecta entre 200 y 400 millones de personas, matando por lo menos a un millón de ellas anualmente (2).

En los países tropicales en desarrollo, la malaria representa uno de los mayores problemas de salud, ya que el 30% de sus habitantes viven en zonas de riesgo y por consiguiente con posibilidades de adquirir la enfermedad (3). En Colombia la enfer-

medad tiene alta incidencia en los Llanos Orientales y parte de la Amazonia; en el occidente la región más afectada es el Chocó y en el sur el Putumayo, todas éstas regiones caracterizadas por clima cálido y húmedo. En la actualidad el diagnóstico es de unos cien mil casos al año, siendo una valoración baja debido al subregistro en el sistema nacional de salud (4).

Actualmente en todo el mundo se llevan a cabo inmensos esfuerzos para tratar de desarrollar vacunas usando proteínas nativas del parásito (5-10) y péptidos sintéticos (11-16), involucradas posiblemente en protección inmune y que inicialmente fueron localizadas e identificadas por medio de anticuerpos monoclonales (17-23). Un camino promisorio para lograrlo ha sido el uso de la tecnología del ADN recombinante, que nos permite clonar y expresar genes del parásito en *Escherichia coli* u otro organismo fácil de cultivar (24-28).

Otra de las aplicaciones prometedoras en cuanto al uso de la tecnología del ADN recombinante se

\* Trabajo ganador del "Premio Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 1988", convocado en el área de Biotecnología. La investigación fue realizada en el Instituto Nacional de Salud bajo la dirección del Dr. Moisés Wasserman L.



relaciona con el diagnóstico de la enfermedad. Desde que Laveran descubrió el parásito causante de la malaria, el diagnóstico se ha realizado por examen directo de muestras de sangre en el microscopio; este método aunque laborioso es sensible y específico, ya que mediante su uso es posible diferenciar las distintas especies de *Plasmodium*, parásito causante de la enfermedad.

Recientemente se han desarrollado métodos inmunológicos de diagnóstico como el ELISA, el cual detecta los anticuerpos dirigidos contra el parásito (29). Sin embargo, este método no diferencia entre infecciones presentes y posinfecciones, debido a que detecta los anticuerpos circulantes dirigidos contra el parásito, los cuales, persisten a pesar de la desaparición de parásitos en la sangre.

También ha sido desarrollado otro método, el cual detecta el antígeno del parásito; dicho método es útil para detectar infecciones presentes pero los anticuerpos presentes debido, a una infección pasada interfieren con el ensayo (30).

Como se dijo antes, por más de un siglo el diagnóstico de la malaria se ha realizado por examen directo de muestras de sangre en el microscopio. Sin embargo, esta técnica es laboriosa e ineficiente cuando se quieren realizar investigaciones epidemiológicas a gran escala en zonas endémicas y más cuando el número de parásitos presentes en la sangre es muy bajo. Por ejemplo, para detectar una parasitemia de 0,001% ó 50 parásitos por microlitro (asumiendo  $5 \times 10^6$  eritrocitos/ul), un microscopista debe rutinariamente gastar 30 minutos leyendo un extendido (31). Este nivel de sensibilidad puede ser mejorado a una parasitemia de 0,0002% (10 parásitos/ul) examinando 100 campos de una gota gruesa, con el inconveniente de que se puede perder durante la preparación hasta el 20% de los parásitos (31, 32). Además, los análisis directos de muestras de sangre en el microscopio son subjetivos, ya que dependen en gran parte de la laboriosidad y experiencia del técnico o microscopista que examina la muestra (33).

La tecnología del ADN recombinante proporciona alternativas para el diagnóstico de la malaria y su uso permitiría procesar muchas muestras provenientes del campo y de zonas rurales apartadas, posibilitando llevar a cabo estudios epidemiológicos y evaluaciones de los programas de control de la enfermedad. Este método se basa en la detección directa del ADN del parásito por hibridación molecular. Recientemente varios grupos de investigadores usando como sonda fragmentos de ADN del parásito, han llegado a niveles de detección comparables a los obtenidos mediante la gota gruesa (34-37).

Con el fin de desarrollar en un futuro cercano dicho método de diagnóstico en Colombia, se construyó una biblioteca genómica de una cepa colombiana de *Plasmodium falciparum* especie que ha resultado la más letal y la que causa mayor morbilidad en el hombre, razón por la cual la lucha contra la enfermedad se ha centrado principalmente en él.

La biblioteca genómica del parásito fue construida en el plásmido pUC18 y las bacterias recombinantes se seleccionaron inicialmente por su diferente actividad beta-galactosidasa. Posteriormente, los fragmentos clonados se seleccionaron por hibridación y ocho de los que hibridaron más fuertemente fueron escogidos y analizados por electroforesis e hibridación en "dot-blot" y en "Southern". El nivel de detección de cada fragmento analizado fue evaluado por hibridación con ADN puro del parásito.

Los fragmentos clonados, podrán ser en un futuro cercano ensayados para determinar su uso en el diagnóstico tanto en muestras de sangre, como en mosquitos infectados, además de convertirse en un material muy útil para llevar a cabo estudios sobre la biología molecular del parásito.

Los fragmentos clonados, podrán ser en un futuro cercano ensayados para determinar su uso en el diagnóstico tanto en muestras de sangre, como en mosquitos infectados, además de convertirse en un material muy útil para llevar a cabo estudios sobre la biología molecular del parásito.

## Materiales y Métodos

### Cultivo in vitro del *Plasmodium falciparum*

La cepa colombiana FCB-1 de *Plasmodium falciparum* (38, 39) se cultivó según el método establecido por Trager y Jensen (40, 41) en medio RPMI 1640 (Gibco) suplementado con 10% de suero humano tipo O (+), tampón hepes 25 mM pH 7, 4, NaHCO<sub>3</sub> 32 mM, hipoxantina 0,2 mM, glutatión reducido 1 ug/ml y gentamicina 50 ug/ml. Una suspensión de eritrocitos humanos O (+) fue agregada a una concentración final de 5% (V/V); los leucocitos fueron eliminados mediante lavados sucesivos con ficoll-paque (Pharmacia). El crecimiento fue iniciado por inoculación de eritrocitos parasitados con una parasitemia final del 1% y el cultivo se mantuvo a 37°C en cámaras de incubación herméticas bajo una atmósfera de CO<sub>2</sub> 5%, O<sub>2</sub> 5%, N<sub>2</sub> 90%. La parasitemia se evaluó por conteo de los parásitos en 10.000 eritrocitos en extendidos coloreados con Giemsa y se expresó como porcentaje. El medio de cultivo fue cambiado diariamente hasta que se obtuvieron altas parasitemias (10%); el recuento de leucocitos mostró menos de 1 leucocito por 150.000 eritrocitos parasitados.

### Preparación de parásitos libres

Las células fueron lavadas tres veces con SSC (NaCl 0,15 M, citrato de sodio 0,015 M), suspendidas en 20 volúmenes de una solución estéril de SSC contenido 0,1% de saponina e incubadas durante 20 min. a 4°C. Los parásitos libres y las células no lisadas fueron recuperadas por centrifugación y tratadas una vez más con saponina. El precipitado final

obtenido que contiene los parásitos libres fue lavado tres veces con SSC y guardado a  $-70^{\circ}\text{C}$ .

#### Extracción del ADN de *Plasmodium falciparum*

Los parásitos libres fueron lisados en un tampón 10 mM Tris-HCl pH 8,0 conteniendo EDTA 0,1 M y SDS 1% (P/V) a  $65^{\circ}\text{C}$  durante 5 min. El lisado fue digerido por una hora a  $37^{\circ}\text{C}$  con RNasa A en una concentración final de 50 ug/ml y posteriormente con Proteinasa K (Merck Co.) en una concentración final de 100 ug/ml durante una hora a  $50^{\circ}\text{C}$ . El ADN fue extraído dos veces con un vol. de fenol, una vez con una mezcla fenol-cloroformo y finalmente una vez con un vol. de cloroformo-alcohol isoamílico (24:1, v/v). El ADN fue precipitado con dos vol. de etanol absoluto a  $-20^{\circ}\text{C}$ . durante una noche. Posteriormente el ADN fue recuperado por centrifugación a 10.000 xg durante 30 min. a  $4^{\circ}\text{C}$  y el precipitado obtenido se dejó secar y se disolvió en TE (10 mM Tris-HCl pH 7,4; EDTA 1mM). La cantidad final obtenida de ADN fue evaluada por lectura a 260 nm en un espectrofotómetro Shimadzu U.V. 260.

#### Extracción del ADN humano

Para la extracción del ADN humano se siguió el método anteriormente descrito (42). Los leucocitos fueron inicialmente lisados a  $4^{\circ}\text{C}$  en un tampón 10mM Tris-HCl pH 7,5 conteniendo sucrosa 0,35 M,  $\text{MgCl}_2$  5 mM y Tritón X-100 1%. Los núcleos fueron recuperados por centrifugación a 1.000 xg durante 10 min. y disueltos en un tampón que contiene NaCl 0,075 M, EDTA 0,024 M, SDS 5% adicionado con Proteinasa K (conc. final 2mg/ml). Los núcleos fueron lisados a  $37^{\circ}\text{C}$  durante 12 horas y posteriormente el ADN fue extraído una vez con fenol y dos veces con cloroformo-alcohol isoamílico. La fase acuosa fue recuperada y precipitada con dos vol. de etanol. El ADN se recuperó por centrifugación y la cantidad obtenida fue evaluada de la misma forma que el ADN del parásito.

#### Extracción y purificación del plásmido pUC 18

El plásmido pUC18 es un vector de clonación de 2686 pb que se caracteriza principalmente por poseer un gen que le confiere resistencia al antibiótico ampicilina, además de los genes de la región reguladora (promotor y operador) y el gen lac z del operon LAC, genes necesarios para la síntesis de la enzima beta-galactosidasa (43). La región reguladora y el gen lac z, están separados por el sitio de clonaje múltiple del bacteriófago M13mp18, el cual presenta una secuencia de 51 pb que le confiere trece sitios de corte únicos para trece diferentes enzimas de restricción (44, 45).

El plásmido pUC18 fue extraído de la bacteria *Escherichia coli* JM83 (46), usando el método de lisis alcalina (47, 48). La bacteria fue cultivada en el medio TB suplementado con ampicilina (25

ug/ml) (49), a  $37^{\circ}\text{C}$  con una agitación de 220 rpm; una vez la densidad óptica del cultivo a 600 nm llegó a 0,8 el plásmido fue amplificado con cloranfenicol (conc. final 200 ug/ml) durante 14 horas. Las bacterias fueron centrifugadas a 500 xg durante 20 min. a  $4^{\circ}\text{C}$  y el precipitado resultante se disolvió en un tampón de lisis (25mM Tris-HCl pH 8,0; EDTA 10mM, glucosa 50 mM) suplementado con lisozima (conc. final 2 mg/ml). Las bacterias fueron incubadas a  $4^{\circ}\text{C}$  durante 30 min con agitación suave y posteriormente se adicionó una solución compuesta de NaOH 0,2N, SDS 1% y se agitó enérgicamente durante 5 min. El ADN bacteriano fue eliminado en gran parte por adición de tampón acetato de potasio 3M pH 4,8 frío y por incubación a  $4^{\circ}\text{C}$  durante 60 min. El lisado se centrifugó a 1.000 x g durante 30 min. a  $4^{\circ}\text{C}$  y el sobrenadante que contiene el ADN plasmídico fue recuperado y precipitado con 0,6 vol. de isopropanol a temp. ambiente durante 15 min; el ADN extraído fue centrifugado a 5.500 xg durante 30 min a  $4^{\circ}\text{C}$  y disuelto en TE. Finalmente, el ADN plasmídico fue purificado mediante un gradiente de cloruro de cesio (densidad inicial: 1,5846 g/cm<sup>3</sup>) a  $20^{\circ}\text{C}$  en un rotor 65 Ti Beckman a 45000 rpm durante 14 horas (50).

#### Clonación

El ADN plasmídico y el ADN del parásito fueron digeridos con la enzima de restricción Eco RI (Pharmacia) a  $37^{\circ}\text{C}$ . Una vez linearizado el plásmido, 5 ug fueron defosforilados con 0,05 unidades de la enzima fosfatasa alcalina a  $37^{\circ}\text{C}$  durante una hora, en presencia del tampón recomendado (0,5 M Tris-HCl pH 8,0;  $\text{MgCl}_2$  10 mM,  $\text{ZnCl}_2$  1 mM espermidina 10mM)(51-52). Las enzimas fueron eliminadas mediante extracciones con fenol-cloroformo y cloroformo. Los fragmentos de ADN del parásito obtenidos por digestión con la enzima Eco RI fueron ligados al plásmido mediante la acción de la enzima ADN ligasa del fago T4; la reacción de ligación se llevó a cabo a una concentración de 50 ug/ml de ADN a ligar en un tampón (0,5 M Tris-HCl pH 7,4;  $\text{MgCl}_2$  0.1 M, ditiotreitol 0,1 M, espermidina 10 mM, ATP 10 mM, BSÁ 1 mg/ml) durante 16 horas a  $12^{\circ}\text{C}$ ; 0,1 unidades de la enzima ADN ligasa fueron usadas para ligar 1 ug de ADN.

El ADN recombinado obtenido por ligación se purificó por extracción fenólica y se utilizó para transformar células competentes *Escherichia coli*, cepa JM83, las cuales habían sido preparadas siguiendo el procedimiento descrito por Hanahan (53). 10 ng de ADN recombinante fueron usados para llevar a cabo cada ensayo de transformación.

#### Selección de las células transformadas

La expresión del operon LAC en un medio de cultivo se mide mediante el uso de indicadores. El indicador más sensitivo para medir la síntesis de la beta-galactosidasa en un medio sólido es el sustrato cromogénico X-gal (5-bromo-4-cloro-indolil-beta-D-

galactósido). Este compuesto incoloro forma un color azul insoluble cuando es hidrolizado, de tal forma que en un medio con agar que contenga X-gal, las bacterias que expresan beta-galactosidasa forman colonias azules, mientras que bacterias que contengan el gen lac z sin sentido o una fase de lectura del gen desplazado producen colonias incoloras (44). De esta forma es posible distinguir entre células transformadas con plásmido recombinante (colonias incoloras) y células transformadas con plásmido no recombinante (colonias azules).

Volúmenes de 0,1 ml de células transformadas fueron sembradas en placas de agar LB adicionado con ampicilina, IPTG como inductor y X-gal (44). Las colonias blancas fueron seleccionadas y sembradas en LB con ampicilina. Una vez crecidas, las colonias seleccionadas fueron transferidas sobre un filtro de nylon Hybond-N (Amersham), lisadas y su ADN denaturado con una solución NaCl 1,5 M, NaOH 0,5 M, neutralizadas en una solución 0,5 M Tris-HCl pH 7,2 NaCl 1,5 M, lavadas con 2xSSC y finalmente el ADN liberado fue fijado al filtro para posteriores hibridaciones "in situ" (54, 55).

#### Electroforesis y transferencia sobre filtro

Los plásmidos recombinados fueron extraídos y purificados por el método de lisis alcalina como se describió anteriormente. Cada plásmido recombinante fue digerido con la enzima Eco RI y los fragmentos generados por la digestión fueron separados por electroforesis en geles de agarosa al 1%. Los fragmentos separados fueron transferidos sobre filtro de nylon Hybond-N según el método de Southern (56). El ADN fue desnaturalizado, neutralizado, transferido y fijado sobre el filtro.

Igualmente los plásmidos recombinantes sin digerir fueron sembrados sobre filtro de nylon y tratados para posteriores hibridaciones en "dot-blot" (57, 58).

#### Hibridación

El ADN de las colonias bacterianas, como el de los plásmidos recombinantes sin digerir y digeridos, fueron hibridados con ADN total del parásito y con ADN humano marcados radiactivamente según el método descrito (59). El ADN usado como sonda, fue marcado con 32 PdATP (actv. especific. 3 000 Ci/mmol; Amersham) obteniendo ADN marcado con una alta actividad específica ( $3 \times 10^8$  cpm/ug). Los filtros fueron prehibridados y posteriormente hibridados a 65°C durante 16 horas en una solución 6xSSC -5xDenhardt- 0,5% SDS. Los filtros fueron lavados 2 veces durante un min. con 6xSSC -0,1% SDS y tres veces durante 15 min. con 2xSSC -0,1% SDS, secados y puestos en contacto con una película fotográfica (Hyperfilm-MP, Amersham).

#### Resultados

Una biblioteca genómica de ADN total del parásito *Plasmodium falciparum*, cepa colombiana FCB-1, fue construida. Los parásitos fueron cultivados "in vitro" y el ADN del parásito fue extraído, purificado y usado para construir la biblioteca; el ADN fue digerido con la enzima Eco RI y clonado mediante el plásmido pUC18 en la bacteria *E. coli*, cepa JM83.

#### Ensayos de transformación

Las células competentes fueron transformadas con diferentes ADNs recombinados y con ADNs no recombinados, los cuales fueron usados como control. El conjunto de resultados obtenidos se muestra en la siguiente Tabla.

TABLA 1

ADN transformante	células/ug de ADN $\beta$ -gal (+) $\beta$ -gal (-)		porcentaje de $\beta$ -gal (-)
plásmido pUC18	$1,0 \times 10^8$	—	
vector cortado	$2,0 \times 10^3$	—	
vector religado	$1,0 \times 10^6$	—	
vector defosforilado	$1,4 \times 10^3$	—	
vector defosforilado religado	$4,4 \times 10^4$	$0,2 \times 10^3$	4,3%
<b>Recombinados</b>			
vector: inserto			
2: 1	$2,2 \times 10^4$	$1,2 \times 10^4$	35,3%
1: 1	$1,7 \times 10^4$	$2,5 \times 10^4$	59,5%
1*: 2	$1,8 \times 10^4$	$3,4 \times 10^4$	65,4%
1: 4	$1,4 \times 10^4$	$2,2 \times 10^4$	61,1%
1: 8	$1,2 \times 10^4$	$1,7 \times 10^4$	58,6%

El título de las células competentes con el plásmido pUC18 fue de  $1 \times 10^8$  células transformadas por micrograma de ADN. Los controles de transformación usando vector cortado, vector cortado-religado, vector defosforilado y vector defosforilado-religado dieron los resultados esperados.

Se ensayaron cinco proporciones diferentes entre vector e inserto de recombinados, con el fin de evaluar cinco grupos independientes de ADN recombinante; los cinco recombinantes se usaron para transformación y se determinó el número de células beta-galactosidasa (-) y beta-galactosidasa (+).

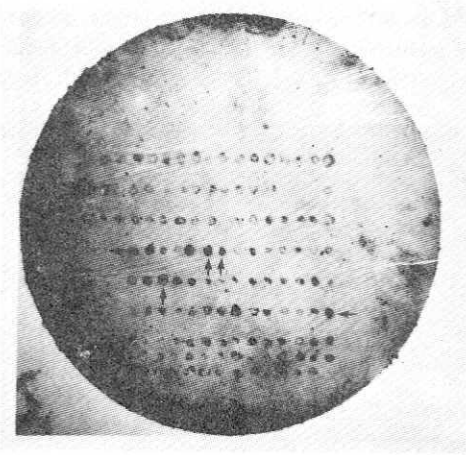
El ADN recombinante que produjo mayor número de células recombinantes beta-galactosidasa (-) fue el recombinante en el cual se usó el doble de cantidad de inserto que de vector (vector 1: inserto 2). Usando dicho recombinante se obtuvieron 65,4% de bacterias recombinantes (Tabla 1). Con 10 ng de ADN recombinante usados para transformación, se obtuvieron  $3,4 \times 10^2$  bacterias recombinantes lo cual corresponde a  $3,4 \times 10^4$  bacterias recombinantes por micrograma de ADN recombinante. Con base en los resultados obtenidos se decidió

usar dicho recombinante el cual produjo el más alto porcentaje de bacterias recombinantes (Tabla 1).

### Selección por hibridación de las bacterias recombinantes

Con el fin de verificar si las bacterias beta-galactosidasa (-) poseen un plásmido recombinante, fueron hibridadas con ADN total del parásito. Mil colonias independientes fueron transferidas sobre un filtro de nylon, tratadas como se describió anteriormente e hibridadas a 65°C con ADN del parásito marcado radiactivamente. Todas las colonias dieron señal positiva pero la intensidad de hibridación fue diferente; mientras que unas colonias mostraron señales tenues de hibridación, otras hibridaron fuertemente (Fig. 1).

Ocho de las colonias que hibridaron fuertemente fueron escogidas para realizar estudios posteriores.



**Figura 1.** Autoradiografía donde se señalan algunas de las colonias recombinantes seleccionadas para realizar estudios posteriores. Las colonias fueron escogidas con base en su fuerte hibridación con ADN del parásito marcado radiactivamente.

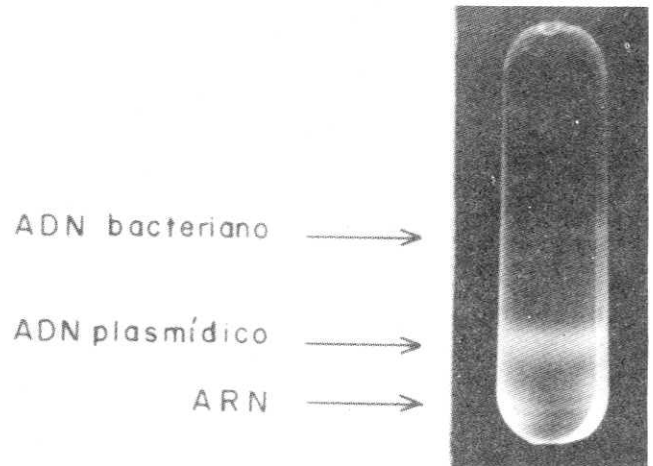
### Análisis de los plásmidos recombinantes

El plásmido no recombinado y los plásmidos recombinantes de las ocho colonias escogidas fueron extraídos por el método de lisis alcalina y finalmente purificados en gradiente de cloruro de cesio. El gradiente de cloruro de cesio nos permitió separar el ADN plasmídico del ADN bacteriano y del ARN (Fig. 2).

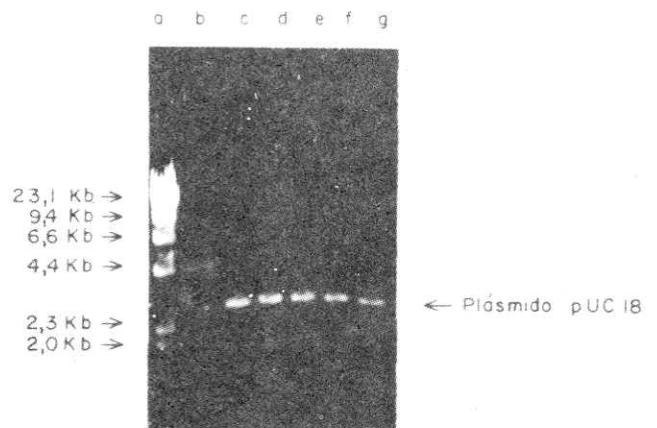
La banda correspondiente al ADN plasmídico fue recuperada y posteriormente el plásmido fue digerido con la enzima de restricción Eco RI. La pureza del plásmido no recombinado, su peso molecular y la eficiencia de la digestión fueron verificados mediante una electroforesis en un gel de agarosa al 1% (Fig. 3).

Los resultados mostraron que el plásmido obtenido por el método usado está libre de contami-

nación de ADN bacteriano y ARN demostrando su alta pureza. Como se esperaba, los ensayos de digestión indicaron que el peso molecular del plásmido linearizado es de 2,7 kb demostrando la integridad del plásmido. Una hora de digestión fue suficiente para digerir un microgramo del plásmido puro con 10 unidades de la enzima Eco RI, mientras que 5 horas de digestión bajo las condiciones usadas no degradaron el ADN plasmídico (Fig. 3).



**Figura 2.** Gradiente de cloruro de cesio visualizado bajo luz ultravioleta. Se observan las bandas correspondientes al ADN plasmídico y al ADN bacteriano. El ARN se localiza en el fondo del gradiente.



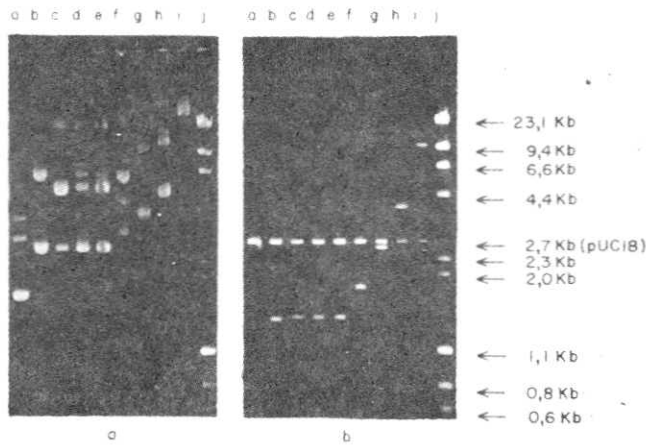
**Figura 3.** Electroforesis en un gel de agarosa al 1% del plásmido pUC18 purificado en gradiente de cloruro de cesio. El plásmido fue digerido con la enzima Eco RI.

- ADN de lambda digerido con Hind III usado como marcador de peso molecular.
- pUC18 sin digerir.
- pUC18 digerido durante una hora.
- pUC18 digerido durante dos horas.
- pUC18 digerido durante tres horas.
- pUC18 digerido durante cuatro horas.
- pUC18 digerido durante cinco horas.

Los pesos moleculares son expresados en kilobases ( $10^3$  bases).

De la misma forma, fueron analizados los ocho plásmidos recombinantes antes y después de la di-

gestión (Fig. 4). Los plásmidos fueron digeridos con la enzima Eco RI y los fragmentos generados por la digestión fueron resueltos por electroforesis (Figura 4b).



**Figura 4.** Electroforesis de los plásmidos recombinantes sin digerir a); y digeridos b).

- a: plásmidos sin digerir donde se observan los diferentes grados de enrollamiento.
- b: plásmidos digeridos con la enzima Eco RI donde se observan el plásmido pUC18 y el inserto correspondiente.
  - a. pUC18
  - b. clon 8R
  - c. clon 38R
  - d. clon 174B
  - e. clon 79B
  - f. clon 1R
  - g. clon 6R
  - h. clon 25R
  - i. clon 4R
  - j. marcador de peso molecular (lambda-HindIII/0X174-Hinc II).

Cada uno de los recombinantes presentó un inserto, los cuales mostraron diferentes tamaños oscilando entre 1,3 kb y 10 kb. Cuatro de ellos mostraron un tamaño similar (Fig. 4b, carriles b, c, d, e). El inserto más grande (carril i) es de aproximadamente 10 kb mientras que el más pequeño mide 1,3 kb, observándose además insertos de 1,8 kb, (carril f), 2,5 kb (carril g) y 4,2 kb (carril h).

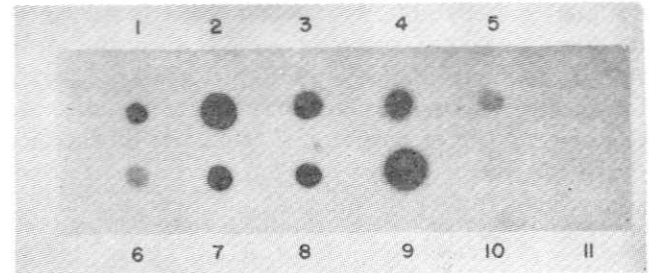
En conclusión cada uno de los ocho plásmidos analizados poseé inserto el cual puede ser separado del plásmido por digestión por enzima Eco RI.

**Determinación de la especificidad de los fragmentos clonados por hibridación en punto "Dot-blot"**

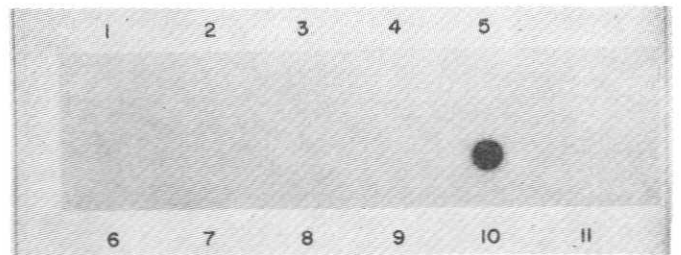
Una vez comprobado por electroforesis en gels de agarosa que cada uno de los plásmidos procedentes de los clones seleccionados posee inserto, se determinó su especificidad por la técnica de "dot-blot" hibridando cada plásmido recombinante con ADN del parásito y con ADN humano.

Cien ng de cada plásmido recombinante fueron desnaturalizados, neutralizados e hibridados con ADN total de *P. falciparum* y con ADN huma-

no. Los resultados de hibridación usando la técnica de "dot-blot" mostraron que los ocho plásmidos recombinantes hibridan con ADN total del parásito (Fig. 5a), pero no lo hacen con ADN humano (Fig. 5b), lo que indica que los fragmentos clonados son específicos del parásito. Las señales de hibridación del plásmido pUC18 y del ADN del fago lambda fueron negativas con ambas sondas.



**Figura 5a.** Hibridación en punto "dot-blot" de los ocho plásmidos recombinantes con ADN total del parásito. 1) 1R, 2) 4R, 3) 25R, 4) 38R, 5) 6R, 6) 8R, 7) 174B, 8) 79B, 9) ADN del parásito usado como control, 10) pUC18, 11) ADN de lambda. Los ocho plásmidos recombinantes y el ADN del parásito dieron señal positiva de hibridación.



**Figura 5B.** Hibridación en punto "dot-blot" de los ocho plásmidos recombinantes con ADN humano. 1) 1R, 2) 4R, 3) 25R, 4) 38R, 5) 6R, 6) 8R, 7) 174B, 8) 79B, 9) pUC18 10) ADN humano usado como control, 11) ADN de lambda. Ninguno de los plásmidos recombinantes hibridó con ADN humano.

**Caracterización de los fragmentos clonados hibridación en "Southern"**

Con el fin de verificar la especificidad de los fragmentos clonados, los plásmidos recombinantes fueron digeridos con la enzima de restricción Eco RI, transferidos sobre filtro de nylon e hibridados siguiendo la técnica descrita por Southern.

La eficiencia de cada transferencia se verificó por tinción del gel con bromuro de etidio antes y después de la transferencia (Fig. 6). Los resultados mostraron la diferente intensidad de las bandas de ADN, demostrando que la mayoría de ADN presente en el gel fue transferida sobre el filtro.

Los fragmentos clonados transferidos sobre filtro de nylon fueron hibridados con ADN del parásito y con ADN humano marcados radiativamente. Los resultados de hibridación indicaron que ninguno de los insertos hibridó con ADN humano, mientras que los ocho insertos hibridaron con ADN del parásito (Fig. 7), siendo la intensidad de la hi-



bridación variable, ya que unos fragmentos mostraron fuerte hibridación (Fig. 7, carriles c', g', h', i') mientras que otros hibridaron levemente (Fig. 7, carriles a', b', d', f').

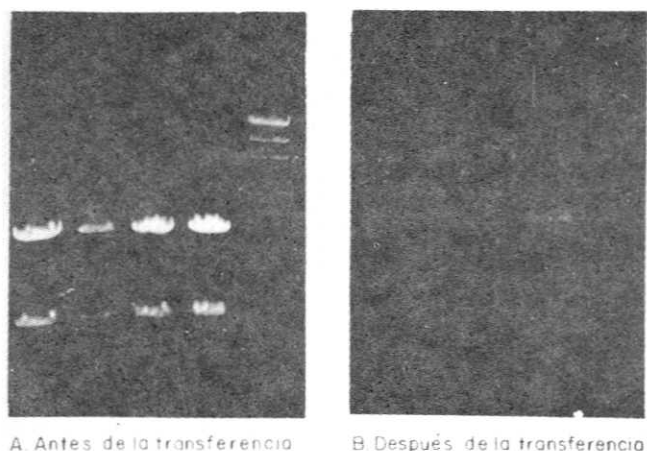


Figura 6. Geles de agarosa fotografiados bajo luz ultravioleta antes y después de ser transferidos sobre filtro de nylon. La disminución en la intensidad de las bandas muestra la eficiencia de la transferencia.

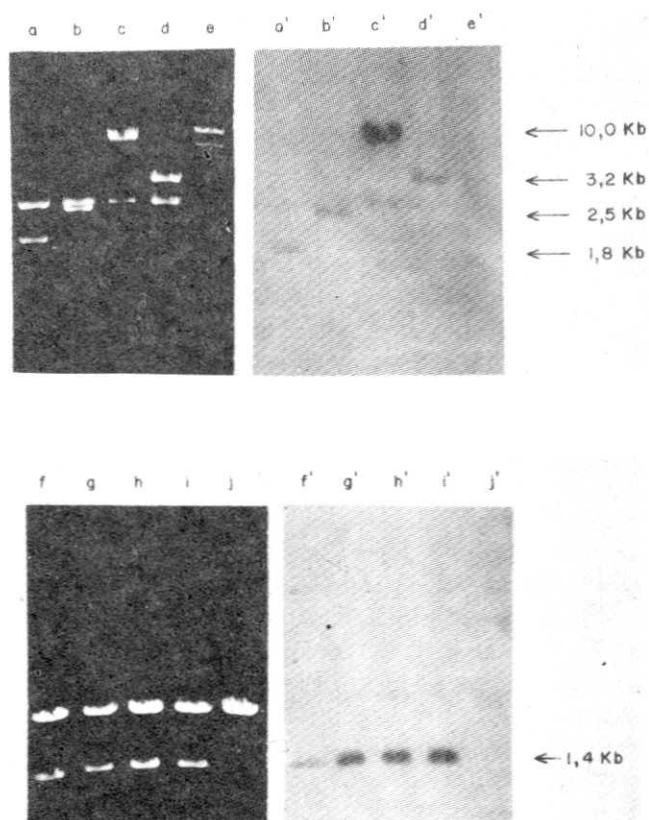


Figura 7. Electroforesis e hibridación de los fragmentos clonados con ADN total del parásito. a) 1R, b) 6R, c) 4R, d) 25R, e) ADN de lambda, f) 8R, g) 38R, h) 174B, i) 79B, j) pUC18. Los ocho insertos presentaron hibridación como se aprecia en los carriles a' - d' y f' - i'. Los mismos filtros fueron hibridados con ADN humano; ninguno de los fragmentos hibridó con ADN humano.

(Figs. 4 y 7), siendo imposible diferenciarlos por análisis en geles de agarosa. Con el fin de saber si los cuatro fragmentos clonados de tamaño similar son diferentes, uno de ellos fue marcado y usado como sonda, con el fin de hibridarlo con los cuatro fragmentos de tamaño similar y también con los otros cuatro fragmentos clonados. Los resultados mostraron que de los ocho fragmentos, tres hibridaron con la sonda mientras que los otros cinco no lo hicieron (Fig. 8). La sonda radioactiva hibridó con el mismo fragmento usado como control (Fig. 8, carril b') además de hibridar con otros dos fragmentos (Fig. 8, carriles c', d') indicando que tres de los fragmentos son iguales (Fig. 8, carriles b', c', d') mientras que los cinco restantes (Fig. 8, carriles a', e', f', g', h', i') no poseen secuencias homólogas a las presentes en el fragmento usado como sonda.

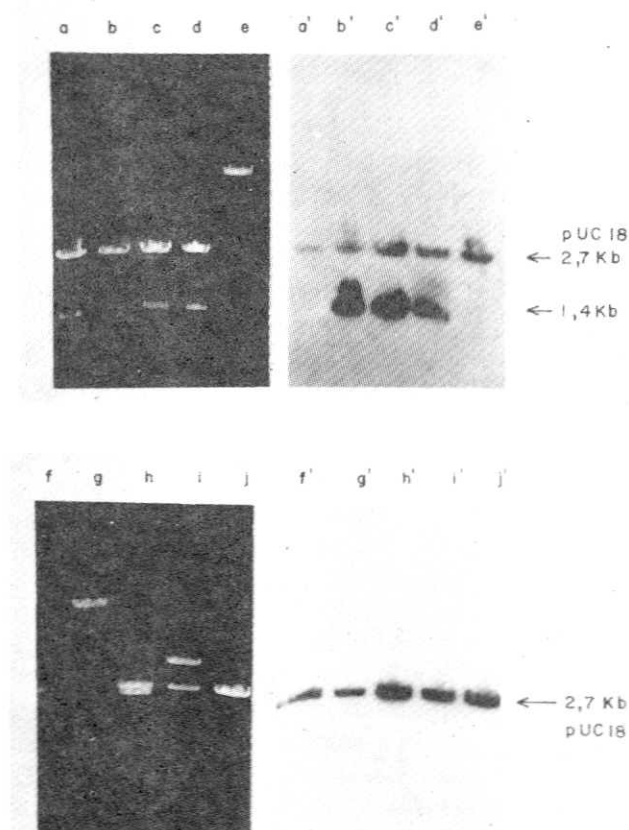


Figura 8. Electroforesis e hibridación de los fragmentos clonados con el plásmido recombinante 38R, el cual fue usado como sonda. a) 8R, b) 38R, c) 174B, d) 79B, e) 4R, f) 1R, g) 4R, h) 6R, i) 25R, j) pUC18. Tres de los insertos hibridaron con la sonda como se aprecia en los carriles b', c' y d'. Ninguno de los otros insertos mostró hibridación.

**Evaluación del nivel de detección**

Para evaluar el nivel de detección de los fragmentos clonados, se usó la técnica de hibridación en "dot-blot". Diferentes cantidades de ADN puro del parásito fueron colocados sobre filtro de nylon e hibridados con plásmidos recombinantes marcados radioactivamente, con una actividad específica de  $3 \times 10^8$  cpm/ug.

Cuatro de los fragmentos clonados mostraron siempre tamaños similares en las electroforesis

Los niveles de detección obtenidos fueron diferentes según la sonda utilizada (Fig. 9), siendo el máximo nivel obtenido de 0,1 ng (Fig. 9, 1C) y el mínimo de 10 ng (Fig. 9, 7A) después de 24 horas de exposición, notándose diferentes intensidades en las señales de hibridación. Cinco de los siete fragmentos evaluados detectaron hasta 0,1 ng (Fig. 9, 1C-5C) mostrando uno de ellos una señal más fuerte que los otros cuatro fragmentos (Fig. 9, 1C), mientras que un fragmento detectó 1 ng y el restante solamente 10 ng, todos bajo las mismas condiciones experimentales. En conclusión, el máximo nivel de detección obtenido con los fragmentos evaluados fue de 0,1 ng, lo que correspondería a detectar 1 000 parásitos en una muestra.



**Figura 9.** Hibridación en "dot-blot" de siete fragmentos clonados (1-7) con diferentes cantidades de ADN del parásito (A: 10 ng - B: 1 ng - C: 0,1 ng - D: 0,01 ng). El máximo nivel de detección obtenido fue de 0,1 ng (1C, 2C, 3C, 4C y 5C) con diferencias en la intensidad de la señal de hibridación.

## Discusión

En los últimos años el desarrollo de la tecnología del ADN recombinante ha tomado diversas vías, siendo una de ellas el uso de sondas de ADN altamente específicas en el diagnóstico de diversas infecciones producidas por virus, bacterias y parásitos. Esto se ha logrado construyendo bibliotecas genómicas del agente infectante y seleccionando los clones recombinantes que muestran la más fuerte señal de hibridación, localizando de ésta forma secuencias repetitivas presentes en el genoma en cuestión. Cuando son usadas dichas secuencias repetitivas como sondas, proporcionan una alta sensibilidad debido a que son copias múltiples, presentes varias veces a lo largo del genoma total.

Recientemente se han clonado e identificado varios fragmentos de ADN de *P. falciparum* que contienen secuencias repetitivas, las cuales al ser usadas como sondas son capaces de detectar parásitos en muestras de sangre infectada (34-37). Algunos de ellos han sido secuenciados y descritos en detalle, mostrando grupos de secuencias imperfectas de 21 pb repetidas varias veces. Dos de ellos, a

pesar de su diferente origen (uno proviene de un aislado de Tanzania y el otro de un aislado de Gambia) tienen los mismos grupos de secuencias repetitivas (34, 60). Los otros fragmentos no han sido caracterizados en detalle, aunque análisis preliminares sugieren que poseen también repeticiones internas.

Con el fin de disponer de fragmentos clonados de ADN del parásito *P. falciparum* para ser usados como sondas, se construyó una biblioteca genómica de un aislado colombiano, cepa FCB-1. La biblioteca fue construida en el plásmido pUC18, el cual fue escogido debido a las ventajas que ofrece clonar una secuencia determinada en dicho plásmido (44-46). Las bacterias recombinantes fueron seleccionadas por ausencia de la actividad beta-galactosidasa y posteriormente por hibridación con ADN total del parásito.

Varias proporciones de recombinados entre vector e inserto fueron ensayadas, obteniendo 3400 colonias independientes con 10 ng de uno de los recombinados probados (vector 1: inserto 2). Dicha proporción fue escogida para construir la biblioteca genómica del parásito (Tabla 1). Otros tres recombinados en los cuales siempre se usó más cantidad de inserto que de vector, dieron un alto porcentaje de bacterias recombinantes. El título de las bacterias competentes usadas fue alto ( $1 \times 10^8$  células/ $\mu$ g ADN) y los controles dieron los resultados esperados (Tabla 1).

Para construir los recombinados, el vector fue defosforilado con el fin de evitar su recircularización, aumentando de ésta forma el número de bacterias recombinantes obtenidas. Varios ensayos de recombinación y transformación sin defosforilar el vector fueron realizados (resultados no mostrados) obteniendo un número bajo de células recombinantes, lo que nos indicó la importancia de defosforilar el vector con el fin de aumentar la eficiencia de la recombinación y por consiguiente el número de bacterias recombinantes.

Usando 10 ng del ADN recombinado, 3400 colonias independientes recombinantes fueron obtenidas. Un análisis del recombinante total nos mostró que el tamaño promedio de los fragmentos clonados es de 3 kb, lo que concuerda con el tamaño promedio de los ocho fragmentos caracterizados en el presente trabajo.

Teniendo estos dos datos comprobados y asumiendo el tamaño del genoma total del parásito en  $1 \times 10^7$  pb como ha sido descrito por varios grupos (61, 62), para alcanzar una probabilidad del 99% de tener una secuencia de ADN representada en nuestra biblioteca, es necesario obtener 15.300 bacterias recombinantes independientes, lo que se logra haciendo menos de cinco transformaciones independientes, cada una con 10 ng de recombinado (63). Este análisis nos indica que la biblioteca construida es altamente representativa y que teóricamente to-

das las secuencias presentes en el genoma del parásito están representadas.

Tanto el plásmido sin recombinar como los plásmidos recombinantes fueron extraídos por el método de lisis alcalina (47, 48), método que nos permitió obtener el ADN plasmídico con un alto grado de pureza, la cual fue verificada por electroforesis. La pureza del plásmido fue evidente, ya que nunca se observó ni ADN bacteriano ni ARN (Figs. 3 y 4). Además, el gradiente de cloruro de cesio realizado bajo las condiciones descritas, separó eficientemente las bandas correspondientes al ADN bacteriano y al ADN plasmídico lo que facilitó enormemente la extracción de la banda correspondiente al plásmido (Fig. 2).

Ocho de las colonias recombinantes que hibridaron más fuertemente, fueron analizadas y el análisis de los insertos presentes en cada una mostró que sus tamaños oscilan entre 10 kb y 1,3 kb. La especificidad de los insertos fue determinada por hibridación en "dot-blot" y en "Southern", demostrando que los fragmentos clonados son específicos del parásito ya que hibridaron con ADN del parásito pero no con ADN humano.

La hibridación en "Southern" mostró además que tres de los ocho fragmentos analizados son el mismo (38R: 174B: 79B), mientras que uno de ellos (8R), el cual mostró siempre un tamaño similar a estos tres fragmentos, resultó ser diferente (Fig. 8). El fragmento altamente representado fue hibridado con 200 colonias independientes que previamente habían dado fuerte hibridación con ADN total del parásito. De las 200 colonias, 36 dieron señal positiva (resultados no mostrados), lo cual indica que secuencias presentes en dicho fragmento se encontrarían también en varios de los fragmentos clonados, o que éste fragmento estaría clonado varias veces y correspondería a una secuencia altamente repetitiva en el genoma del parásito. Sin embargo, ninguno de los otros cinco fragmentos estudiados hibridó con dicha sonda, demostrando que ninguno de ellos posee secuencias homólogas a las presentes en el fragmento 38R (Fig. 8).

Siete fragmentos clonados fueron evaluados por hibridación en "dot-blot", con el fin de determinar el nivel de detección de ADN del parásito de cada uno. Cinco de ellos detectaron 0,1 ng, el cual fue el máximo nivel de detección obtenido, lo que corresponde a detectar 1000 parásitos en una muestra infectada. Este nivel de detección corresponde a una parasitemia de 0,002% en 10 ul de sangre, o una parasitemia de 0,0004% en 50 ul de sangre, nivel que estaría por debajo de los métodos más sensibles (64), pero por encima de los métodos usados en controles de vigilancia epidemiológica (33).

Varios grupos de investigadores han ensayado el método de diagnóstico enunciado, tratando las muestras de sangre de una forma sencilla (65). Es

necesario adoptar un método eficiente que puede ser similar a los ya descritos, para tratar las muestras de sangre infectadas y evaluar los fragmentos que hemos clonado, con el fin de adaptar éste tipo de diagnóstico en Colombia. De una forma similar, estos fragmentos también podrían ser usados para detectar poblaciones de mosquitos infectados. La adaptación de éste método de diagnóstico nos permitiría llevar a cabo estudios epidemiológicos en zonas rurales, donde se tomarían las muestras de sangre que serían procesadas en un laboratorio equipado adecuadamente, permitiendo de ésta forma realizar controles de vigilancia en poblaciones numerosas localizadas en zonas de alto riesgo. Se ha calculado que un buen microscopista puede leer 60 muestras por día, mientras que un técnico puede procesar 1 000 muestras en un día (35), lo que confirma la importancia de este tipo de diagnóstico.

Los fragmentos genómicos clonados se podrían usar para tratar de diferenciar por hibridación, entre cepas del parásito resistentes y sensitivas a diferentes drogas; al igual que determinar cuáles son específicas de *P. falciparum*, es decir cuáles están presentes en *P. falciparum* pero no en *P. vivax*, disponiendo de esta forma de fragmentos que contengan secuencias específicas de especie y poder diferenciar entre infecciones por *P. vivax* e infecciones por *P. falciparum*, las dos especies de *Plasmodium* más comunes en Colombia. Esto sería más viable si se dispone además de una biblioteca genómica de *P. vivax*.

Algo que facilitaría bastante el uso de éste método de diagnóstico, sería el remplazo del uso del material radioactivo, el cual es difícil de adquirir e incómodo de manipular. Usando biotina en vez de <sup>32</sup>P para marcar el ADN (66), hemos llegado a detectar 1 ng de ADN puro del parásito, nivel más bajo que el obtenido con <sup>32</sup>P, pero que se podría mejorar haciendo algunas variaciones a las técnicas de hibridación utilizadas hasta ahora.

Igualmente sería interesante hacer mezclas de sondas altamente sensitivas, con el fin de amplificar la señal de hibridación y por consiguiente aumentar el nivel de detección.

La biblioteca genómica construida, además de convertirse primordialmente en una herramienta indispensable para desarrollar un método de diagnóstico de la malaria en Colombia por hibridación molecular, es un material disponible muy importante para llevar a cabo estudios sobre la biología molecular del parásito.

#### Abreviaturas utilizadas

ADN:	ácido desoxirribonucleico
ARN:	ácido ribonucleico
cpm:	cuentas por minuto
Ci:	curios



dATP: deoxi-adenosin-trifosfato  
 EDTA: ácido etilendiamino tetra-acético  
 IPTG: isopropiltiogalactósido  
 kb: kilobases  
 LB: Luria Bertani  
 ug: microgramo  
 mg: miligramo  
 mmol: milimol

ng: nanogramo  
 pb: pares de bases  
 RNasa: ribonucleasa  
 SDS: dodecil-sulfato de sodio  
 TB: "terrific broth"  
 X-gal: 5-bromo-4-cloro-indolil-beta-D-galactósido

## BIBLIOGRAFIA

1. CHAPIN G., WASSERSTROM R. 1981. Agricultural production and malaria resurgence in Central America and India. *Nature* 293: 181.
2. SPENCER H. C., STRICKLAND G.T. 1984. Malaria. In: Strickland G.T. ed. *Hunter's Tropical Medicine*. 6th ed. Philadelphia: W.B. Saunders: 516.
3. DRAPER C. C., VOLLER A., CARPENTER R.G. 1972. The epidemiologic interpretation of serologic data in malaria. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 21 (5): 696.
4. S.E.M. Ministerio de Salud DCD (Colombia) 1987. Cuestionario Internacional O.P.S.
5. GOOD M.F., et al. 1986. Genetic control of the immune response in mice to a *P. falciparum* sporozoite vaccine. *J. Exp. Med.* 164: 655.
6. COLLINS W. E., et al. 1986. Immunization of Aotus monkeys with recombinant proteins of an erythrocyte surface antigen of *P. falciparum*. *Nature* 323: 259.
7. BALLOU W.R., et al. 1987. Safety and efficacy of a recombinant DNA *p. falciparum* sporozoite vaccine. *Lancet* i: 1277.
8. EGAN, J.E. et al. 1987. Efficacy of murine malaria sporozoite vaccines: implications for human vaccine development. *Science* 236: 453.
9. KLOTZ F.W., et al. 1987. Vaccination induced variation in the 140Kd merozoite surface antigen of *P. knowlesi* malaria. *J. Exp. Med.* 165: 368.
10. PERLMANN H., et al. 1987. Antibodies in human immune sera to amino acid repeats in Pf 155, a potential vaccine candidate antigen of the human malaria parasite *P. falciparum*. *Scand. J. Immunol.* 26: 325.
11. HERRINGTON D.A., et al. 1987. Safety and immunogenicity in man of a synthetic peptide malaria vaccine against *P. falciparum* sporozoite. *Nature* 328: 527.
12. GOOD M. F., et al. 1987. Construction of synthetic immunogen: use of a new T-helper epitope on malaria circumsporozoite protein. *Science* 235: 1059.
13. ASLUND L., et al. 1987. Synthetic gene construct expressing a repeated and highly immunogenic epitope of the *P. falciparum* antigen Pf 155. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 84: 1399.
14. PATARROYO M.E., et al. 1987. Induction of protective immunity against experimental infection with malaria using synthetic peptides. *Nature* 328: 629.
15. ———, et al., 1988. A synthetic vaccine protects humans against challenge with asexual blood stages of *P. falciparum* malaria. *Nature* 322: 158.
16. RUANGJIRACHUPORN W., et al. 1988. Monoclonal antibodies to a synthetic peptide corresponding to a repeated sequence in the *P. falciparum* antigen Pf 155. *Mol. Biochem. Parasitol.* (in press).
17. FREEMAN R.R., TREDJOSIEWICZ A.J., CROSS G.A.M. 1980. Protective monoclonal antibodies recognising stage-specific merozoite antigens of a rodent malaria parasite. *Nature* 284: 366.
18. PERRIN L.H., et al. 1981. Inhibition of *P. falciparum* growth in human erythrocytes by monoclonal antibodies. *Nature* 289: 301.
19. PERLMANN H., et al. 1984. Antibodies in malarial sera to parasite antigens in the membrane of erythrocytes infected with early asexual stages of *P. falciparum*. *J. Exp. Med.* 159: 1686.
20. WAHGIN B., et al. 1984. Human antibodies to a Mr 150 000 *P. falciparum* antigen efficiently inhibit merozoite invasion. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 81: 7912.
21. WALHGREN M., et al. 1986. Anti-*P. falciparum* antibodies acquired by residents in a holoendemic area of Liberia during development of clinical immunity. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 35: 22.
22. BERZINS K., et al. 1986. Rabbit and human antibodies to a repeated sequence of a *P. falciparum* antigen (Pf 155) react with the native protein and inhibit merozoite invasion. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 83: 1065.
23. DELORON P., et al. 1987. Antibodies to Pf 155 antigen of *P. falciparum*: measurement by cell-E-LISA and correlation with expected immune protection. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 37: 22.
24. ELLIS J., et al. 1983. Cloning and expression in *E. coli* of the malaria sporozoite surface antigen gene from *P. knowlesi*. *Nature* 302: 536.
25. ENEA V., et al. 1984. DNA cloning of *P. falciparum* circumsporozoite gene: amino acid sequence of a repetitive epitope. *Science* 225: 628.
26. YOUNG J.F., et al. 1985. Expression of *P. falciparum* circumsporozoite proteins in *E. coli* for potential use in human malaria vaccine. *Science* 228: 958.
27. MILLER L. H., et al. 1986. Research toward malaria vaccines. *Science* 234: 1349.
28. ANDERS R. F., et al. 1988. Antigen with repeated amino acid sequences from the asexual blood stages of *P. falciparum*. *Prog. Allergy* 41: 148.

29. AVRAHAM H., et al. 1982. A highly sensitive solid-phase radioimmunoassay for the assay of *P. falciparum* antigens and antibodies. *J. Immunol. Methods* 53: 61.
30. MACKEY L., MCGREGOR I.A., LAMBERT P.H. 1980. Diagnosis of *P. falciparum* infection using a solid phase radioimmunoassay for the detection of malaria antigens. *Bull. W.H.O.* 58: 439.
31. WILCOX A. 1960. Manual for the microscopical diagnosis of malaria in man. Publication no. PHS796. Washington, DC: U.S. Department of Health, education and welfare: 7-11.
32. BRUCE-CHWATT L. J. 1985. Diagnostic methods in malaria. In: Bruce Chwat L J, ed. *Essential mariology*. 2nd ed. London: William Heinemann Medical: 112-115.
33. MOLINEAUX L., GRAMICCIA G. 1980. The Garki project: research on the epidemiology and control of malaria in Sudan savanna of West Africa. Geneva. World Health Organization.
34. FRANZEN L., et al. (1984). Analysis of clinical specimens by hybridisation with probe containing repetitive DNA from *P. falciparum*. A novel approach to malaria diagnosis. *Lancet* i: 525.
35. BARKER R. H., et al. 1986. Specific DNA probe for the diagnosis of *P. falciparum* malaria. *Science* 231: 1434.
36. ENEA V., 1986. Sensitive and specific DNA for detection of *P. falciparum*. *Moll. Cell. Biology* 6: 321.
37. ZOLG J.W., ANDRADE L.E., SCOTT E.D. 1987. Detection of *P. falciparum* DNA using repetitive DNA clones as species specific probes. *Mol. Biochem. Parasitol.* 22: 145.
38. ESPINAL C.A., et al. 1982. Aislamiento y caracterización de cepas colombianas de *P. falciparum*. *Biomédica* 2: 118.
39. ———, et al. 1984. Suceptibility of different populations of Colombian Aotus monkeys to the FCB-1 strain of *P. falciparum*. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 33: 777.
40. TRAGER W., JENSEN J.B. 1977. *P. falciparum* in culture: use of outdated erythrocytes and description of the candle jar method. *J. Parasitol.* 63: 883.
41. ———. 1976. Human malaria parasites in continuous culture. *Science* 193: 673.
42. BELL J.I., KARAM J. M., RUTTER W. J. 1981. Polimorphic DNA region adjacent to the 5' end of the human insuline gene. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 78: 5759.
43. JACOB F., et al. 1960. L' opéron: groupe de genes a expresion coordonnée par un operateur. *C. R. Acad. Sci.* 250: 1727.
44. VIEIRA J., MESSING J. 1982. The pUC plasmids, an M13 mp7-derived system for insertion mutagenesis and sequencing with synthetic universal primers. *Gene* 19: 259.
45. MESSING, J. 1983. New M13 vectors for cloning. In: *Methods in Enzymology* (Wu R., Grossman L., Modave K. eds) Vol. 101: 20. Academic Press, New York.
46. YANISCH-PERRON C., VIEIRA J., MESSING J. 1985. Improved M13 phage cloning vectors and host strains: nucleotide sequences of the M13mp18 and pUC19 vectors. *Gene* 33: 103.
47. BIRBOIM H. C., DOLY J. 1979. A rapid alkaline extraction procedure for screening recombinant plasmid DNA. *Nucleic Acids Res.* 7: 1513.
48. ISH-HOROWICZ D., BURKE J. F. 1981. Rapid and efficient cosmid vector cloning. *Nucleic Acids Res.* 9: 2989.
49. TARTOF K. D., HOBBS C.A. 1987. Improved media for growing plasmid and closmid clones. *Focus. B. R. L.* 9 (2): 12.
50. RICKWOOD D., CHAMBERS J.A. 1984. Centrifugal methods for characterising macromolecules and their interactions. In: *Centrifugation* (ed. Rickwood D. 2nd edition) IRL Press, Oxford-washington D. C.: 95-122.
51. MANIATIS T., FRITSCH E.F., SAMBROOK J. 1982. *Molecular Cloning. A laboratory manual*. Cold Sprig Harbor Laboratory. Cold Spring Harbor, New York.
52. CHACONA G., VAN DER SANDE J.H. 1980. 5' 32P labeling of RNA and DNA restriction fragments. *Methods Enzimol.* 65: 75.
53. HANNAHAN D. 1983. Studies on transformation of *Escherichia coli* with plasmid. *J. Moll. Biol.* 166: 557.
54. GRUNSTEIN M., HOEGNESS D. 1975. Colony hybridization: a method for the isolation of cloned DNAs that contain a specific gene. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 72: 3961.
55. BENTON W. D., DAVIS R.W. 1977. Screening lambdabt recombinant clones by hybridization to single plaques in situ. *Science* 196: 180.
56. SOUTHERN E. 1975. Detection of specific sequences among DNA fragments separated by gel electrophoresis. *J. Moll. Biol.* 98: 503.
57. BRANDSMA J., MILLER G. 1980. Nucleic acid spot hybridization: rapid quantitative screening of lymphoid cell lines for Epstein-Barr viral DNA. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 77: 6851.
58. CHOW S., MERIGAN T.C. 1983. Rapid detection and quantitation of human cytomegalovirus in urine through DNA hybridization. *N. Engl. J. Med.* 308: 921.
59. RIGBY P. W. J. 1977. Labeling deoxyribonucleic acid to high specific activity in vitro by nick translation with DNA polymerasa I. *J. Moll. Biol.* 113: 237.
60. OQUENDO P., et al. 1986. Characterisation of a repetitive DNA sequence from the malaria parasite *Plasmodium falciparum*. *Mol. Bioch. Parasitol.* 18: 89.
61. ODINK K.G., et al. 1984. Cloning of malaria genes coding for high molecular weight antigens: isolation of fragments of *P. falciparum* genes coding for proteins of 14500 molecular weight. *Mol. Bioch. Parasitol.* 10: 55.
62. VAN DER PLOEG L. H. T., et al. 1985. Chromosome sized DNA molecules of *P. falciparum*. *Science* 299: 658.
63. CLARKE L., CARBON J. 1976. A colony bank containing synthetic colE1 hybrid plasmids representative of the entire *E. coli* genome. *Cell* 9: 91.
64. BRUCE-CHWATT L.J., 1984. DNA probes for malaria diagnosis. *Lancet* i: 795.
65. DRAPER C.C., et al., 1986. The use of DNA probes for malaria diagnosis: Memorandum from a WHO meeting. *Bull. W. H.O.* 64: 641.
66. GEBEYEU G., et al. 1987. Novel biotinylated nucleotide-analogs for labeling and colorimetric detection of DNA. *Nucleic Acids Res.* 15: 4513.

# ESTUDIO CLADISTICO EN LA FAMILIA IGUANIDAE (SAURIA-REPTILIA) CON BASE EN LA MUSCULATURA DEL MIEMBRO POSTERIOR\*

por

Julio Mario Hoyos\*\*

## Resumen

Hoyos, J.M.: Estudio cladístico en la familia Iguanidae (*Sauria: Reptilia*) con base en la musculatura del miembro posterior. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 543-558, 1990. ISSN 0370-3908.

El análisis de ejemplares de 10 especies de lagartos, 8 de Iguanidae (grupo propio) y 1 de Teiidae y 1 de Gekkonidae (grupo ajeno), hizo posible plantear 5 hipótesis de parentesco que permiten concluir que la familia Iguanidae no forma un grupo monofilético al no poder ser definida por un carácter común a todas las especies. Para fortalecer esta hipótesis se requiere estudiar otras características o ampliar el número de especies estudiadas.

## Introducción

La clasificación actual de los lagartos se basa en el trabajo realizado por Camp (1923) el cual los separa en dos grandes grupos a los cuales llama Divisiones: Autarchoglossa y Ascalabota. Estas se diferencian por el hecho de presentar o no presentar el m. rectus superficiales respectivamente.

Sin embargo, Moody (1983) propone abandonar esta clasificación debido a la confusión que tuvo Camp al creer que existía un m. rectus superficialis el cual, según Moody, es en realidad el m. rectus abdominis lateralis. Esto significa, que músculos que Camp supuso eran homólogos, en realidad no lo son. A pesar de esto, Moody no propone ninguna clasificación alterna.

La familia Iguanidae se encuentra dentro de la División Ascalabota. Los principales estudios en

Iguánidos han sido realizados por Etheridge (1960, 1964, 1966, 1967) quien se basa en el cráneo, esqueleto axial y el esqueleto de la cintura pectoral, para así llegar al establecimiento de grupos dentro de la familia y hallar relaciones de parentesco entre ellos.

Con base en lo anterior, este autor adhiere, a las subfamilias propuestas por Cope hacia 1900 (Añoñinae, Basciliscinae e Iguaninae) y a los grupos sin categoría taxonómica propuestos por Savage (1958) (Sceloporine e Iguanine), el grupo Tropidurine y deja sin categorías formales a las subfamilias ya anotadas. Corredor et al. (1985), proponen el nuevo grupo "Morunasaurine" con base en el descubrimiento de la especie *Morunasaurus groi* en Colombia. Todos estos grupos sólo están definidos parcialmente, como es el caso de Sceloporine e Iguanine (Savage, 1958), y sus relaciones de parentesco están vagamente presentadas y aún de manera incompleta. Etheridge (1964), propone una hipótesis de parentesco en forma de árbol filogenético (Fig. 1), pero como se ve es incompleta y poco clara pues incluye tan sólo géneros norteamericanos.

Es de destacar la poca literatura que se posee hasta hoy día acerca de la musculatura del miem-

\* Trabajo laureado Premio Academia de Ciencias del Tercer Mundo. Convocatoria 1987. Area Biología.

\*\* Profesor Unidad de Ecología y Sistemática, Departamento de Biología Universidad Javeriana, Apartado Aéreo 56710, Bogotá, D.E.

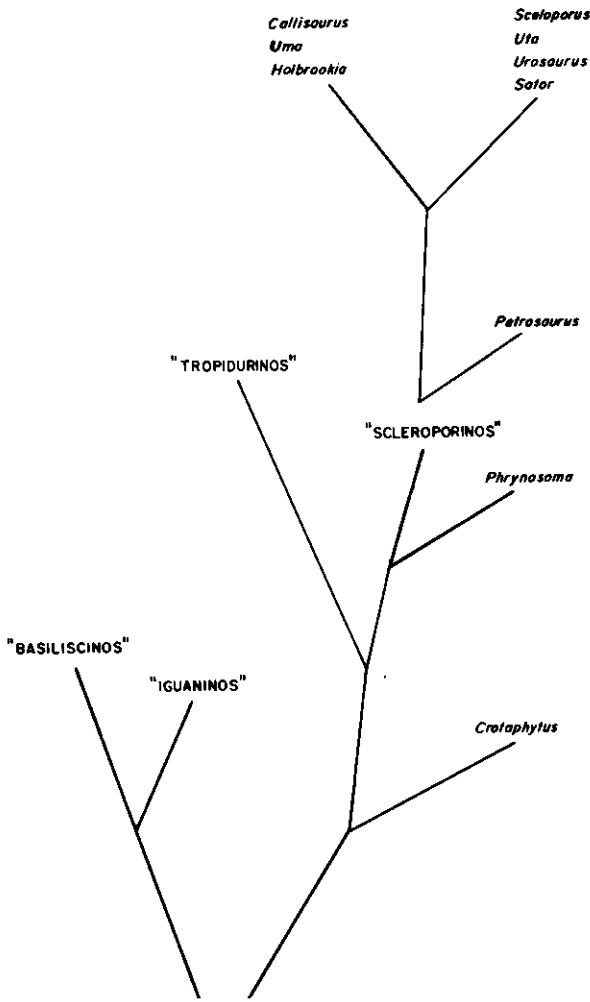


Figura 1. Posibles relaciones filogenéticas entre ciertos géneros de iguanidos y grupos genericos. (Tomado de Etheridge, 1964).

bro posterior en lagartos. Las principales publicaciones son de hace más de 30 años, sobresaliendo los trabajos de Haines (1934, 1935), Howell (1938, 1940), Schaeffer (1941), Romer (1942) y Snyder (1954).

A través de esta serie de trabajos se nota una divergencia de tipo nomenclatural en cuanto a la musculatura del miembro posterior se refiere que, aun cuando no es aguda, es importante de aclarar (Tabla 1). También existen diferencias en cuanto a la función del músculo, principalmente a nivel del muslo, pues en cuanto a los nombres y funciones a nivel de pierna concuerdan Snyder (1954) y Schaeffer (1941). Muchas de las investigaciones llevadas a cabo hasta el momento en la familia Iguanidae, han seguido los principios de la escuela sistemática evolutiva, en la cual el reconocimiento de los caracteres primitivos y derivados dependen de:

1. La experiencia del autor.
2. Cuan ampliamente está distribuido un carácter en los taxa objeto de estudio.
3. Los fósiles, pues, de acuerdo con lo que anotan Eldredge y Cracraft (1980), las características presentes en ellos son primitivas.

TABLA 1  
Sinonimias de los músculos  
del miembro posterior de lagartos. (Muslo)

GRUPO VENTRAL			
HAINES (1934)	HOWELL (1938)	ROMER (1942)	SNYDER (1954)
Puboischiotibialis.	Puboischiotibialis.	Puboischiotibialis I y II	Puboischiotibialis
Flexor tibialis inferior.	Flexor tibialis internus capita ventralis. Caudofemoralis longus y brevis.	Puboischiotibialis III	Flexor tibialis internus (cabeza posterior). Caudofemoralis longus y brevis.
Flexor tibialis genicularis.		Flexor tibialis internus II	Flexor tibialis internus (cabeza media).
Flexor intercapitalis posterioris.		Flexor tibialis internus I	Flexor tibialis internus (cabeza lateral).
Ambiens.	Pubotibialis anterioris. Pubotibialis medialis.	Ambiens.	Ambiens.
Flexor intercapitalis anterioris.		Pubotibialis.	Pubotibialis.
Adductor femoris.	Adductor femoris. Puboischiofemoralis.	Adductor femoris. Puboischiofemoralis externus. Puboischiofemoralis internus.	Adductor femoris. Puboischiofemoralis externus. Puboischiofemoralis internus.
GRUPO DORSAL			
Iliotibialis	Iliotibialis.	Iliotibialis.	Iliotibialis.
Iliofibularis	Iliofibularis.	Iliofibularis	Iliofibularis.
Flexor tibialis externus.	Flexor cruris capita dorsalis.	Flexor tibialis externus	Flexor tibialis externus.
Iliofemoralis.	Iliofemoralis.	Iliofemoralis.	Iliofemoralis.
Femorotibialis.	Femorotibialis. (vastus medialis y vastus lateralis).	Femorotibialis.	Femorotibialis.

Una escuela de la sistemática que trata de utilizar nuevos elementos para el análisis de los grupos es la cladística o escuela filogenética, la cual se basa en la conformación de conjuntos agrupados de organismos por similitudes por presencia de caracteres derivados (apomorfias) y compartición de éstos (sinapomorfias) por lo menos por dos taxa. Su objetivo fundamental es elaborar hipótesis de parentesco o, como lo expresan Eldredge y Cracraft (1980), hipótesis acerca de patrones de novedades evolutivas que se dan entre los organismos. Un cladograma expresa una hipótesis, no un hecho: una hipótesis de parentesco, una hipótesis de monofilia. Tan solo las sinapomorfias pueden justificar agrupaciones naturales de organismos porque sólo éstas pueden corroborar o refutar el status monofilético (natural) de estos organismos (Wiley, 1981).

El análisis de sinapomorfias comienza con el reconocimiento de similitudes, es decir, de supuestas homologías, y las sinapomorfias son reconocidas a su vez como hipótesis de caracteres derivados compartidos, porque un carácter es una hipótesis y se puede probar al tratar su congruencia o incongruencia con otros caracteres o estados de carácter (Watrous y Wheeler, 1981).

Lo básico para llevar a cabo un análisis cladístico se puede resumir en los siguientes puntos:

1. La evolución existe.
2. Las similitudes derivadas definen los grupos y así mismo los niveles jerárquicos.
3. Los ancestros son hipotéticos.

#### 4. La clasificación debe ser consistente con las hipótesis de parentesco.

La familia Iguanidae no ha sido definida hasta el momento de manera tal que pueda considerarse como un grupo monofilético pues su caracterización se basa en gran parte en rasgos ausentes y en rasgos que poseen la mayoría de los géneros o especies que la conforman, por lo que es muy probable que estén utilizando similitudes primitivas (simpleiomorfias) y falsas similitudes derivadas. Así, a través del análisis cladístico, y tomando como base caracteres no manejados hasta el momento para la sistemática del grupo, se presentan y discuten aspectos relacionados con los parentescos dentro de la familia, así como si realmente podemos afirmar de manera contundente que esta familia de lagartos es un grupo natural. De esta manera, se adopta un nuevo punto de vista acerca del posible monofiletismo de la familia.

#### Materiales y métodos

Se utilizaron ejemplares representativos de las especies correspondientes a tres familias de lagartos: 8 especies de la familia Iguanidae, una de la familia Gekkonidae y una de la familia Teiidae. Las especies de estas últimas dos familias se utilizaron como grupo ajeno dentro del análisis cladístico. La distribución del número de ejemplares por familia y especies se presenta en la Tabla 2, así como la relación de los ejemplares de cada sexo por especie.

TABLA 2  
Distribución del número de ejemplares por especie y por sexo

Familia	Grupo	Especie	Sexo	
			M	H
Iguanidae	Anoline	<i>Phenacosaurus heterodermus</i>	5	5
Iguanidae	Anoline	<i>Anolis apollinaris</i>	1	1
Iguanidae	Iguanine	<i>Iguana iguana</i>	1	1
Iguanidae	Basiliscine	<i>Basiliscus basiliscus</i>	3	1
Iguanidae	Tropidurine	<i>Tropidurus hispidus</i>	3	1
Iguanidae	Tropidurine	<i>Stenocercus trachycephalus</i>	2	3
Iguanidae	Sceloporine	<i>Crotaphytus collaris</i>	1	—
Iguanidae	Morunasaurine	<i>Morunasaurus groi</i>	2	—
Gekkonidae		<i>Thecadactylus rapicaudus</i>	1	2
Teiidae		<i>Cnemidophorus lemniscatus</i>	2	1

M = Machos

H = Hembras

Todos los ejemplares utilizados fueron adultos, y se hicieron observaciones, cuando fue posible, en machos y hembras de cada especie con el fin de tener en cuenta las posibles variaciones intraespecíficas que nos pudieran definir dimorfismos sexuales.

De todas las especies se hicieron disecciones a niveles superficial y profundo determinándose el lugar de origen y el lugar de inserción de cada músculo, así como su disposición en cada región del miembro. Igualmente se realiza una breve descripción de cada músculo a nivel dorsal y ventral.

La observación clara de los músculos, fascias y tendones se logró utilizando un colorante que es una variación de Weigert de la solución de lugol (Bock y Shear, 1972). La realización de los dibujos se llevó a cabo a través de una cámara lúcida adaptada a un microscopio estereoscópico Wild M5, para así obtener las proporciones reales del tamaño de los músculos, así como la disposición precisa de los mismos.

Los ejemplares fueron facilitados por el Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural (ICN—MHN) de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá; el INDERENA (IND), a través de la Unidad de Investigación Federico Medem, y Luis Malaret (LM), cuya colección de *Crotaphytus collaris* se encuentra depositada en la sección de Suero antiofídico del Instituto Nacional de Salud.

La nomenclatura utilizada en este trabajo se basa en la adoptada por Snyder (1954), la cual se basa en los lugares de origen e inserción y en la función de los músculos.

Para el análisis cladístico se utilizó el método de comparación de grupo ajeno para análisis de caracteres.

Para esto se requiere del estudio de un grupo propio (in group) con el fin de establecer la polaridad de los caracteres (primitivos y derivados) y con base en ellos elaborar hipótesis de parentesco.

Como grupo propio se utilizó la familia Iguanidae, y como grupo ajeno (out group) especies de las familias Gekkonidae y Teiidae.

El objetivo fundamental es encontrar características que nos permitan agrupar por similitudes a las especies del grupo propio. Para hallarlas, se procede de la siguiente manera:

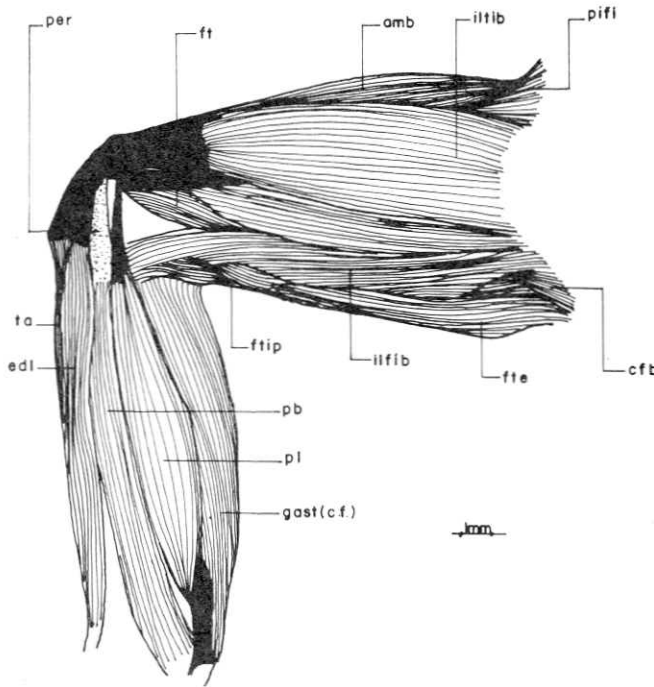
Los estados de carácter hallados tanto en el grupo propio como en el grupo ajeno son plesiomórficos (primitivos), y aquellos que se encuentran tan solo en el grupo propio son apomórficos (derivados). Cuando se encuentra un estado de carácter en todos los taxa del grupo propio, y su homólogo en el grupo ajeno, el primero se considera atributo del grupo propio. Si los dos estados de carácter se presentan tanto en grupo propio como en grupo ajeno, no se puede definir la polaridad de éste. Por este método no se puede encontrar polaridad para caracteres con más de dos estados de carácter, principalmente por la dificultad de determinar las homologías entre los caracteres y por lo tanto imposibilitaría el hacer hipótesis acerca de cuál estado de carácter es primitivo y cuál derivado, llevándonos entonces a analizar gran cantidad de homoplasias (convergencias y paralelismos) imposibles de probar, y para las cuales sólo habría explicaciones.

**Resultados**

A continuación se describe la musculatura del miembro posterior tomando como modelo un ejemplar de *Morunasaurus groi*.

**Muslo**

**Región dorsal superficial (Fig. 2)**



**Figura 2.** Región dorsal superficial de la musculatura del miembro izquierdo de *Morunasaurus groi*, ICN-6105.

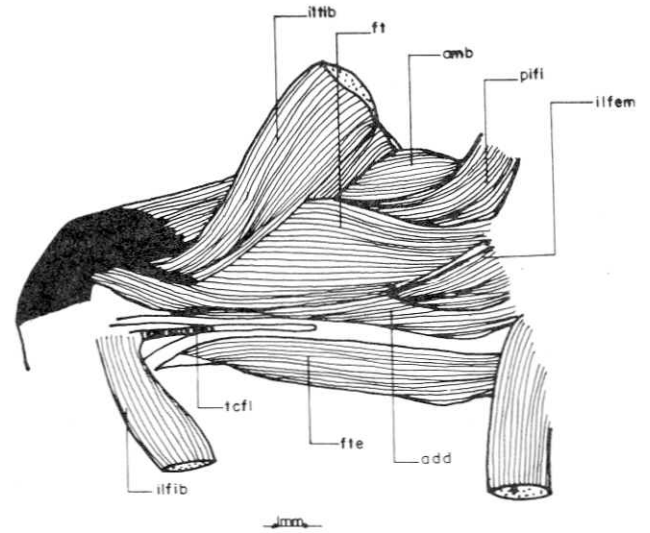
El m. iliotibialis es el más destacado de esta región por ser el de mayor tamaño, disponiéndose paralelo al eje horizontal del muslo en la región anterodorsal entre el m. ambiens y el m. iliofibularis, con su origen a lo largo de la cresta ilíaca por medio de un tendón ancho y aplanado, y su inserción en la porción proximal de la tibia a través de la aponeurosis del m. femorotibialis, músculo al cual no cubre totalmente en la zona distal.

El m. iliofibularis es delgado, dispuesto paralelamente al m. iliotibialis y localizado posterodorsalmente entre éste y el m. flexor tibialis internus. Se origina en la cresta ilíaca bajo la aponeurosis del m. iliotibialis por un tendón corto, y se inserta en el borde dorsal del primer tercio fibular, pasando bajo el m. peroneus longus.

El m. flexor tibialis externus es aplanado, dispuesto entre el m. iliofibularis y el m. flexor tibialis internus posterioris en el borde posterodorsal del muslo. Gran parte de él se observa superficialmente, pero distalmente se ve de manera más clara al remover el m. iliofibularis; se origina en la porción posterior proximal del ligamento ilioischiadicus y se inserta en la parte proximal y posterior de la tibia por medio de un tendón corto; a los tarsales lo

hace por medio de un tendón largo y delgado que se dispone en medio de los mm. gastrocnemius, a los cuales está íntimamente ligado.

**Región dorsal profunda (Fig. 3)**



**Figura 3.** Región dorsal profunda de la musculatura del muslo del miembro izquierdo de *Morunasaurus groi*, ICN-6105.

El m. femorotibialis es el más voluminoso de todos los que conforman el miembro posterior. Cubre las zonas anterodorsal, anterior, ventral y aún la posterior del fémur, por lo que podemos decir que este músculo “forra” este hueso casi en su totalidad desde su origen carnoso en la proximidad de su cabeza femoral bajo el m. iliotibialis y el m. ambiens, y entre el m. iliofemorales y el m. puboischiofemorales internus, hasta su inserción en la parte proximal de la tibia por medio de la aponeurosis del m. femorotibialis.

El m. iliofemorales es corto, a manera de triángulo, originándose en la lámina ilíaca bajo la porción proximal del fémur, medial al femorotibialis el cual, junto con el primero, lo recubren de tal manera que para su observación es necesario remover la porción proximal del m. iliotibialis y levantar un poco también la porción proximal del m. femorotibialis.

**Región ventral superficial. (Fig. 4)**

El m. puboischiotibialis es ancho y delgado, presentándose en forma de lámina simple cubriendo más del 70% de la superficie ventral del muslo; está dispuesto entre el m. ambiens y el m. flexor tibialis internus posterioris, y tiene su origen a lo largo del ligamento ischiopubicus, insertándose finalmente en la columna medial del primer tercio de la tibia por medio de un tendón corto y ancho.

El m. ambiens es relativamente voluminoso, situado anteroventralmente y cubierto parcialmente por el m. puboischiotibialis. Está formado por dos porciones, una de las cuales es totalmente su-

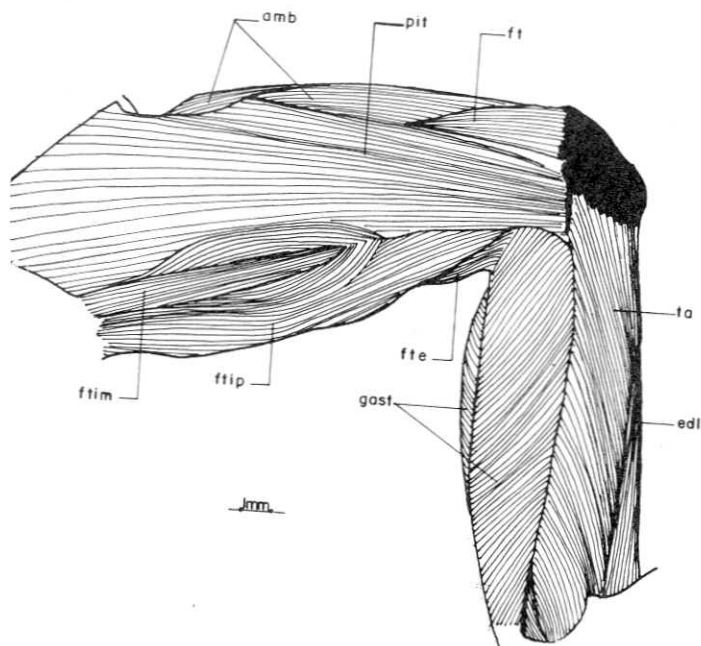


Figura 4. Región ventral superficial de la musculatura del miembro izquierdo de *Morunasaurus groi*, ICN-6105.

perficial y la otra parcialmente profunda, que se presentan como entidades discretas en la mayor parte del recorrido pero que distal y proximalmente fusionan sus fibras para lograr así unos lugares de origen e inserción comunes. El m. ambiens se presenta separado del m. ilirotibialis en el primer tercio de su longitud, pero luego se fusionan por acción de la prolongación de la aponeurosis del m. femorotibialis. Se origina en el borde externo del pubis, cerca a la fosa glenoidea, y se inserta en la zona proximal de la tibia a través de la aponeurosis ya anotada, formando parte así del triceps femoris junto con el m. femorotibialis y el m. ilirotibialis. El m. flexor tibialis internus posterioris es ancho, y recorre todo el borde posteroventral del muslo, siendo observable superficialmente en su totalidad; está localizado entre el m. puboischiotibialis y el m. flexor externus. Se origina en la parte posterior del ligamento ilioischiadicus y se inserta en la columna medial proximal de la tibia, conjuntamente con el m. puboischiotibialis al cual está fusionado distalmente.

#### Región ventral profunda. (Figs. 5 y 6)

El m. flexor tibialis internus medialis es bastante ancho, va ligeramente diagonal al eje del muslo; está cubierto por el m. puboischiotibialis casi en su totalidad, observándose tan solo de manera superficial la porción proximal entre éste y el m. flexor tibialis internus posterioris. Está localizado posteroventralmente, con su origen en el borde posterior del isquion hacia la zona ventral del mismo, y su inserción en el borde posterior proximal de la tibia y en el cóndilo tibial. El m. flexor tibialis internus lateralis se encuentra dorsal al m. flexor tibialis internus medialis como un músculo delgado y reco-

riendo el muslo paralelo al eje. Se origina en el borde posterior del isquion, dorsal al m. flexor tibialis internus medialis, y se inserta en la parte proximal posterior de la tibia por un tendón común al m. pubotibialis.

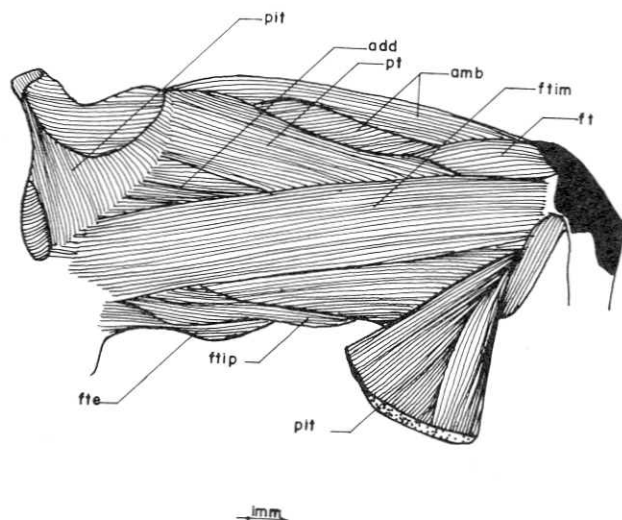


Figura 5. Región ventral profunda de la musculatura del miembro izquierdo de *Morunasaurus groi*, ICN-6105.

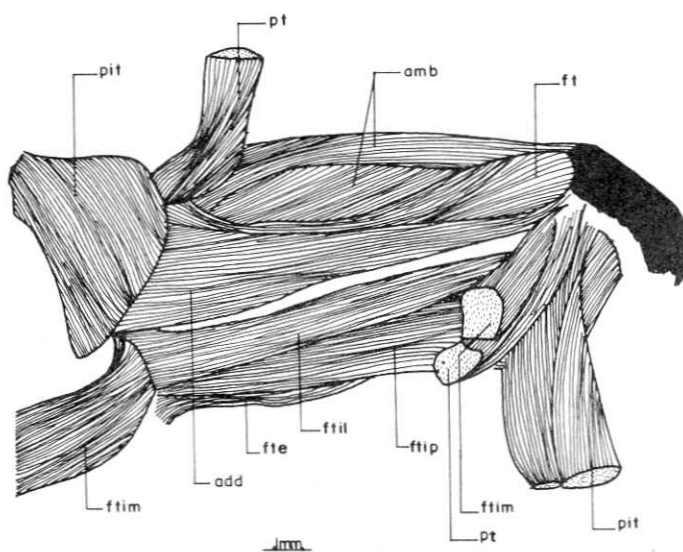


Figura 6. Región ventral profunda de la musculatura del muslo del miembro izquierdo de *Morunasaurus groi*, ICN-6105.

El m. pubotibialis es ancho; se dispone a través de la zona medial del muslo en la región anteroventral profunda del mismo, entre el m. adductor femoral y el m. ambiens pero más distal de la fosa glenoidea que éste, y se inserta en el borde posterior de la región proximal de la tibia por un tendón corto pero común para el m. flexor tibialis internus lateralis.

El m. adductor femoral se presenta a manera de triángulo, cubierto por el m. flexor tibialis internus medialis hacia la parte posteroventral, y por el m. pubotibialis hacia la zona anteroventral tanto



proximal como distalmente por lo que, al remover el m. puboischiotibialis, sólo se logra observar una pequeña parte del músculo. Su origen está en el ligamento ischiopubicus bajo el m. puboischiotibialis, y su inserción se da a través de la mayor parte de la columna femoral interna "cortando" así parte de la inserción del m. femorotibialis, y limitando proximalmente con las inserciones del m. iliofemoralis y del m. puboischiofemoralis internus.

El m. caudofemoralis longus, tomando parte más funcional que estructuralmente, se origina en las vértebras caudales y se inserta en el trocánter femoral, incluyendo la fosa trocánterica, por un ancho tendón, formando éste entonces una inserción primaria, y por una inserción secundaria entre la tibia y el fémur a la cápsula de articulación de la rodilla por medio de un tendón largo y delgado.

El m. caudofemoralis brevis también proviene de las vértebras caudales y se inserta al mismo punto de inserción primaria del músculo anterior. Se dispone entre el m. iliofibularis y el m. flexor tibialis externus.

El m. puboischiofemoralis externus es ancho, en forma de abanico. Se origina externamente en el pubis e isquion, incluyendo el borde púbico y el foramen obturador así como la protuberancia púbica, y se inserta al trocánter femoral cerca del punto de inserción de los mm. caudofemoralis longus y brevis.

El m. puboischiofemoralis internus es también ancho; limita el borde púbico con el m. puboischiofemoralis externus y externamente pasa por entre el m. ambiens y el m. iliotibialis. Su origen se da en la parte interna del pubis y del isquion, y su inserción en el primer tercio proximal del fémur, cubriendo en su recorrido parte de la fase ventral proximal del mismo.

## Pierna

### Región dorsal. (Fig. 2)

El m. extensor digitorum longus es delgado, dispuesto anterodorsalmente y paralelo al peroné. Se origina en la fase anterior del cóndilo externo del fémur por medio de un tendón largo y angosto, y se inserta por dos tendones cortos, cada uno de los cuales va a los metatarsianos 2 y 3 en sus fases laterales proximales, siendo el tendón de inserción del segundo metatarsiano angosto y el que va al 3o. ancho.

El m. peroneus brevis es de aspecto rollizo, localizado entre el m. extensor digitorum longus y el m. peroneus longus recorriendo la pierna diagonal a su eje. Se origina carnosamente a partir de las tres cuartas partes distales de la columna fibular a la cual está fusionada en la mayoría de su recorrido, y se inserta en la parte proximal del 5o. metatarsiano, bajo la aponeurosis plantaris.

El m. peroneus longus se presenta a manera de huso en la parte postero-dorsal de la pierna, entre el m. peroneus brevis y el m. gastrocnemius caputum fibulare. Se origina en la fase lateral del cóndilo externo del fémur, cerca al punto de origen del m. extensor digitorum longus, por medio de un tendón largo y angosto, y se inserta por otro tendón fuerte a través de la aponeurosis plantaris a la parte distal del 5o. metatarsiano.

### Región ventral. (Fig. 4)

El m. tibialis anterioris está íntimamente ligado a la parte anterior de la tibia y también a la parte posterior, tomando un aspecto rollizo a lo largo de toda la tibia hasta su inserción en la parte proximal del primer metatarsiano.

### Región posterior superficial. (Fig. 4)

Está formada por un par de músculos voluminosos que se originan por tendones cortos. Estos son:

El m. gastrocnemius caputum fibulare que se localiza hacia la zona posterodorsal de la pierna, ubicándose entre el m. peroneus longus y el m. gastrocnemius caputum tibialis. Se origina en el cóndilo lateral del fémur y de una pequeña porción distal de la columna femoral por medio de una lámina fascia, bajo la aponeurosis del m. femorotibialis, y se inserta a través de un tendón fuerte a la parte ventral del 5o. metatarsiano (hamate process).

El m. gastrocnemius caputum tibialis se localiza posteroventralmente, originándose en el cóndilo lateral del fémur en su fase interna e insertándose en el "hamate process" del 5o. metatarsiano, bajo la aponeurosis plantaris.

Distalmente los mm. gastrocnemius se fusionan por medio de un ligamentum laciniatum, el cual es una estructura aponeurósica.

### Región posterior profunda. (Fig. 7)

El m. flexor digitorum longus está compuesto por dos porciones entre la tibia y el peroné, siendo una de ellas más ancha que la otra y poseyendo un tendón por porción. Se origina en la parte proximal de la fíbula y en la parte interna de los cóndilos femorales; se inserta en la punta de las falanges distales por medio de largos tendones que parten desde un punto de fusión bajo la aponeurosis plantaris y los mm. extensores digitorum brevis.

El m. pronator profundus es en forma de abanico, dispuesto bajo el m. flexor digitorum longus. Se origina en más de las tres cuartas partes distales del peroné, y se inserta, a través de una aponeurosis, a la base del pie en el astrágalo-calcáneo, y en la parte proximal del primer metatarsiano.



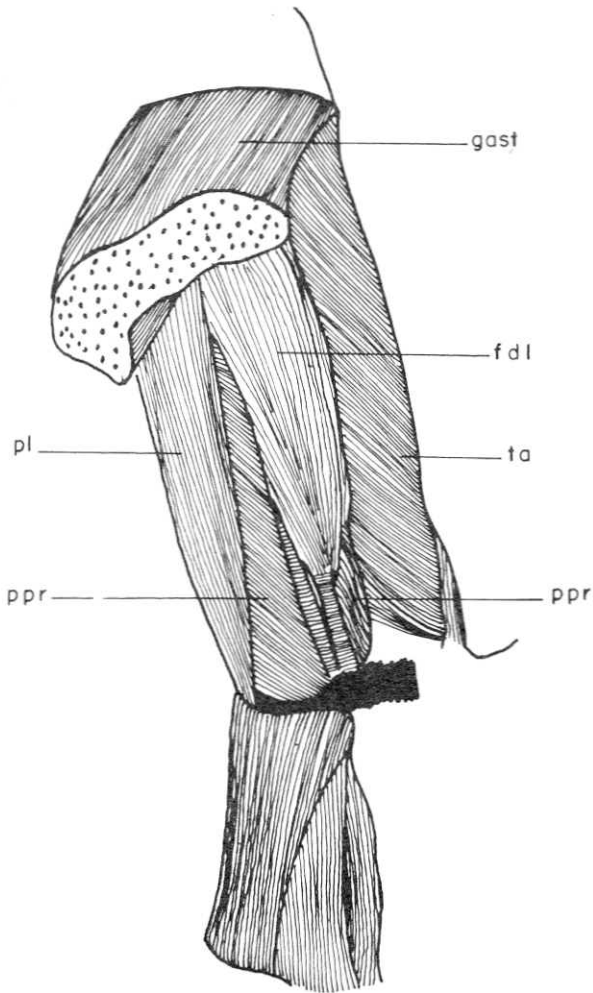


Figura 7. Región posterior profunda de la musculatura de la parte posterior de la pierna del miembro izquierdo de *Morunasaurus groi*, ICN-6105.

Pie

Región dorsal. (Fig. 8)

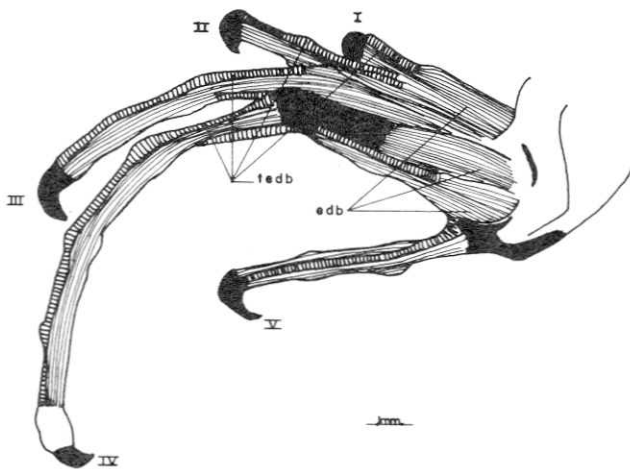


Figura 8. Musculatura dorsal del pie del miembro izquierdo de *Morunasaurus groi*, ICN-6105.

Los mm. extensores digitorum brevis son pequeños. Se originan en los elementos tarsianos proximales y, como la mayor parte de la capa dorsal, envían largos tendones, uno a cada dedo, para inser-

tarse en las puntas de las falanges distales, a través del borde dorsal de los dedos.

Región ventral. (Fig. 9)

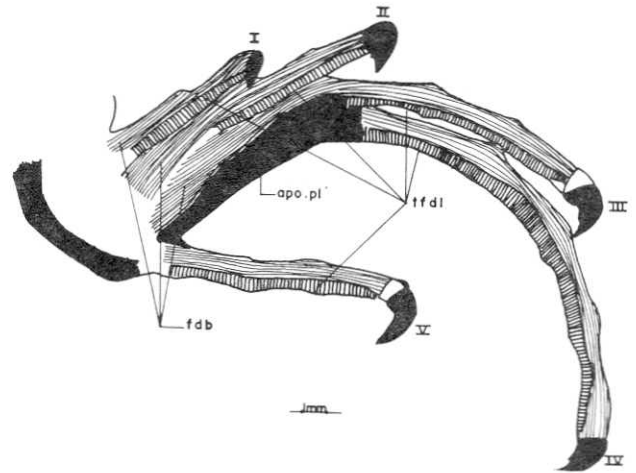


Figura 9. Musculatura ventral del pie del miembro izquierdo de *Morunasaurus groi*, ICN-6105.

Los mm. flexores digitorum brevis se originan ventralmente de los elementos tarsianos proximales bajo la aponeurosis plantaris, y se insertan lateralmente a falanges diferentes en cada dedo, excepto el 5o. dedo al cual no van tendones de articulación de estos músculos.

En ninguna especie hubo variación intraespecífica, y en aquellas en que hubo posibilidad de examinar machos y hembras tampoco se halló dimorfismo sexual. La prueba de esto se logró con base en el análisis de 10 ejemplares de *Phenacosaurus heterodermus*.

A partir del estudio morfológico, se logró identificar una serie de características las cuales se utilizarán como base para elaborar las hipótesis de parentesco.

Se identificaron 10 características, cada una de ellas con dos estados de carácter y distribuidas así dentro de las especies tanto del grupo ajeno como del grupo propio:

Carácter A: Corresponde a la división del m. puboischiotibialis.

Este músculo está formado por dos porciones en *Stenocercus trachycephalus* y en *Tropidurus hispidus*: una anteroventral o puboischiotibialis I y otra posteroventral o puboischiotibialis II, siendo la porción I aproximadamente de la mitad del ancho de la II (Figs. 10 y 11). Proximalmente la porción I se fusiona con el m. pubotibialis a nivel de la fosa glenoidea, y distalmente se fusiona con la porción II para insertarse por un tendón común a la tibia. En las demás especies este músculo está formado por una sola lámina.

Carácter B: División del ambiens.

En *T. hispidus*, *Iguana iguana*, *Anolis apollinaris*, *Phenacosaurus heterodermus* y *Thecadactylus rapicaudus* el m. ambiens se presenta sencillo; en las demás especies es doble (Figs. 12 y 13).

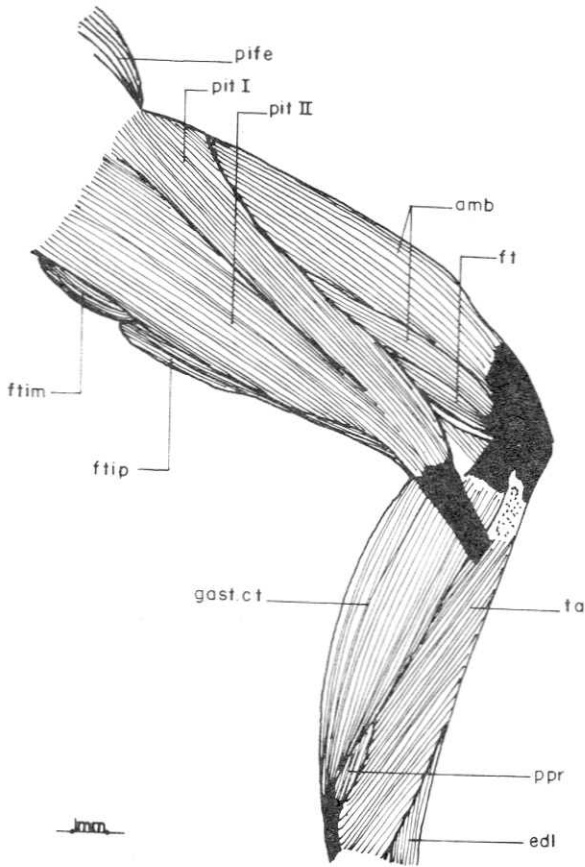


Figura 10. Musculatura superficial del miembro izquierdo, en su aspecto ventral, de *Stenocercus trachycephalus* (ICN-6252) en donde se muestran los puboischiotibialis I y II (pit I y II).

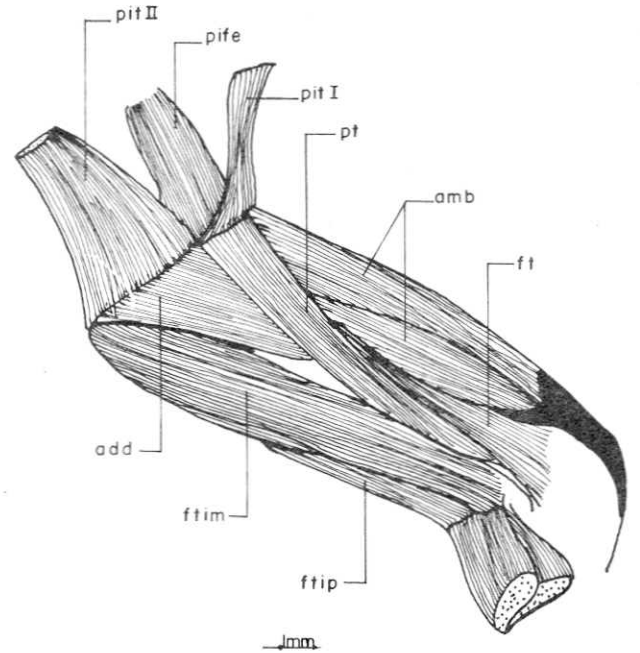


Figura 12. Aspecto ventral de la musculatura profunda del muslo del miembro izquierdo de *Stenocercus trachycephalus* (ICN-6252) en el que se muestra el músculo ambiens (amb.) formado por dos porciones.

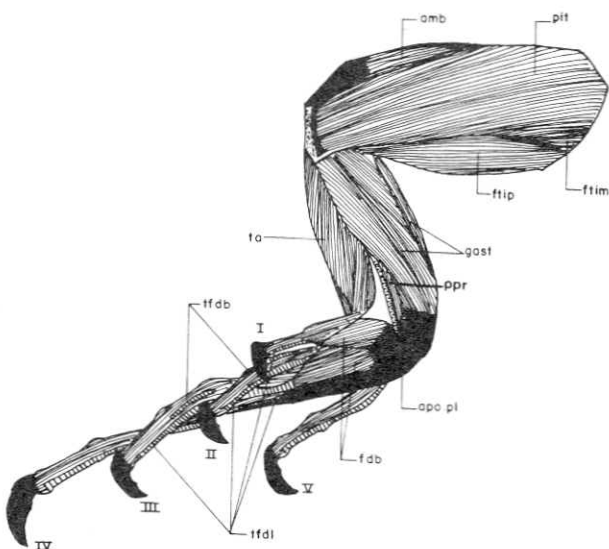


Figura 11. Aspecto ventral de la musculatura superficial del miembro derecho de *Iguana iguana* (ICN-6300) en el que se presenta el m. puboischiotibialis como una sola lámina. XI.

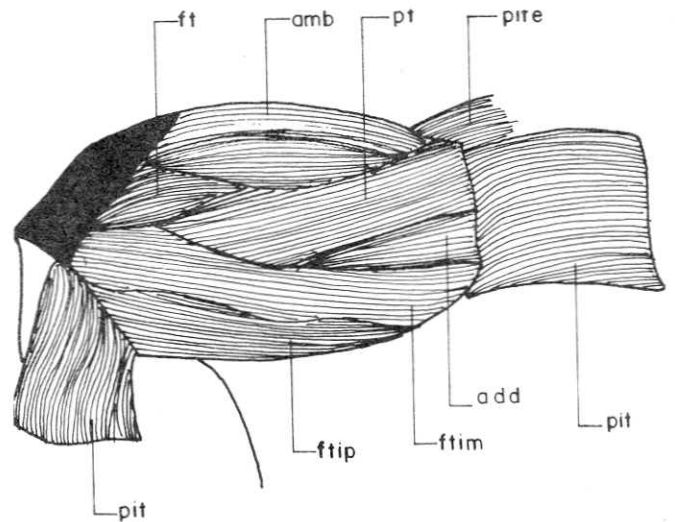


Figura 13. Aspecto ventral de la musculatura profunda del muslo del miembro izquierdo de *Iguana iguana* (ICN-6300) en el que se muestra el músculo ambiens (amb.) sencillo. XI.

Carácter C: Longitud del m. adductor femoris.

El m. adductor femoris es corto en *T. hispidus* e *I. iguana* y su inserción ocupa la mitad proximal de la fase interna del fémur; en las demás especies es largo (Figs. 14 y 15).

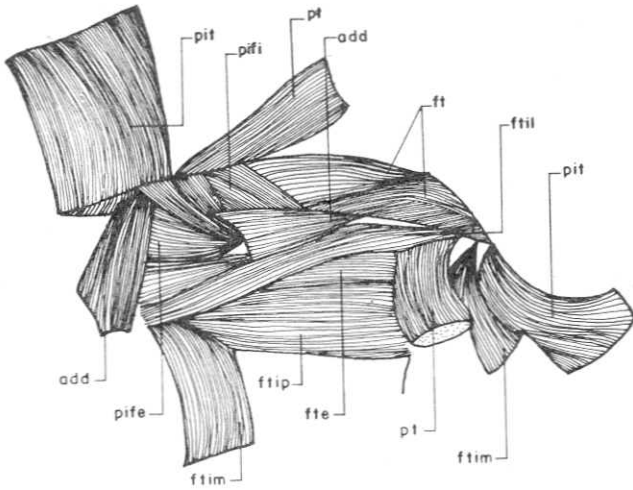


Figura 14. Aspecto ventral de la musculatura profunda del muslo del miembro izquierdo de *Iguana iguana* (ICN-6300), en el que se muestra el m. adductor femoris (add.) corto. XI.

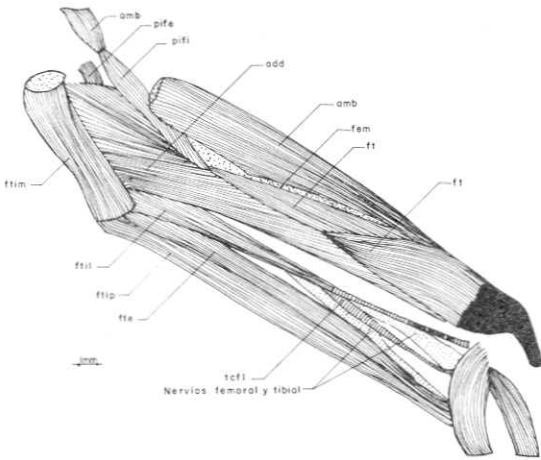


Figura 15. Aspecto ventral de la musculatura del muslo del miembro izquierdo de *Anolis apollinaris* (ICN-6253), donde se observa el adductor femoris largo.

Carácter D: Disposición de los mm. gastrocnemius.

Las dos cabezas del m. gastrocnemius corren paralelas en *P. heterodermus* y *A. apollinaris*, mientras que en las demás especies se cruzan distalmente (Figs. 16 y 17).

Carácter E: Recubrimiento del femorotibialis.

El m. femorotibialis cubre parcialmente el fémur en *Anolis apollinaris* y *Cnemidophorus lemniscatus*, mientras que en las demás especies lo recubre en su totalidad (Figs. 18 y 19).

Carácter F: Corresponde a las características del tendón de inserción del pubotibialis.

En *Anolis apollinaris* y *Basiliscus basiliscus* el tendón es largo y angosto; en las demás especies es corto y ancho (Figs. 20 y 21).

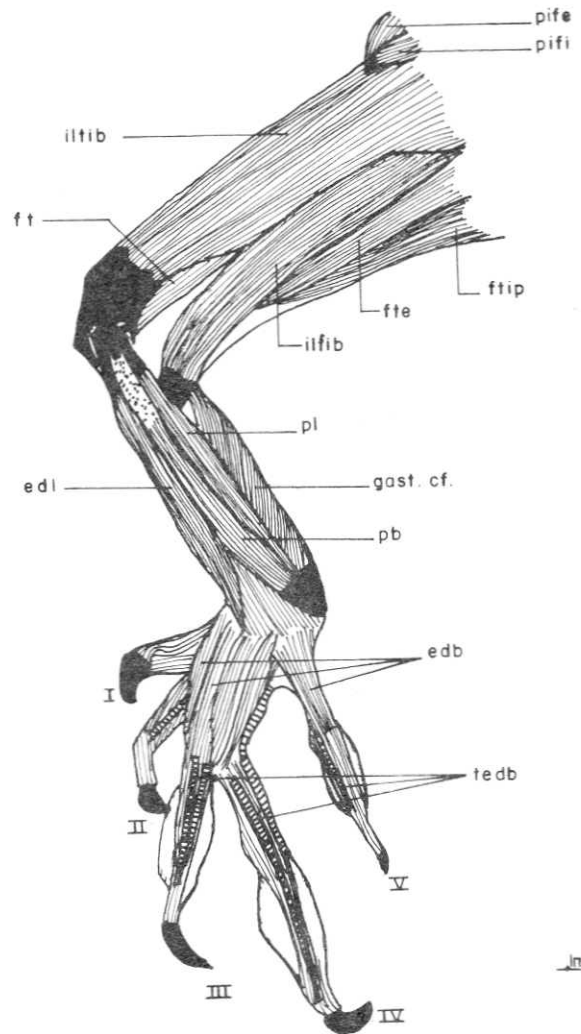


Figura 16. Aspecto dorsal de la musculatura superficial del miembro izquierdo de *Phenacosaurus heterodermus* (ICN-6247), en el que se muestra la cabeza fibular del m. gastrocnemius (gast. cf.), la cual corre paralela a la cabeza tibial del mismo.

Carácter G: Inserción del m. puoischiotibialis.

La inserción de este músculo en *Phenacosaurus heterodermus* y en *Anolis apollinaris* se presenta en el borde o columna anterior de la tibia por medio de un tendón largo y angosto; en las demás especies la inserción es en la columna medial de la tibia y el tendón es más corto (Figs. 22 y 23).

Carácter H: Este corresponde a las características del flexor digitorum longus el cual en *Tropidurus hispidus*, *Anolis apollinaris* y *Phenacosaurus heterodermus* posee un ensanchamiento tal que puede observarse externamente entre el m. gastrocnemius capitum tibialis y el m. tibialis anterioris. En las demás especies es más angosto y totalmente interno (Figs. 24 y 25).

Carácter I: Extensión del m. pronator profundus.

Aparte de *Crotaphytus collaris*, *Cnemidophorus lemniscatus* y *Thecadactylus rapicaudus*, en las demás especies el m. pronator profundus se presen-

ta externo distalmente para insertarse en la parte distal del primer metatarsiano (Figs. 26 y 27).

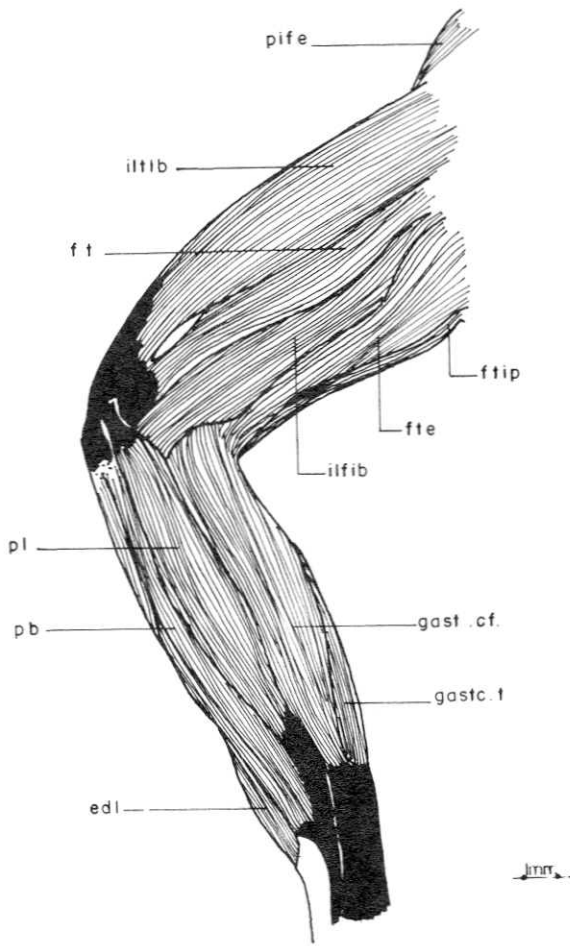


Figura 17. Aspecto dorsal de la musculatura superficial del miembro izquierdo de *Stenocercus trachycephalus* (ICN-6252) en el que se presentan las dos cabezas del m. gastrocnemius (gast. cf. y gast. ct.) cruzadas distalmente en la pierna.

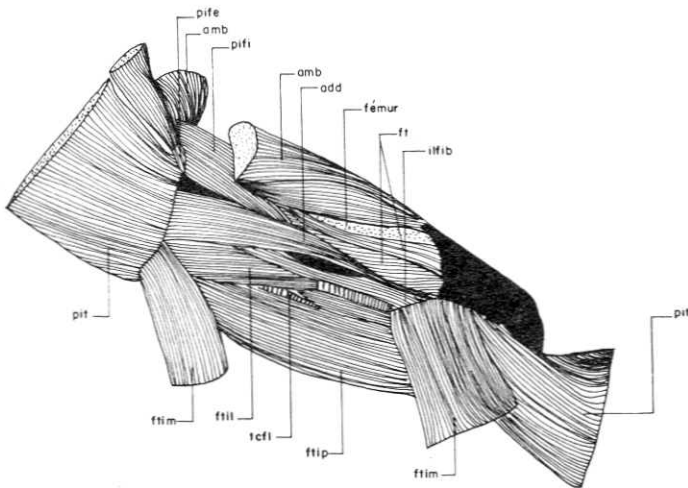


Figura 18. Aspecto ventral de la musculatura profunda del muslo del miembro izquierdo de *Cnemidophorus lemniscatus* (IND-R 1181), en el que se presenta el m. femorotibialis (ft) recubriendo parcialmente el fémur.

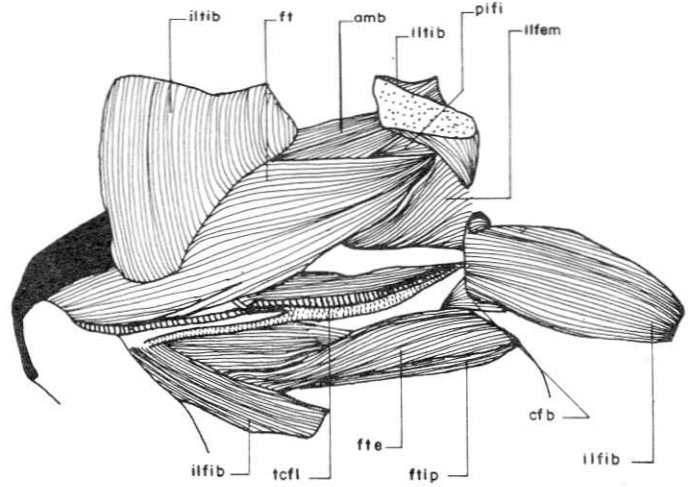


Figura 19. Aspecto dorsal de la musculatura profunda del muslo del miembro izquierdo de *Tropidurus hispidus* (IND-R2382), en el que se muestra el recubrimiento total del fémur por parte del m. femorotibialis (ft).

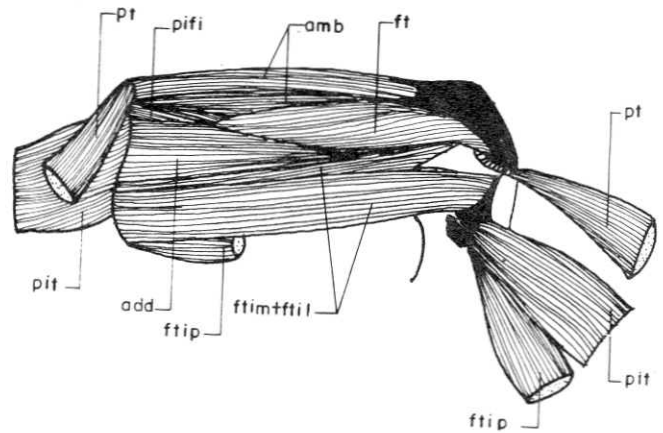


Figura 20. Aspecto ventral de la musculatura del miembro izquierdo de *Basiliscus basiliscus* (IND-R3116), en el que se observa el tendón largo por medio del cual se inserta el m. pubotibialis (pt). X2.

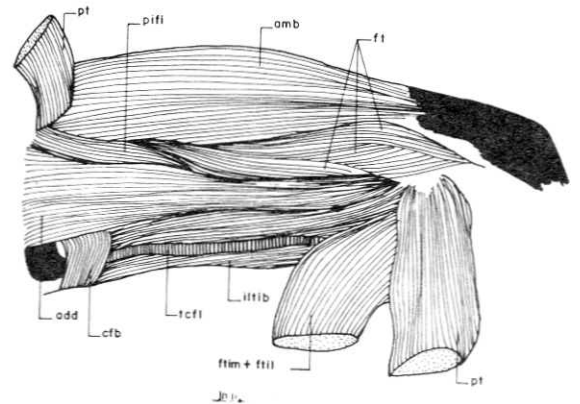


Figura 21. Aspecto ventral de la musculatura del miembro izquierdo, en su zona profunda, de *Crotaphytus collaris* (LM-698), en el que se aprecia la inserción del m. pubotibialis (pt) (cortado).



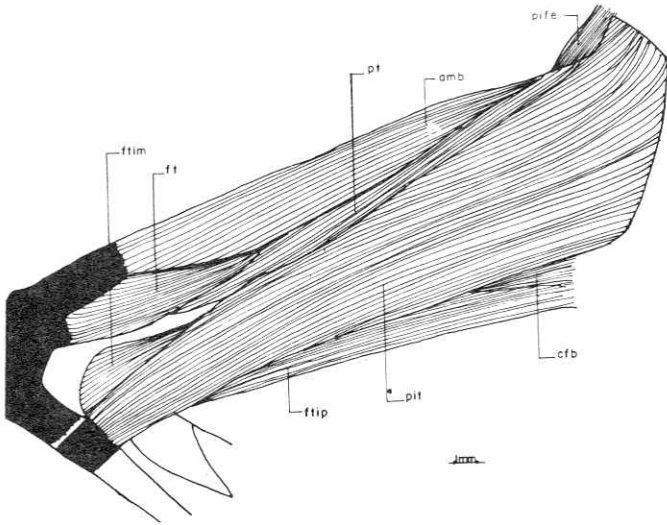


Figura 22. Aspecto ventral de la musculatura superficial del muslo del miembro derecho de *Anolis apollinaris* (ICN-6253), en el que se aprecia la inserción del m. pu-boischiotibialis (pit) en el borde anterior de la tibia.

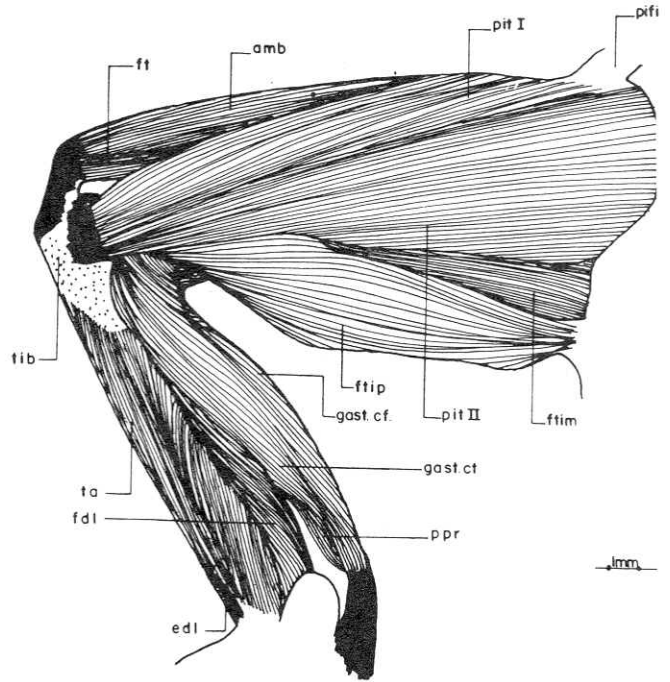


Figura 24. Aspecto ventral de la musculatura superficial del miembro derecho de *Tropidurus hispidus* (IND-R 2382). En la figura se observa el m. flexor digitorum lon-gus (fdl) claramente sin haber sido removido ninguno de los músculos de la pierna.

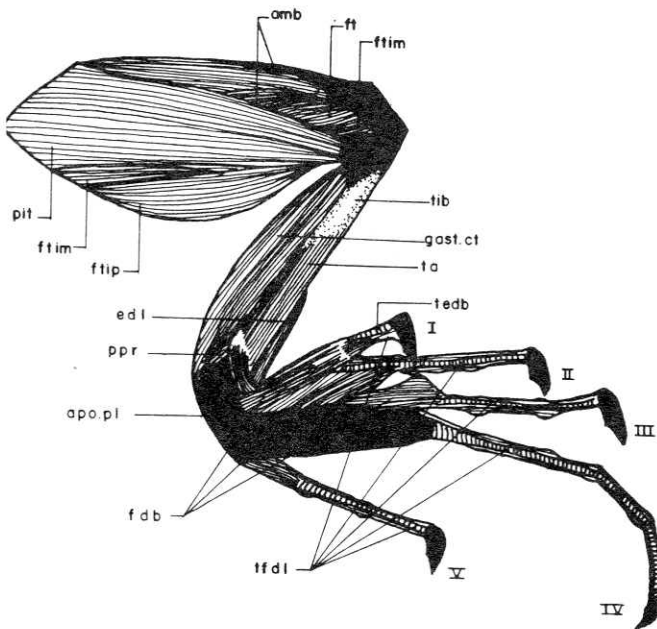


Figura 23. Aspecto ventral de la musculatura del miem-bro izquierdo de *Basiliscus basiliscus* (IND-R 3116) en el que se observa que el tendón de inserción del músculo pu-boischiotibialis (pit) se dispone en la parte medial de la tibia. X2.

Carácter J: Origen del m. gastrocnemius capitum ti-bialis.

Este músculo se origina en la zona proximal ventral de la tibia por medio de una lámina fascia hasta el borde articular con el fémur en las especies *Stenocercus trachycephalus* y *Basiliscus basiliscus*, por lo que se dispone más anteroventral que en las demás especies en las cuales se origina en el borde posterior proximal de la tibia.

Discusión

Con base en los caracteres y los estados de ca-rácter, y su distribución en las diferentes especies,

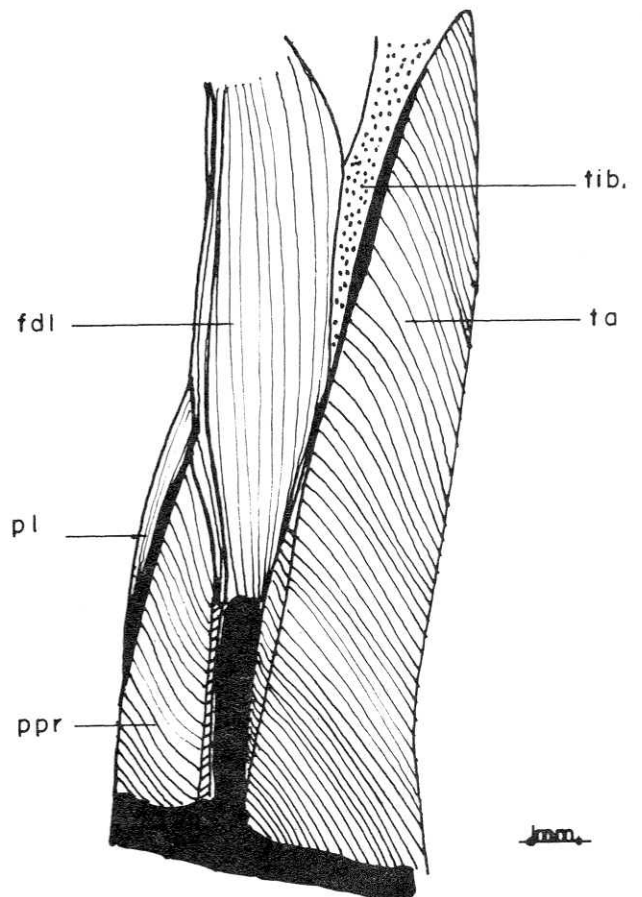


Figura 25. Aspecto posterior de la musculatura profunda de la pierna del miembro izquierdo de *Crotaphytus collaris* (LM-698), en el que se aprecia el m. flexor digitorum lon-gus (fdl) después de remover los m. gastrocnemius.

se estableció la polaridad de éstos tal como se muestra en la Tabla 3.

mientras que en los demás taxa el otro estado de carácter es plesiomórfico (a<sup>1</sup>).

TABLA 3  
Matriz de distribución de caracteres

Carácter	Grupo propio								Grupo ajeno	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	a	a	a <sup>1</sup>	a <sup>1</sup>	a <sup>1</sup>	a <sup>1</sup>	a <sup>1</sup>	a <sup>1</sup>	a <sup>1</sup>	a <sup>1</sup>
C	c <sup>1</sup>	c	c	c <sup>1</sup>	c <sup>1</sup>	c <sup>1</sup>	c <sup>1</sup>	c <sup>1</sup>	c <sup>1</sup>	c <sup>1</sup>
D	d <sup>1</sup>	d <sup>1</sup>	d <sup>1</sup>	d	d	d <sup>1</sup>	d <sup>1</sup>	d <sup>1</sup>	d <sup>1</sup>	d <sup>1</sup>
F	f <sup>1</sup>	f <sup>1</sup>	f <sup>1</sup>	f	f <sup>1</sup>	f	f <sup>1</sup>	f <sup>1</sup>	f <sup>1</sup>	f <sup>1</sup>
G	g <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	g	g	g <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>	g <sup>1</sup>
H	h <sup>1</sup>	h	h <sup>1</sup>	h	h	h <sup>1</sup>	h <sup>1</sup>	h <sup>1</sup>	h <sup>1</sup>	h <sup>1</sup>
I	i	i	i	i	i	i	i <sup>1</sup>	i <sup>1</sup>	i <sup>1</sup>	i <sup>1</sup>
J	j	j <sup>1</sup>	j <sup>1</sup>	j <sup>1</sup>	j <sup>1</sup>	j	j <sup>1</sup>	j <sup>1</sup>	j <sup>1</sup>	j <sup>1</sup>

LISTA DE LOS TAXA

1. *Stenocercus trachycephalus*
2. *Tropidurus hispidus*
3. *Iguana iguana*
4. *Anolis apollinaris*
5. *Phenacosaurus heterodermus*
6. *Basiliscus basiliscus*
7. *Crotaphytus collaris*
8. *Morunasaurus groi*
9. *Cnemidophorus lemniscatus*
10. *Thecadactylus rapicaudus*

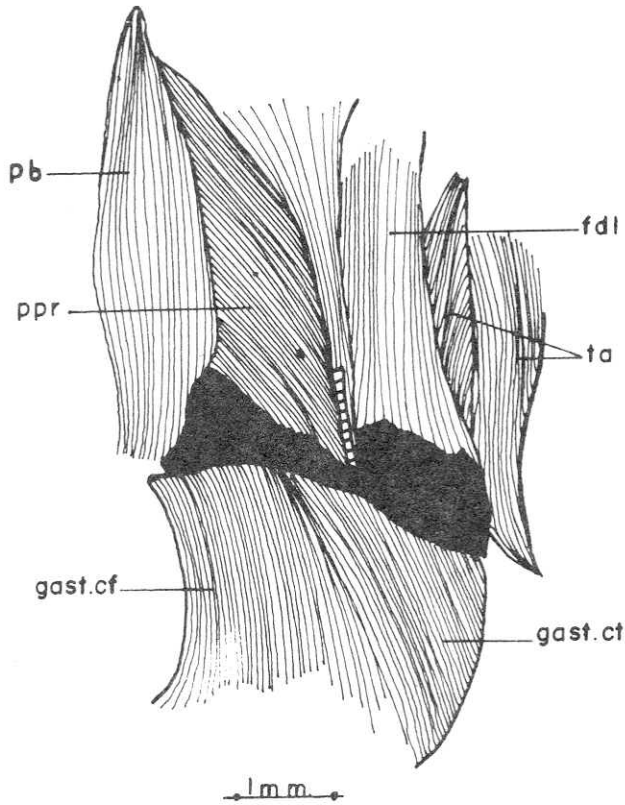


Figura 26. Aspecto posterior de la musculatura profunda de la pierna del miembro izquierdo de *Thecadactylus rapicaudus* (ICN-6243) en el que se observa el m. pronator profundus (ppr) después de remover los m. gastrocnemius (gast. cf. y gast. ct.).

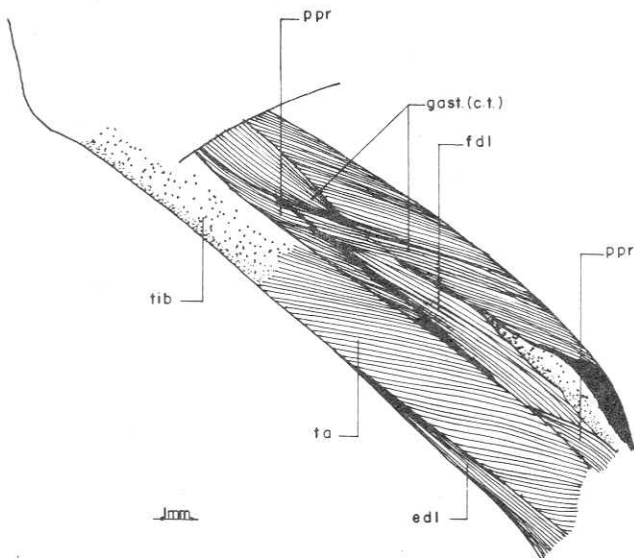


Figura 27. Aspecto ventral de la musculatura superficial de la pierna del miembro derecho de *Anolis apollinaris* (ICN-6253) en el que se observa el m. pronator profundus (ppr) sin remover los m. gastrocnemius.

De acuerdo con esto, la división del m. puboischiotibialis es un carácter sinapomórfico (a) para *Stenocercus trachycephalus* y *Tropidurus hispidus*,

El carácter B se presenta en sus dos estados de carácter tanto en grupo propio como en grupo ajeno, por lo que no es posible establecer su polaridad y por lo tanto no es de valor para el análisis cladístico. El estado de carácter compartido por *Tropidurus hispidus* e *Iguana iguana* con respecto al carácter C es sinapomórfico (c), mientras que el otro estado de carácter es plesiomórfico (c<sup>1</sup>).

La disposición de los mm. gastrocnemius en *Phenacosaurus heterodermus* y *Anolis apollinaris* es un estado de carácter sinapomórfico (d) para estas dos especies, mientras que el otro estado es plesiomórfico (d<sup>1</sup>).

Debido a que los dos estados de carácter del carácter E se presentan en grupo propio y en grupo ajeno, no es posible definir si éstos son derivados o primitivos, por lo que no tienen valor para la elaboración de hipótesis de parentesco.

El estado de carácter que comparten *Anolis apollinaris* y *Basiliscus basiliscus* con respecto al tendón de inserción del pubotibialis es sinapomórfico (f), en tanto que el otro estado es plesiomórfico (f<sup>1</sup>).

En lo que corresponde a la inserción del m. puboischiotibialis, el estado de carácter compartido por *Anolis apollinaris* y *Phenacosaurus heterodermus* es sinapomórfico (g), y el compartido por las demás especies es plesiomórfico (g<sup>1</sup>).

Para el carácter H, el estado compartido por las tres especies ya anotadas es una sinapomorfia (h), y el otro estado de carácter presente en las demás especies una plesiomorfia (h<sup>1</sup>).

El estado de carácter i del carácter I es sinapomórfico para todas las especies excepto *Crotaphy-*

*tus collaris*, *Cnemidophorus lemniscatus* y *Thecadactylus rapicaudus* para los que  $i^1$  es plesiomórfico.

Por último, el estado de carácter compartido por *Stenocercus trachycephalus* en cuanto al origen del m. gastrocnemius capitum tibialis (carácter J) es sinapomórfico para estas dos especies (j); el otro estado es plesiomórfico ( $j^1$ ).

#### Desarrollo y análisis de los cladogramas

De acuerdo con la tabla, se puede deducir claramente que no se presentan conjuntos agrupados (nested sets) de tal manera que podamos concluir que todo el grupo estudiado sea monofilético.

Es claro así mismo, que se manifiestan caracteres incompatibles en el sentido de que agrupan los taxa en tal forma que nos es fácil predecir que existen convergencias o paralelismos (homoplasias). Por este motivo, es necesario precisar cuales caracteres son consistentes y cuales inconsistentes, y para ello se presentan cinco diferentes cladogramas (Fig. 28), que han sido obtenidos con base en los datos de distribución de los caracteres (Tabla 3).

Las consistencias son definidas de acuerdo con la posibilidad de los caracteres de agrupar los taxa sin que en los cladogramas se presenten casos de homoplasia que sean incongruentes con los datos.

Las inconsistencias por su parte, son de valor para aprobar o falsear cada uno de los cladogramas, aun cuando haya algunos autores como Saether (1983) que consideran este tipo de características como valorables sólo para falsear hipótesis.

Así, el cladograma de la Fig. 28 identificado como a, es falseado por los caracteres, C, F, H, J; el b, por los caracteres A, F y H; el c, por los caracteres A, C y F; el d, por los caracteres, C, D, H, G y J, y el e, por los caracteres A, D, G, H, J.

Entonces, esto significa que se presentan cinco hipótesis de parentesco entre los taxa 1 a 6, pues estos son los únicos que pueden ser agrupados por similitudes derivadas.

De cada cladograma se extraen los siguientes grupos monofiléticos:

En el cladograma a, 1 + 2, 4 + 5 y 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 son grupos monofiléticos; en el cladograma b, lo son 2 + 3, 4 + 5, 1 + 6 y 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6; en el c, 2 + 4 + 5, 1 + 6 y 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6; en el cladograma d, son monofiléticos 4 + 6, 1 + 2 y 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6, y por último en el e, 4 + 6, 2 + 3 y 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 son grupos monofiléticos.

Cada uno de los diversos grupos naturales obtenidos están emparentados por caracteres sinapomórficos diferentes.

Así, *Stenocercus trachycephalus* y *Tropidurus hispidus* en el cladograma a presenta una relación de parentesco entre ellos más cercana que con respecto a los demás taxa, por el estado de carácter (a) el cual comparten. En este mismo, *Anolis apollinaris* y *Phenacosaurus heterodermus* comparten los estados de carácter (d) (g), estableciéndose así la relación de especies hermanas más cercana que con cualquiera otra especie.

En la hipótesis de parentesco presentada en la Fig. 28b, las relaciones son diferentes. Ahora son *Tropidurus hispidus* e *Iguana iguana* las que aparecen como más emparentadas entre sí que con cualesquiera de otras de las especies, al compartir el estado de carácter (c).

*Anolis apollinaris* y *Phenacosaurus heterodermus* siguen presentándose como especies cercanamente emparentadas, tal como se muestra en la Fig. 28a. El carácter (j) es compartido por *Stenocercus trachycephalus* y *Basiliscus basiliscus*, lo que origina una relación de especies hermanas entre ellas.

En el cladograma de la Fig. 28c es notable el hecho de que ya no aparecen *Anolis apollinaris* y *Phenacosaurus heterodermus* formando solas un grupo monofilético, sino que a ellas se adhiere *Tropidurus hispidus* la cual comparte con las dos primeras el estado de carácter (h). Sin embargo, la relación de parentesco sigue siendo más estrecha entre *A. apollinaris* y *P. heterodermus* que cualesquiera de éstas con *T. hispidus*. En el cladograma siguiente (Fig. 28d) se muestra como ya es falseada la hipótesis de parentesco mantenida en las anteriores con respecto a las especies *Anolis apollinaris* y *Phenacosaurus heterodermus* debido a que el carácter (f) agrupa a la primera ahora con *Basiliscus basiliscus*, mientras que el estado (a) relaciona nuevamente a *Stenocercus trachycephalus* y *Tropidurus hispidus* como en el cladograma a.

Para terminar, observamos en la Fig. 28e que el estado de carácter (c) agrupa las especies *Tropidurus hispidus* e *Iguana iguana*, pero esta vez el otro grupo monofilético de dos especies que hay en esta hipótesis de parentesco es el constituido por *Anolis apollinaris* y *Basiliscus basiliscus* a través del estado de carácter (f).

Los taxa 1 a 6 son agrupados en todos los cladogramas por el estado de carácter (i).

En todas las hipótesis aparecen *Morunasaurus groi* ("morunasaurine") y *Crotaphytus collaris* ("sceloporine") sin ningún tipo de carácter o de estados de carácter que los relacione, ya sea entre ellos o con los demás taxa; tampoco hay caracteres que los distingan de las especies que conforman el

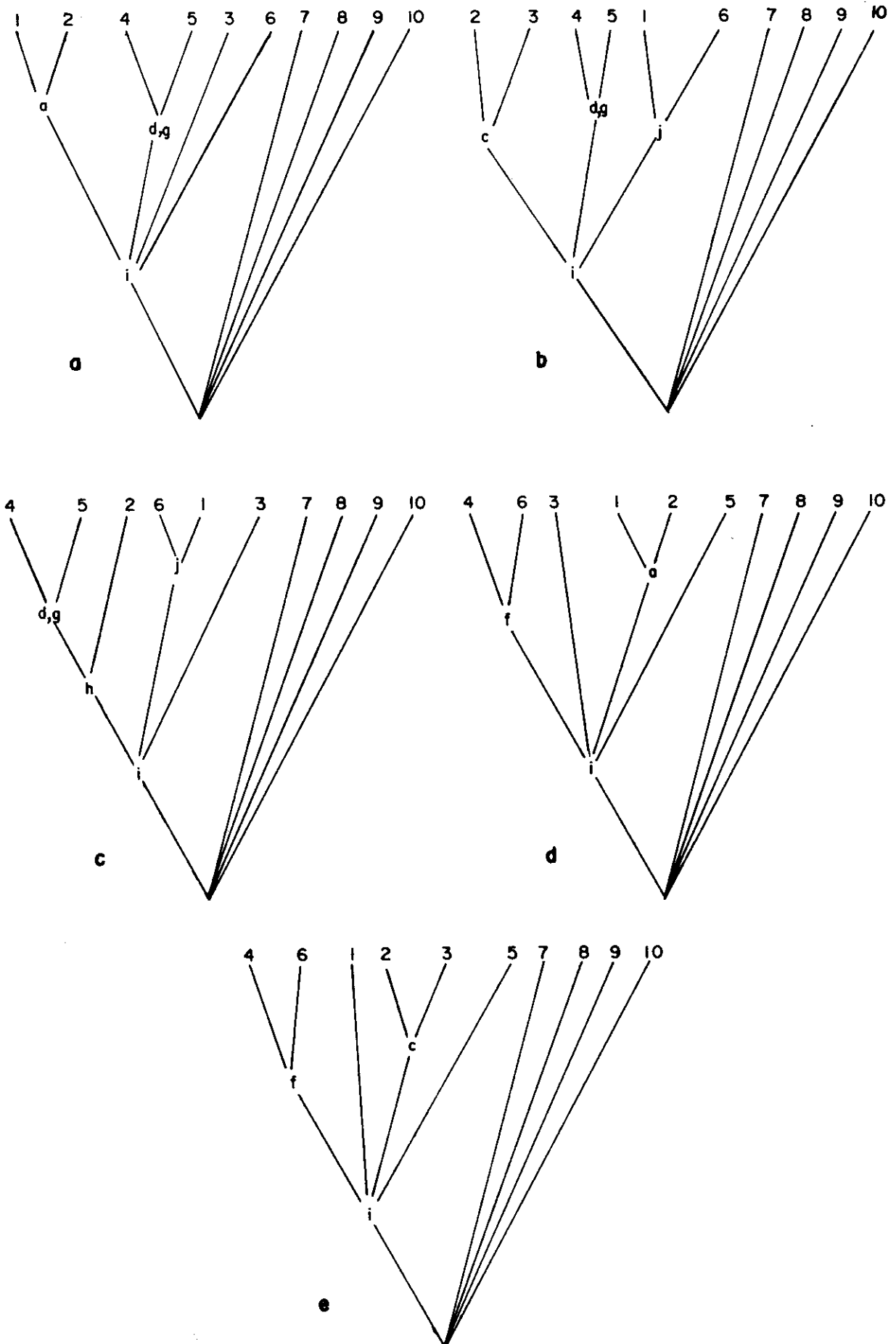


Figura 28. Hipótesis de parentesco en la familia Iguanidae con base en la musculatura del miembro posterior (Las explicaciones de cada uno de los cladogramas se presentan en el texto).



grupo ajeno, por lo que se representan en los cladogramas partiendo de un mismo punto. Estas dos especies poseen muchos rasgos plesiomórficos y otros de los cuales no es posible definir si son primitivos o derivados.

Cualquier argumento que se pueda esgrimir en el sentido de que de la matriz de distribución de caracteres es posible obtener un solo cladograma más parsimonioso sin omitir las inconsistencias debe ser sustentado para resolver interrogantes como estos:

- ¿Por qué las desapariciones? (Estados de carácter (c) en el taxon 1 y (f) en la especie (5).
- ¿Por qué las homoplasias? (Estado de carácter (j) en los taxa 1 y 6, y estado (h) en los taxa 2, 4 y 5).
- ¿Cómo se puede establecer cuáles son homología verdaderas?
- ¿Cómo identificar las falsas similitudes?

Toda respuesta a estos puntos (con base en el cladograma de la Fig. 29) será más explicaciones que demostraciones científicas estrictas, por lo que de todas formas será necesario llevar a cabo un desarrollo tal como el que se hizo anteriormente, pues al fin y al cabo muchas de estas preguntas son conclusiones y no datos.

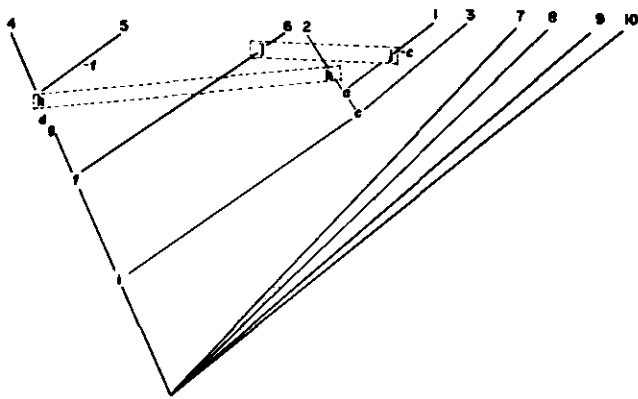


Figura 29. Hipótesis de parentesco sin excluir los caracteres incompatibles. (Explicación en el texto).

Es importante considerar, por último, que tampoco deben ser eliminadas las homoplasias porque al mismo tiempo se pueden estar descartando sinapomorfias verdaderas; además, como ya se anotó anteriormente, los caracteres designados como convergencias o paralelismos son útiles para falsear hipótesis de monofilia.

## Conclusiones

La musculatura del miembro posterior en los lagartos de la familia Iguanidae es de gran valor como fuente de caracteres útiles para la sistemática de ésta, pues permite establecer relaciones de parentesco y generar nuevos puntos de vista que pueden falsear las hipótesis tradicionales sobre la formación y organización de sus grupos. Sin embargo, tampoco puede ser definida como un grupo monofilético, es decir, como un grupo natural con base en lo hallado en la musculatura del miembro posterior.

De acuerdo con este estudio, se puede asegurar que en la familia Iguanidae existen grupos monofiléticos que en algunos casos coinciden, con base en los cladogramas obtenidos, con los ya propuestos por diversos autores, concretamente el conformado por *Anolis apollinaris* y *Phenacosaurus heterodermus* ("anoline"), pero en otros no. Así, se deja planteada la posibilidad de redefinición de los llamados grupos informales dentro de la familia.

El hecho de que *Morunasaurus groi* y *Crotaphytus collaris* no pudieran ser incluidas por relaciones de parentesco dentro del grupo monofilético formado por las demás especies de la familia, crea serias dudas acerca de su pertenencia a los iguanidos.

Obviamente todo esto debe ser corroborado o falseado aumentando el número de especies dentro del grupo propio y dentro del ajeno, y revisando exhaustivamente los caracteres del miembro posterior en los taxa que hoy por hoy están propuestos para los grupos informales.

Creo que es prioritario realizar un estudio más profundo en *Morunasaurus groi* y *Crotaphytus collaris* para aclarar el grupo al cual pertenecen o deben pertenecer por poseer una gran cantidad de caracteres plesiomórficos. Sería conveniente hacer una comparación inicial entre *M. groi* y el género *Enyaliodes*, siguiendo el propósito de Corredor et al. (1985).

## Agradecimientos

Quiero agradecer muy especialmente al Profesor Juan Manuel Renjifo, del Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá, y al Dr. John D. Lynch de la Universidad de Nebraska, Estados Unidos, por la dirección de este trabajo. Además a la Bióloga Martha Patricia Ramírez y a la dibujante María Claudia Pérez por su colaboración activa en la realización de las gráficas y dibujos que aquí se presentan.

## ABREVIATURAS

add . . . . . adductor femoris  
 amb. . . . . ambiens  
 ap. pl. . . . . aponeurosis plantaris  
 cfb. . . . . caudofemoralis brevis  
 cfl. . . . . caudofemoralis longus  
 edb . . . . . extensor digitorum brevis  
 edl. . . . . extensor digitorum longus  
 fdb . . . . . flexor digitorum brevis  
 fdl. . . . . flexor digitorum longus  
 fem . . . . . fémur  
 ft. . . . . femorotibialis  
 fte . . . . . flexor tibialis externus  
 ftil . . . . . flexor tibialis internus lateralis  
 ftim. . . . . flexor tibialis internus medialis  
 ftip . . . . . flexor tibialis internus posterioris

gast. cf. . . . . gastrocnemius caputum fibularis  
 gast. ct. . . . . gastrocnemius caputum tibialis  
 ilfib . . . . . iliofibularis  
 iltib . . . . . iliotibialis  
 lig. lac . . . . . ligamentum laciniatum  
 pb . . . . . peroneus brevis  
 pife . . . . . puboischiofemoralis externus  
 pifi . . . . . puboischiofemoralis internus  
 pit . . . . . puboischiotibialis  
 pl. . . . . peroneus longus  
 ppr . . . . . pronator profundus  
 pt . . . . . pubotibialis  
 ta. . . . . tibialis anterioris  
 tp . . . . . tibialis posterioris

## BIBLIOGRAFIA

- BOCK, W.J. & SHEAR, C.R. 1972. A staining method for gross dissection of vertebrate muscles. *Anat. Anz.* Bd. 130: 222-227.
- CAMP, C.L. 1923. Classification of the lizards. *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.* Vol. XLVIII, Art. XI, pp. 289-481.
- CORREDOR, V., RENJIFO, J.M. & AYALA, S. 1985. Discovery of *Morunasaurus groi* Dunn (Sauria, Iguanidae) in Northwestern Colombia. *Journ. Herp.* 19 (1): 162-164.
- ELDREDGE, N. & CRACRAFT, J. 1980. Phylogenetics patterns and evolutionary process. Method and theory in comparative biology. Columbia University Press, New York.
- ETHERIDGE, R. 1960. The relationships of the anoles (Reptilia: Sauria: Iguanidae): An interpretation base on skeletal morphology. University Microfilms International. A dissertation for Ph. D. degree. Ann Arbor, Michigan.
- . 1964. The skeletal morphology and systematic relationships of sceloporine lizards. *Copeia* 4: 610-631.
- . 1966. The systematic relationships of West Indian and South American lizards referred to the Iguanid genus *Leiocephalus*. *Copeia* 1: 79-91.
- . 1967. Lizard caudal vertebrae. *Copeia* 4: 699-721.
- HAINES, R.W. 1934. The homologies of the flexor and adductor muscles of the thigh. *J. Morph.* 56 (1): 21-49.
- . 1935. Some muscular changes in the tail and thigh of reptiles and mammals. *J. Morph.* 58 (2): 355-383.
- HOWELL, A.B. 1938. Morphogenesis of the architecture of hip and thigh. *J. Morph.* 62 (2): 177-218.
- MOODY, S. 1983. The rectus abdominis muscle complex of the Lacertilia: Terminology, homology and assumed presence in primitive iguanian lizards. From: Miyata, K. (Ed.). *Advances in herpetology and evolutionary biology. Essay on honor of E. E. Williams*, Cambridge, The Museum of Comparative Zoology. pp. 195-212.
- ROMER, A.S. 1942. The development of tetrapod limb musculature. The thigh of *Lacerta*. *J. Morph.* 71 (2): 251-298.
- SAETHER, O.A. 1983. The canalized evolutionary potential; inconsistencies in phylogenetic reasoning. *Syst. Zool.* 32 (4): 343-359.
- SAVAGE, J.M. 1958. The iguanid lizards genera *Urosaurus* and *Uta*, with remarks on related groups. *Zoológica* 43 (2): 41-54.
- SCHAEFFER, B. 1941. The morphological and functional evolution of the tarsus in amphibians and reptiles. *Bull. Amer. Mus. Nat. Hist.* 78: 395-472.
- SNYDER, R.C. 1954. The anatomy and function of the pelvic girdle and hindlimb in lizard locomotion. *Am. Journ. Anat.* 95 (1): 1-43.
- WATROUS, L.E. & WHEELER, Q.D. 1981. The out-group comparison method of character analysis. *Syst. Zool.* 30 (1): 1-11.
- WILEY, E.O. 1981. *Phylogenetic: systematics, the theory and practice*. New York, John Wiley and sons.

# “ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE CONDUCCION EN MUESTRAS SEMICONDUCTORAS DE $Ln - Ba - Cu - O$ ( $Ln = Y, La$ ) CERCANAS A LA TRANSICION METAL - NO METAL” \*

por

Mauricio Esguerra Bónitto\*\*

## Resumen

**Esguerra-Bónitto, M.:** Estudio de los mecanismos de conducción en muestras semiconductoras de  $Ln - Ba - Cu - O$  ( $Ln = Y, La$ ) cercanas a la transición metal-no metal. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 559-566, 1990. ISSN 0370-3908.

Mediciones de la resistencia eléctrica en muestras sinterizadas de Lantano indican la presencia de estados electrónicos localizados.

La causa de dicha localización, que lleva a la conducción por saltos de rango variable, es atribuida a la ocupación aleatoria de sitios del Lantano por el Bario a lo largo del eje C. Este modelo es confirmado por diversos análisis complementarios.

## 1. Introducción

El descubrimiento de superconductividad en óxidos metálicos por K.A. Müller y J.G. Bednorz (1) revolucionó no sólo las posibilidades tecnológicas de los superconductores, sino la física del estado sólido misma. Esto se debe a que la teoría aceptada para explicar el fenómeno de superconductividad en metales, la formulada por Bardeen, Cooper y Schrieffer (BCS) en 1957 (2), es incapaz de dar cuenta de los valores de temperatura crítica de hasta 125K observados en estos compuestos (3).

Un aspecto importante que debe tener en cuenta una teoría sobre superconductividad es cómo se forman pares de electrones (llamados de

Cooper) responsables del transporte de carga sin resistencia, lo cual ha sido observado también en los nuevos materiales (5). Muchas teorías surgidas a raíz del descubrimiento buscan explicar el fenómeno con mecanismos electrónicos y no fonónicos como en la teoría BCS (4), debido a que el efecto isotópico observado experimentalmente es un orden de magnitud menor que el predicho por esta última (5). Otro aspecto relevante de esta clase de materiales es que la transición superconductora ocurre en las cercanías de otras transiciones de fase. Estas son estructurales como la transición tetragonal-ortorrómbica, magnéticas y una transición del estado no metálico al metálico (6). Esta serie de fenómenos hace pensar que las teorías (7) en las que la superconductividad, el magnetismo e incluso el estado no metálico tienen un origen común en la interacción de Coulomb entre los electrones de Valencia, son las más acertadas.

Sin embargo, aún no hay consenso al respecto (9), por lo cual hay que esperar más resultados experimentales para decidirlo.

\* Trabajo ganador del Premio Academia de Ciencias del Tercer Mundo, Convocatoria 1988. Área de Física.

\*\* Centro Internacional de la Física, Bogotá, D.E. Colombia.

Experimentalmente se ha visto que hay una transición metal-no metal al variar la concentración del "dopante" (9): estroncio en el sistema  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  y oxígeno en  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ . El interés en entender este fenómeno radica en que para poder explicar el fenómeno de superconductividad en estos materiales, es necesario investigar primero el hecho no trivial de que materiales cerámicos, usualmente aislantes, lleguen a comportarse como metales: la resistencia disminuye proporcionalmente con la temperatura antes de alcanzar la temperatura crítica. Incluso recientemente se ha logrado sintetizar un compuesto óxido que se comporta como un metal sin ser superconductor (10).

Este trabajo tiene por objeto estudiar los mecanismos de conducción eléctrica en muestras semiconductoras vecinas a la transición metal-no metal. Para ello se prepararon muestras del tipo 1-2-3, es decir  $\text{LnBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  ( $\text{Ln} = \text{Y}, \text{La}$ ) y con menos oxígeno del necesario para obtener un superconductor ( $\approx 6.9$ ) (11). El comportamiento de la resistencia con la temperatura indica que la conducción es por saltos de rango variable (VRH), lo cual significa que el sistema sufre una transición del estado metálico al no metálico del tipo Anderson, en la cual el desorden induce localización de estados electrónicos en el nivel de Fermi. Este resultado contradice lo esperado de una interacción entre electrones, la cual debería llevar el sistema a una transición metal-no metal del tipo Mott-Hubbard (6). Esta se caracterizaría por un comportamiento activado de la conductividad en el estado no metálico, debido a una brecha grande de energía (12).

## 2. Métodos Experimentales

Las muestras fueron preparadas a partir de una mezcla de cantidades estequiométricas para la composición 1-2-3  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (Fluka) o  $\text{La}_2\text{O}_3$  (Ventron),  $\text{BaCO}_3$  (Merck) y  $\text{CuO}$  (Aldrich). Para la reacción de estado sólido que lleva a la formación del compuesto se calentó la mezcla a  $950^\circ\text{C}$  durante 12 horas. Después de comprimir el polvo en pastillas de 11 mm de diámetro y 1 mm de espesor con una presión de 7 kbar se recoció las muestras en una cámara con diferentes presiones parciales de oxígeno (Tabla 1) a  $500^\circ\text{C}$  durante 2 1/2 h. El enfriamiento a temperatura ambiente se hizo controlando la rata de descenso de temperatura ( $2^\circ\text{C}/\text{min}$ ), a excepción de las muestras C1 y E1 que se enfriaron naturalmente en la cámara (aprox. 20 min). Además de estas muestras con bajo contenido de oxígeno se prepararon otras con la misma mezcla reaccionada, pero recociendo a  $900^\circ\text{C}$  durante 2 horas a flujo de oxígeno y descendiendo en 10 horas a temperatura ambiente. Este es el tratamiento térmico óptimo para obtener muestras superconductoras con Y (13), el cual nos sirve de referencia para el tratamiento de recocido en la cámara.

La estructura de las muestras se analizó por difracción de rayos X (Norelco) tanto en pastilla

como en polvo (Fig. 1) con radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.5418$ ). Con ocho picos principales fue posible calcular los parámetros de red (Tabla 1) y con ellos la densidad ideal de la muestra. La densidad aparente es aproximadamente 3/5 de aquella, lo cual es indicio de un alto grado de porosidad en este material sinterizado.

TABLA 1

### Tratamientos térmicos y datos estructurales

Muestra	Presión de $\text{O}_2$ y enfriamiento	Parámetros de red ( $\text{\AA}$ )			Volumen ( $\text{\AA}^3$ )
		a	b	c	
La, E1	10 mbar, rápido	3.901	3.892	11.580	175.85
La, E2	E1 + 75 mbar, lento	3.891	3.91	11.734	178.50
La, F1	1 mbar, lento	3.902	3.91	11.725	178.9
La, L1	flujo, lento	3.887	3.946	11.839	178.34
Y, C0	sin recocer	3.853	3.785	11.522	168.03
Y, C1	10 mbar, rápido	3.904	3.826	11.576	172.91
Y, C2	C1 + 75 mbar, lento	3.91	3.801	11.55	171.68
Y, C3	C2 + 500 mbar, lento	3.935	3.81	11.595	173.84

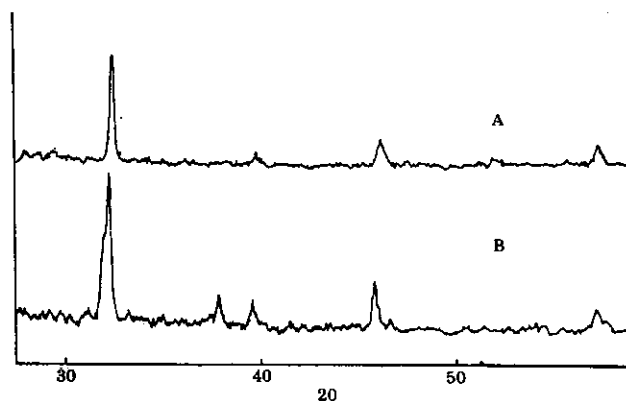


Figura 1. Patrones de difracción de muestras E2 (A) y C2 (B)

Los espectros de rayos X no permiten detectar trazas de fases impúreas en las muestras. En cambio la espectroscopia de resonancia paramagnética (EPR) hace posible encontrar la presencia de fases diferentes a la superconductoras, ya que ésta no produce ninguna señal (14). Los espectros se tomaron en un equipo Varian-4500, donde la temperatura se varió con un sistema de flujo de gas de nitrógeno entre 100 y 450K. La temperatura fue medida con un termómetro Pt-100.

Los análisis de composición se hicieron con una microsonda EDAX-9100 en un microscopio electrónico de barrido Philips SEM-505. Dicho estudio es semicuantitativo, por lo cual el error es de por lo menos el 5% y además no permite identificar elementos livianos (como el oxígeno). Para determinar la confiabilidad del análisis se tomaron muestras que contienen pequeños cristales tanto de compuestos con Y como de La, los cuales fueron preparados a partir de masas fundidas a  $1050^\circ\text{C}$  (16).

Las mediciones de resistencia se hicieron en una configuración de cuatro puntas sobre barras cortadas de las pastillas con dimensiones típicas de  $10 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$ . Los contactos fueron hechos con alambres finos de cobre ( $\phi = 0.2 \text{ mm}$ ) fijados a la muestra con tintura de plata. Antes de cada medición se constató la ohmicidad de los contactos y se escogió la corriente (continua) de medición buscando el máximo de sensibilidad del voltímetro con la menor disipación de calor posible, evitando así errores en la medición de la temperatura. Esta fue medida con un termómetro Pt-100 colocado en el interior de un portamuestras de cobre, sobre el cual se fijó un zafiro y encima la muestra. De esta manera se logra aislar eléctricamente la muestra del portamuestras, pero se garantiza una buena conducción térmica para lecturas confiables de la temperatura. Esta se varió lentamente (al rededor de  $20 \text{ K/h}$ ) en crióstatos de helio y se tomaron medidas tanto enfriando como calentando para asegurar la reproducibilidad de las curvas.

Con el fin de estudiar posibles efectos de dispersión se hicieron mediciones de la resistividad en función de la frecuencia de 5 hasta  $1.5 \cdot 10^4 \text{ cps}$ . Para el efecto se cubrieron las caras de una pastilla (muestra L1) con tintura de plata varias veces y se fijó así a dos láminas de cobre que sirvieron de electrodos. De esta manera se buscó reducir al máximo capacitancias parásitas presentes en el circuito. Las mediciones se hicieron con un amplificador sensible a la fase ("lock-in"), con el cual se puede medir tanto la parte real como la imaginaria de la impedancia. Sin embargo, sólo fue posible determinar la parte real, pues la parte imaginaria (capacitiva) tiene una señal muy débil difícil de detectar.

### 3. Resultados

Al comparar los espectros de rayos x para muestras que contienen Y con las que contienen La preparadas bajo las mismas condiciones (Fig. 1), se ve que a pesar de presentar básicamente los mismos picos que corresponden a la fase 1-2-3. Sin embargo, hay diferencias. Por una parte los picos de las muestras con Y están mejor definidos que los correspondientes al La, lo cual indica que hay un ensanchamiento en estos espectros. Además no se observa el desdoblamiento del pico principal que existe en la muestra con Y y que tiene que ver con la ortorrómbica ( $a \neq b$ ) de la estructura.

Lo anterior está relacionado con la transición ancha e incompleta al estado superconductor que se observa en los compuestos con Y, exceptuando la muestra recocida que tiene una caída resistiva completa además de una característica metálica en el estado normal. A medida que aumenta la presión de oxígeno con que se prepara la muestra aumenta la temperatura en la cual

comienza la transición (Tabla 2). Simultáneamente, el desdoblamiento de los picos aumenta, indicando que la superconductividad en los compuestos de Y está ligada a una estructura ortorrómbica.

TABLA 2

Datos eléctricos

Muestra	$\sigma_{R. T.} (\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1})$	$\sigma_0 (\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1})$	$T_0 (\text{K})$	$T_c^* (\text{K})$
La, E1	0.1	$4.8 \cdot 10^3$	$4.0 \cdot 10^6$	—
La, E2	4.7	$1.4 \cdot 10^2$	$4.0 \cdot 10^4$	—
La, E3	4.2	$1.7 \cdot 10^2$	$5.6 \cdot 10^4$	—
La, F1	0.2	9	$5.4 \cdot 10^4$	—
La, L1	0.1	3	$3.6 \cdot 10^4$	—
Y, C0	1.5	—	—	0
Y, C1	2.9	—	—	50
Y, C2	1.9	—	—	90
Y, C3	0.8	—	—	90

\*  $T_c$ : temperatura donde comienza la caída de resistencia

En cambio, en ninguno de los compuestos con La se observan anomalías en la resistencia (hasta 40K), ni siquiera en la muestra L1 que es claramente ortorrómbica (Tabla 1). La diferencia en el comportamiento eléctrico entre los dos tipos de muestras se aprecia mejor graficando el resultado de las mediciones de resistencia contra temperatura como  $\ln(R/\text{Ohm})$  vs.  $1/T^{1/4}$  (ver Figs. 2 y 3). Las muestras con La (a excepción de E1) cumplen una ley del tipo

$$(1) \quad \sigma = \sigma_0 \cdot \exp \left\{ - (T_0 / T)^s \right\}$$

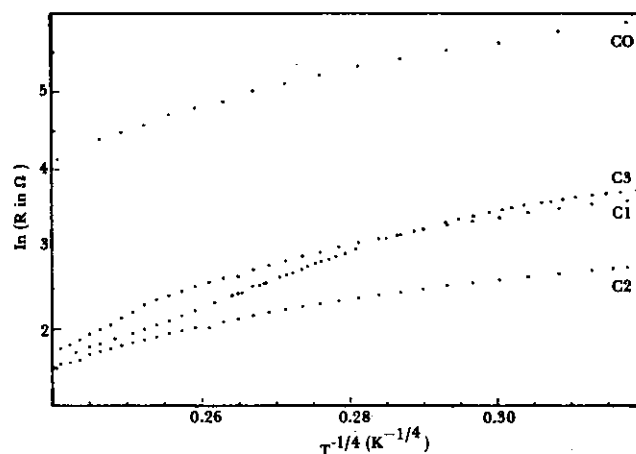


Figura 2.  $\ln(R/\text{Ohm})$  vs.  $T^{-1/4}$  para muestras con Y

Esto se ajusta a la teoría de conducción por VRH, la cual predice un exponente  $s$  de  $1/4$  (17). Para buscar el valor de este exponente en las curvas experimentales se hizo un ajuste por mínimos cuadrados dejando  $s$  fijo en cada ajuste. La desviación porcentual de los valores experimentales con respecto a los calculados con los valores de  $\sigma_0$  y  $T_0$  obtenidos del ajuste se puede expresar como una función de  $s$ :

$$(2) \quad p(s) = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{100}{\sigma_i} (\sigma_0 e^{-(T_0/T)^s} - \sigma_i) \right\}^2 \right]^{1/2}$$

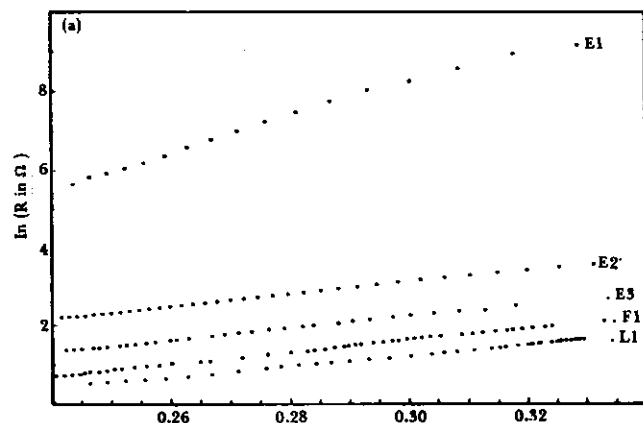


Figura 3.  $\ln(R/\text{Ohm})$  vs.  $T^{1/4}$  para muestras con La

El mínimo de esa función corresponde al valor óptimo de  $s$ , que para muestras con La es  $0.25 \pm 0.01$  (Fig. 4).

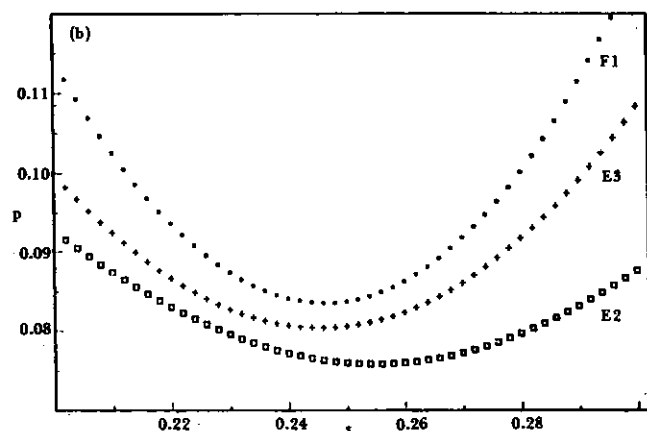


Figura 4. Desviación porcentual (2) para muestras de La

El comportamiento de los compuestos de Y no se ajusta a una ley de este tipo, pues como se ve en la gráfica de ser posible ajustar la curva a la ecuación (1), el exponente sería menor que  $1/4$ . En ese caso no se podría asignar sentido físico a  $s$ , pues tanto en las teorías como en mediciones del mecanismo de conducción tipo "hopping", el exponente es siempre mayor o igual a 0.25. La desviación de una línea recta en la representación gráfica  $\ln(R/\text{Ohm})$  vs.  $T^{1/4}$  de los datos experimentales indica que en la muestra hay regiones con conducción probablemente metálica, que mejoran la conducción de las regiones semiconductoras tipo VRH. Esto lo confirma el hecho de que al alcanzar la temperatura crítica la muestra presente una transición superconductor, que domina finalmente el comportamiento resistivo. Sin embargo, el hecho de que no se alcanza completamente el estado sin resistencia significa que las regiones superconductoras están aisladas

dentro de una matriz no metálica y que por lo tanto no hay una "percolación" a través de la muestra.

Los espectros de EPR para muestras con Y recocidas y sin recocer (Fig. 5) muestran una dramática disminución en la amplitud ( $Y_{pp}$ ) de la señal con el recocido. La señal anisotrópica se debe probablemente a fases impúreas y es debida al  $\text{Cu}^{2+}$  (18). No hay una variación apreciable en el valor del factor de Landé ( $g_{\parallel} = 2.2033$ ,  $g_{\perp} = 2.0446$ ,  $\Delta g = 0.16$ ) con el tratamiento térmico. Para encontrar cual fase podría ser responsable de la señal se preparó la llamada "fase verde"  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  (19), cuya señal (Fig. 6) tiene una forma parecida a la observada en los compuestos 1-2-3. Probablemente esta fase y otras como la  $\text{BaCuO}_2$  (20) producen la señal observada.

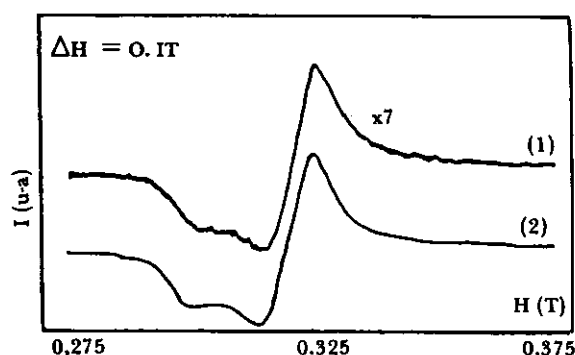


Figura 5. Espectros de EPR de  $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  recocido (1) y sin recocer (2) a temperatura ambiente.

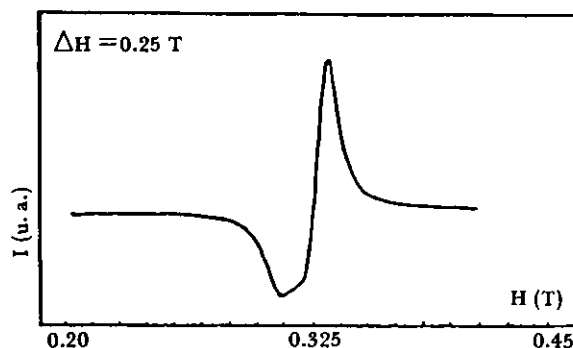


Figura 6. Espectro de EPR de  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  a temperatura ambiente.

El análisis por EPR de compuestos a base de Los recocidos (Fig. 7a) y sin recocer (Fig. 7b) muestra un espectro conformado por dos señales diferentes. La más angosta es básicamente la misma observada en el sistema con Y, siendo los valores de  $g$  prácticamente iguales  $g_{\parallel} = 2.206$ ,  $g_{\perp} = 2.046$ ,  $\Delta g = 0.16$ ). La otra señal es una línea asimétrica y ancha ( $\Delta H = 0.1\text{T}$ ,  $g = 2.1$ ) cuya amplitud decrece drásticamente con el recocido.

La variación con la temperatura de la intensidad ( $I = \Delta H p p^2 Y_{pp}$ ) de la señal atribuida al  $\text{Cu}^{2+}$ , tanto en los compuestos de Y como en los de La, es del tipo Curie-Weiss entre 80 y 300 K. Sin embargo, la forma y el ancho de la línea no cambian con el enfriamiento. Lo contrario sucede con la se-

ñal ancha, cuya intensidad y ancho varían en forma apreciable con la temperatura (Fig. 8). Es posible ajustar dicha variación (muestra sin recocer) a las siguientes relaciones empíricas.

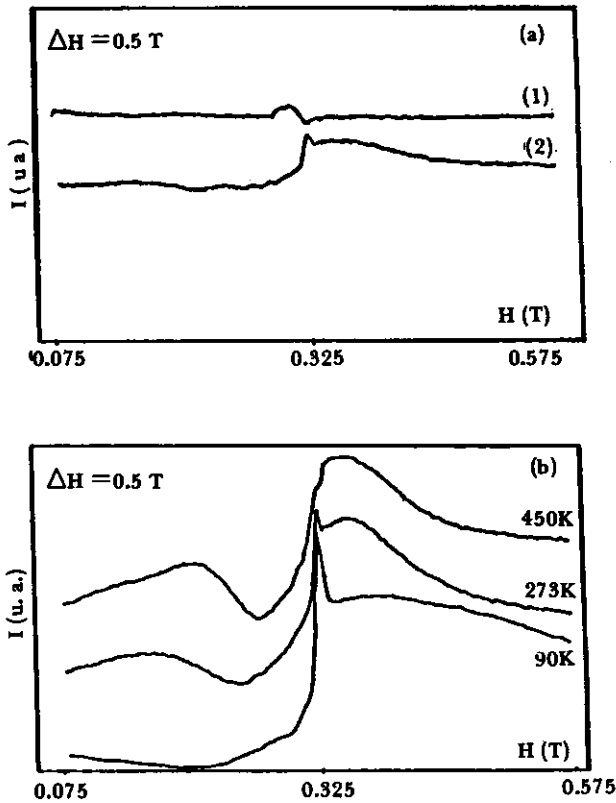


Figura 7. (a) Espectros de EPR de  $La_1Ba_2Cu_3O_y$  recocido (1) y sin recocer (2) a temperatura ambiente y (b) de una muestra sin recocer a varias temperaturas.

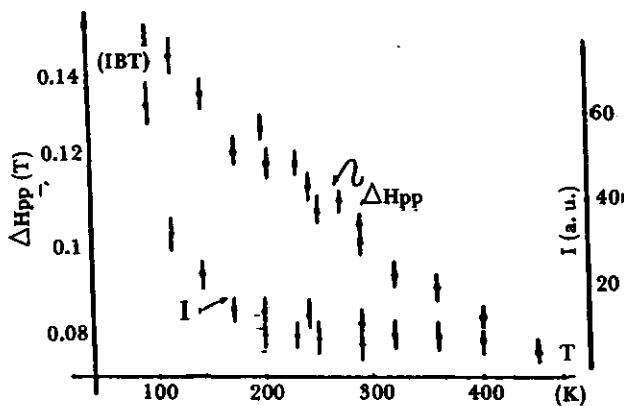


Figura 8. Variación con la temperatura del ancho  $\Delta H$  y la intensidad de la línea de una muestra con La sin recocer.

$$(3a) \quad \Delta H_{pp} = A \exp(-T/T_1)$$

$$(3b) \quad I = B \exp(T_2/T)$$

Los valores para los coeficientes ajustables (A y B no lo son al no tener la intensidad calibrada) están entre 400 y 500 K para  $T_1$  (Fig. 9a) y 230 y 260 K para  $T_2$  (Fig. 9b).

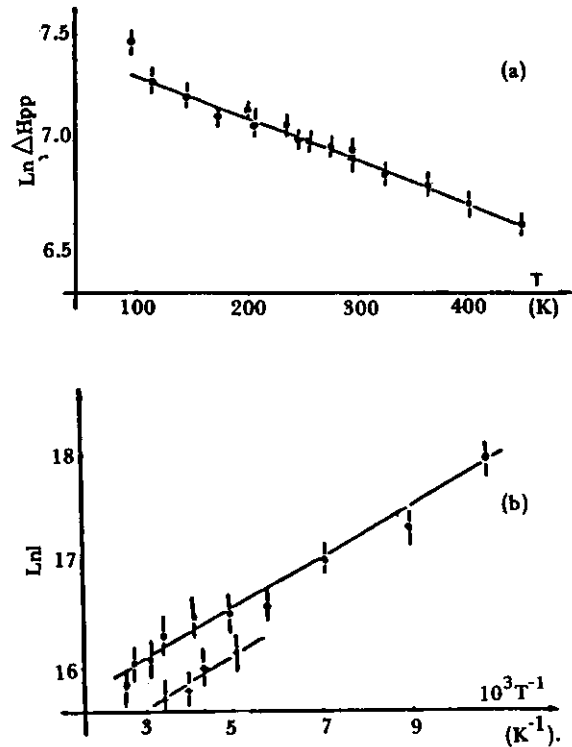


Figura 9. Variación logarítmica (a) del ancho de línea con T y (b) de la intensidad con  $10^3/T$ . Las rectas son los mejores ajustes.

El análisis por microscopía electrónica mostró una estructura granular, típica de materiales sinterizados. El tamaño de grano varía alrededor de 100 nm y es muy notoria la alta porosidad del material, que fue estimada a partir del volumen de la celda unitaria (ver arriba).

La composición de las muestras con Y muestra efectivamente una relación cercana a la composición 1-2-3. Las mediciones sobre una cara del cristal, sobre la cual se ajustó la posición eucéntrica del microscopio, da valores muy cercanos a dicha composición. En cambio tanto los análisis de muestras sinterizadas como de los cristales con La no coinciden con lo esperado. Según lo obtenido la composición correspondería a un compuesto  $LaBa_3Cu_4O_y$ , el cual no ha sido reportado todavía. En esas muestras se encontraron además trazas de  $BaCuO_2$ , siendo el análisis de EDAX muy cercano a la composición ideal de este compuesto.

Finalmente, los resultados de mediciones (muestra L1) de la resistencia en función de la frecuencia (Fig. 10) muestra una dispersión para  $f > 10^4$  cps, tanto a 80 como a 300 K. La diferencia entre las dos temperaturas radica únicamente en el aumento esperado de resistencia con el enfriamiento. La dispersión es probablemente debida a la estructura granular de la muestra sinterizada y no a una propiedad intrínseca de la fase mayoritaria.

Hay un modelo sencillo para explicar este comportamiento y que ha sido aplicado a otros óxidos (21) en forma satisfactoria. Consiste en imaginar el sólido (Fig.11a) compuesto por granos conduc-



tores (1) separados por capas aislantes (2), donde la corriente fluye a lo largo de arreglos paralelos de granos. El circuito equivalente en este modelo (Fig. 11b) es una resistencia ( $R_p$ ) un paralelo con un condensador ( $C_p$ ), donde ambos componentes dependen de la frecuencia como resultado de la conexión en serie de los dos circuitos  $R_1 \parallel C_1$  ("grano") y  $R_2 \parallel C_2$  ("capa aislante") con componentes independientes de la frecuencia. La dependencia de la frecuencia de  $R_p$  está dada por la siguiente expresión:

$$(4) \quad R_p = R_{\infty} + \frac{R_0 - R_{\infty}}{1 + \tau^2 \omega^2}$$

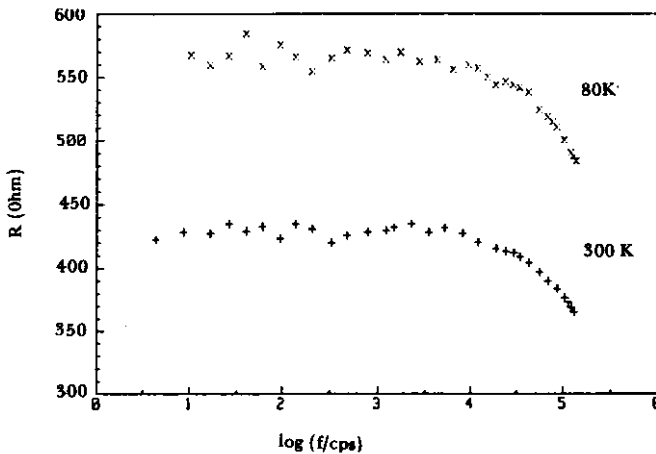
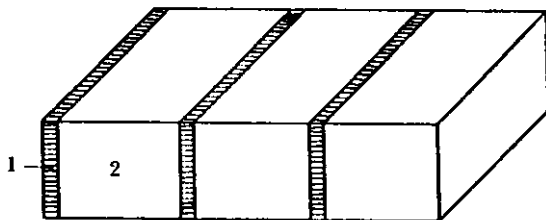


Figura 10. Resistencia en función de la frecuencia de la muestra LI



(a)

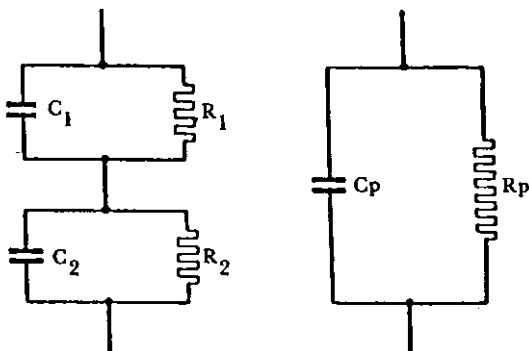


Figura 11. (a) Modelo de un conductor con estructura granular. (b) Circuito equivalente para ese modelo.

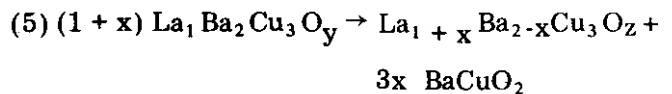
Los parámetros  $\tau$ ,  $R_0 = R(\omega \rightarrow 0)$  resistencia y  $R_{\infty} = R(\omega \rightarrow \infty)$  dependen de los valores de resistividad y constante dieléctrica de los dos materiales y especialmente de la relación de espesores  $x$  de la

capa aislante y el grano conductor. Del orden de magnitud de  $\gamma$ , que corresponde al inverso del rango de frecuencias donde hay dispersión, se puede estimar (22) que  $x \ll 1$ .

#### 4. Discusión

El resultado de las diferentes mediciones muestra en primer lugar que el remplazo del Y por el La afecta las propiedades del compuesto. A pesar de que se ha logrado substituir el Y por casi todas las tierras raras (exceptuando las terravalentes) (23), el caso del La es especial. Se ha logrado, por ejemplo, establecer una correlación positiva entre la temperatura crítica y el radio iónico de la tierra rara (24), cuya función es la de separar los planos de Cu y O. Dado que el La tiene el mayor radio de la serie debería esperarse una  $T_c$  de 107 K. Sin embargo, hay pocos reportes sobre la síntesis del compuesto 1-2-3 con La y en su mayoría hablan de temperaturas críticas inferiores a 90K.

Una hipótesis planteada para explicar este comportamiento (25), es que el La substituye parcialmente al Ba en la estructura debido a que tienen radios iónicos parecidos aunque el del La es menor (26). Esto quiere decir que hay una reacción de desproporcionamiento (26) de la que resulta una composición diferente:



El caso  $x = 0.5$  corresponde a otro compuesto, llamado 3-3-6 (tetragonal), que es químicamente similar al 1-2-3 pero no es superconductor (27). Para  $0 < x < 0.5$  se tiene una solución sólida y los parámetros de red disminuyen con la cantidad de La que substituyen el Ba (28).

Comparando los valores obtenidos para los parámetros de red (Tabla 1) con los reportados para distintos valores de  $x$  se puede constatar si la reacción (5) ocurre en nuestras muestras. Efectivamente los parámetros de las muestras E1, E2 y F1 corresponde a valores cercanos a 0.5 y los de la L1 a 0.1. Esto estaría en contradicción con los análisis de EDAX, que dan una composición (2-3-4) que no se ajusta a este modelo. Sin embargo, por una parte el análisis composicional confirma la presencia de  $BaCuO_2$ . Por otra parte las líneas de rayos x en el espectro de EDAX son muy cercanas, por lo cual puede haber un solapamiento que induce errores grandes en la composición. Esto no ocurre con los elementos Y, Ba y Cu, por lo cual los análisis concuerdan con lo esperado.

Asumiendo que efectivamente hay una substitución parcial del La por el Ba, ésta no puede ocurrir sino en forma aleatoria. Por lo tanto, se introduce de esta manera desorden en el sistema, el cual re-

percute a su vez en el ordenamiento de vacancias de oxígeno. Hay varios indicios de que dicho ordenamiento es esencial para superconductividad (29), de tal manera que al no existir el material cambia radicalmente su comportamiento eléctrico. Al haber una distribución aleatoria de potenciales se introduce la localización de estados electrónicos. De esta manera la conducción queda limitada al mecanismo VRH (30).

Es sorprendente ver que el comportamiento de este sistema se ajuste tan bien a la teoría. En especial el que el exponente coincida con lo predicho tiene una serie de consecuencias. Por una parte  $s = 1/4$  corresponde a un sistema tridimensional, luego el hecho de que la conducción de muestras semiconductoras no tenga carácter bidimensional ( $S_2D = 1/3$ ) significa que cuando hay localización la conductividad se vuelve isotrópica al haber saltos entre planos (6). Por otra parte en un sistema con correlación electrónica se esperaría  $s = 1/2$  (30), por lo tanto en estas muestras la interacción interelectrónica es débil. Igualmente se esperaría ese valor de  $s$  para un sistema granular (30), por lo cual se desprende que el comportamiento observado es de carácter intrínseco. Esto concuerda con lo observado en la dependencia de la frecuencia: puesto que la proporción de material aislante que separa los granos es baja, no incide mucho en el comportamiento resistivo total.

El mecanismo de VRH se ha observado generalmente en semiconductores amorfos, aunque a más bajas temperaturas. Por eso es sorprendente ver que en este sistema siga vigente hasta temperaturas cercanas al ambiente y es por lo tanto uno de los mejores ejemplos conocidos de conducción tipo VRH (6). En la teoría de Mott, el parámetro  $T_0$  está ligado al inverso de la longitud de localización  $\alpha$  y a la densidad de estados en el nivel de Fermi  $N(E_f)$  por la siguiente ecuación:

$$(6) \quad T_0 = 16 \alpha^3 / k_B N(E_f)$$

Con esa ecuación se puede estimar una de esas cantidades conociendo la otra. Debido a que no se conoce ninguna de las dos se puede estimar valores por comparación con otros sistemas. El orden de magnitud de  $1/\alpha$  es generalmente  $10 \text{ \AA}$  (30), por lo cual para los valores obtenidos para  $T_0$  ( $4 \cdot 10^4 \text{ K}$ ) se encuentra que  $N(E_f) \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ . Este es un valor que se encuentra en un rango razonable y que coincide con cálculos de estructuras de banda (31).

Los resultados obtenidos en EPR no son fáciles de interpretar. La variación del ancho de línea con la temperatura puede ser asociado con algún tipo de magnetismo colectivo (13), probablemente de tipo antiferromagnético. En cambio, la variación de  $I$  con  $T$  no tiene una explicación clara. Hay razones que inducen a pensar en el antiferromagnetismo. Por una parte ya ha sido observado dicho ordenamiento magnético en el compuesto  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  (32). Fuera de eso es muy plausible que exista dicho ordenamiento justamente en muestras no conductoras debido a la localización de estados (6).

En conclusión demostramos en este trabajo la existencia de una transición metal-no metal inducida por desorden, en particular por substitución del La por Ba, que incide en la distribución de vacancias de oxígeno en los planos donde normalmente ocurre la conducción. Contrariamente a lo que afirman teorías que explican la superconductividad por interacción interelectrónica fuerte, en el estado no metálico dicha interacción no juega ningún papel. Sin embargo, existe un ordenamiento magnético probablemente con acople antiferromagnético y que coincide con lo propuesto en dichas teorías. Finalmente, el comportamiento eléctrico observado en muestras semiconductoras sinterizadas es intrínseco al igual que en las superconductoras, ya que a pesar de la estructura granular hay una "percolación" de las regiones de interés.

#### BIBLIOGRAFIA

1. BEDNORZ, J. G. & MULLER, K. A. 1986. Z. Phys. B 64, 189.
2. BARDEEN, J. COOPER, L.N. & SCHRIEFFER, J. R. 1957. Phys. Rev. 108, 1175
3. GRANT, P. 1988. Conf. Lat. de Supercond., Río de Jan., Mayo 4 - 6
4. RICE, T.M. 1987. Z. Phys. B 67, 141
5. CARDONA, M. 1988. SLAFS V, Bogotá, julio 11 - 15
6. KASTNER, M. A. ct. al., 1988. Phys. Rev. B 37, 111
7. ANDERSON, P. W. 1987. Science 2, 1196  
EMERY, V. J. 1987. Phys. Rev. Lett 58, 794  
LEE, P. A. & READ, M. 1987. ibid. 58, 2691  
HIRSCH, J. E. 1987. ibid. 59, 228  
KIVELSON, S. A., ROKHSAR, D. S. & SETHNA, J. P. 1987. Phys. Rev. B 35, 8865.
8. EINZEL, D. "Theoretical Concepts of High Tc- Superconductivity", (inédito)
9. AHARONY, A. ct. al., 1988. Phys. Rev. Lett, 60, 1330
10. TORRANCE, J.B. 1988. Phys. Rev. Lett. 60, 542

11. **ONG, N. P.** 1987. Proc. Berkley Conf. Novel Mech. Supercond.
12. **MOTT, N. F. & DAVIES, E. A.** 1979. "Electronic Processes in Non - Crystalline Materials" Clarendon, Oxford.
13. **POSADA, E. et. al.,** Rev. Col. Fis., (en prensa)
14. **ALBINO, J. et. al.,** J. Phys. C.,(en prensa)
15. **OATLEY, C. W.** 1972. "The Scanning Electron Microscope" Cambridge UP, Cambridge.
16. **BETANCOURT, J., ESGUERRA, M. & FRANCO, G.** 1988. Proc. Lat. am. HTSC Río de Janeiro.
17. **MOTT, N. F.** 1968. J. Non - Cryst. Solids 1,1
18. **BOWDEM, G. J. et. al.,** 1987. J. Phys. C 20, 1545
19. **LOPEZ, C., MARINO, A., ESGUERRA, M. & FRANCO, G.** 1988. Proc. Lat. am. Cont. HTSC Río de Janeiro.
20. **STANKOWSKI, J. et. al.,** 1987. Phys. Rev. B 36, 7126
21. **HEYWANG, H.** 1963. Z. angew. Phys. 16,1
22. **KOOPS, C. G.** 1951. Phys. Rev. 83, 121
23. **HOR, P. H. et.al.,** 1987. Phys. Rev. Lett., 58, 1891
24. **ESCUADERO, R.** 1988. Primer Encuentro Latinoamericano de Bajas Temperaturas y Superconductividad, Bogotá.
25. **IZUMI, F. et. al.,** 1987. Jpn. J. Appl. Phys. L115
26. **MACCARRONIII, E. M. et. al.,** 1987. Proc. Mater. Res. Soc. Boston.
27. **DAVID, W. I. F. et. al.,** 1987. Nature 328, 328
28. **ONODA, M.** 1987. Solid State Commun. 64, 1225
29. **SREEDHAR, K. et. al.,** 1987. Solid State Commun. 63, 835
30. **BÖTTGER, H. & BRYKSIN, V.V.,** 1985. "Hopping Conduction in Solids" Akademie - Verlag, Berlin.
31. **MATTHEISS, L. F.** 1987. Phys. Rev. Lett. 58, 1028
32. **SHIRANE, G. et. al.,** 1987. Phys. Rev. Lett. 59, 1613

# GENERACION DE ULTRAVIOLETA EN SISTEMAS ATOMICOS BOMBEADOS POR UNA TRANSICION DE DOS FOTONES.\*

por

Angela María Guzmán-Hernández\*\*

## Resumen

Guzmán-Hernández, A.M.: Generación de ultravioleta en sistemas atómicos bombeados por una transición de dos fotones. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 567-577, 1990. ISSN 0370-3908.

Se considera un medio no lineal bombeado por un láser de frecuencia  $\gamma_1$  cuasi-resonante con una transición de dos fotones en el que se genera radiación coherente de frecuencia  $\gamma_2$  por dispersión Hiper-Raman estimulada. Mediante el análisis semiclásico de la dinámica de un sistema atómico de cuatro niveles se discute la generación de la suma y diferencia de frecuencias  $2\gamma_1 \pm \gamma_2$  por mezcla de cuatro ondas. Se estudia la propagación de ondas en el medio en el estado estacionario teniendo en cuenta desajustes de fase y se realiza una comparación cualitativa con resultados experimentales en Cd.

Se muestra que la generación de la suma puede ser un proceso más eficiente que la generación de la diferencia en caso de existir ajuste de fase perfecto. Para lograr este ajuste de fase debe considerarse la variación del índice de refracción del medio en la región de saturación del campo Hiper-Raman.

## I. Introducción

Hasta hace pocas décadas la mayoría de los efectos ópticos observables podían atribuirse a procesos de interacción materia-radiación que a nivel microscópico involucran la emisión o absorción de un sólo fotón por un átomo o un electrón. Tal es el origen de fenómenos como la refracción, dispersión, absorción, el efecto fotoeléctrico, etc., procesos que son prácticamente los únicos observables con fuentes incoherentes, debido a que el flujo de fotones no es suficiente para que sea apreciable la probabilidad de que más de un fotón incida sobre un átomo durante el tiempo de interacción.

La absorción simultánea de dos fotones por un átomo fue predicha por Marie Göppert-Mayer (1) en 1931 en su tesis de grado sobre teoría de perturbaciones de segundo orden. Sin embargo, a las intensidades de las fuentes de luz disponibles en la época, el proceso era demasiado poco probable para ser observable. Habría que esperar tres décadas, hasta la aparición del láser, para observar la gran variedad de procesos multifotónicos que conocemos hoy.

Con el láser nació por consiguiente también un nuevo campo de la óptica: la óptica no lineal, que estudia fenómenos característicos de la interacción de la materia con radiación de alta intensidad. Su desarrollo ha sido paralelo con la Física del Láser y ha hecho posible extender cada vez más el rango espectral cubierto por radiación coherente. En el mismo año en que Maiman (2) pusiera en funcionamiento el láser de Rubí, Franken et al. (3), doblaron su frecuencia en un cristal de cuarzo. Su trabajo motivó durante una década la búsqueda de cris-

\* Trabajo ganador del Premio Academia de Ciencias del Tercer Mundo, Convocatoria 1988. Area de Física.

\*\* Departamento de Física Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E.

tales adecuados para incrementar la eficiencia de la generación del segundo armónico, hasta constituir-la en una técnica estándar.

Los efectos no lineales en gases parecían, en primera instancia, mucho más difíciles de observar: para medios isotrópicos, con simetría de inversión, efectos de segundo orden son prohibidos dentro de la aproximación dipolar no relativista\*. A finales de la década de los sesenta New y Ward (6) obtuvieron por primera vez un efecto de tercer orden en un gas: la generación del tercer armónico del láser de rubí en una celda de vapor. Aunque las susceptibilidades no lineales son en general mucho menores para gases que para líquidos o sólidos, el uso de un gas como medio no lineal ofrece la posibilidad de aumentar la intensidad incidente mediante una mayor focalización del haz, sin el peligro de rotura que aqueja a los cristales: aún en caso de descarga eléctrica, el material no se destruye. Además, a diferencia de los cristales, muchos gases son transparentes en la región espectral del ultravioleta de vacío (VUV)  $\lambda_{\text{VUV}} = 100\text{-}200$  nm.

La eficiencia de generación de armónicos (y de otros fenómenos no lineales) en un medio depende, sin embargo, fuertemente del desajuste de fase debido a las diferentes velocidades de propagación de la frecuencia fundamental y de su armónico. En cristales birrefringentes el ajuste de fase se logra con el rayo extraordinario. En gases existe la posibilidad de obtener ajuste de fase no colineal mediante una focalización adecuada del haz incidente\*; pero en celdas de vapor el método más utilizado es el propuesto por Harris y Miles (8), consistente en mezclar el gas activo con un gas que cambia las propiedades dispersivas del medio a la frecuencia de interés, denominado "buffer gas". Para ondas planas la proporción de los gases debe ser tal que el índice de refracción de la mezcla sea el mismo para la frecuencia fundamental y para el armónico, es decir, tal que el desajuste de fase sea nulo; para haces focalizados, según cálculos realizados por Bjorklund (9), la generación del tercer armónico y de la suma de frecuencias es posible sólo si el desajuste de fase es negativo\*\*, y su valor óptimo depende del grado de focalización del haz.

\* Tales efectos han sido observados pero su origen no ha sido claramente establecido. Ninguno de los modelos teóricos propuestos, incluso el más ampliamente aceptado (4), ha podido predecir correctamente las dependencias observadas experimentalmente. Para mayor información ver (5) y las referencias allí citadas.

\* Este tipo de ajuste de fase se utiliza actualmente para generar radiación en el ultravioleta extremo en jets de Kr, evitando así, la fuerte absorción que tendría lugar en celdas de vapor (7).

\*\* Con la convención de Bjorklund (9) un desajuste de fase negativo se obtiene cuando el índice de refracción para la frecuencia fundamental es mayor que para el armónico, lo que requiere el uso de gases negativamente dispersivos entre la longitud de onda fundamental y del armónico.

El trabajo pionero en la búsqueda de radiación sintonizable en el VUV y el ultravioleta extremo (XUV),  $\lambda_{\text{XUV}} < 100$  nm, fue también realizado por Harris y colaboradores. Mediante generación de segundo armónico y suma de frecuencias en cristales obtuvieron a partir de un láser de Nd: YAG, radiación de 355 nm. En una mezcla de gases Cd: Ar, en proporciones adecuadas para lograr ajuste de fase, se produjo la suma del doble de la frecuencia de esta radiación con la frecuencia fundamental (1.06  $\mu$ m) del láser de Nd: YAG (10). Mediante la generación de tercer armónico en mezcla Xe: Ar (11) y en Ar (12) se obtuvo radiación VUV sintonizable en pulsos de 20 nseg. y con potencia pico de  $\sim 1$  W.

Por la misma época Hodgson y colaboradores (13) introdujeron un nuevo método para obtener radiación coherente y de gran sintonizabilidad en el VUV. En una celda de Sr se enfocaron dos láseres de colorante de frecuencias  $\nu_1$  y  $\nu_2$ . El primero fue sintonizado en resonancia con una transición de dos fotones, y el segundo de modo que  $2\nu_1 + \nu_2$  alcanzara la región de ionización. En estas condiciones, la sintonizabilidad de  $\nu_2$  determina la del campo de frecuencia  $\nu_4 = 2\nu_1 + \nu_2$  generado como suma de frecuencias por mezcla de cuatro ondas (4-WSM). Los gases más utilizados con este propósito son los gases nobles y los vapores metálicos, que ofrecen mayor eficiencia cuando  $\nu_4$  coincide con un estado autoionizante embebido en el continuo.

En la actualidad, la mezcla no lineal de frecuencias en gases es un método bien establecido para la generación de radiación coherente y sintonizable en las regiones espectrales del ultravioleta (UV),

$\lambda_{\text{UV}} = 200\text{-}400$  nm,  $\text{VUV}^{[14-17]}$  y  $\text{XUV}^{[16,17]}$  El fundamento teórico de estos efectos no lineales dentro de la teoría de perturbaciones lo constituyen los trabajos de Armstrong, Bloembergen, Ducuing, Pershan (18) y Bjorklund (9), quienes encontraron expresiones para las susceptibilidades no lineales de la función de desajuste de fase respectivamente. Mediante el formalismo de la matriz densidad (19) se han discutido los efectos de la saturación de la transición de dos fotones, los corrimientos Stark, la fotoionización y el cambio de índices de refracción en el medio debido a la redistribución de poblaciones. Algunos autores han sugerido que debido a estos efectos la eficiencia de conversión para bombeo resonante difícilmente excede la obtenida con bombeo lejos de resonancia (20). Existen varios artículos de revisión sobre los principios básicos del método y los avances experimentales logrados (17, 21, 22) a los que el lector es referido para mayores detalles.

El objetivo de este trabajo es analizar teóricamente la generación por mezcla de cuatro ondas de la suma  $\nu_4 = 2\nu_1 + \nu_2$  (4-WSM) y la diferencia  $\nu_3 = 2\nu_1 - \nu_2$  (4-WDM), del doble de la frecuencia  $\nu_1$  de un láser de bombeo (ver Fig. 1) con la frecuencia  $\nu_2$  del campo generado en el medio por dispersión hiper-

Raman\*. La generación de la diferencia  $\nu_3$  no está sujeta a ajuste de fase en la dirección del haz incidente y ha sido observada fácilmente (17, 24, 28). Análisis teóricos de este fenómeno, realizados dentro de la aproximación semiclásica (27), dan buena cuenta de sus características generales; sin embargo, en experimentos recientes (29) se ha observado que la generación de la diferencia es atenuada cuando la suma  $2\nu_1 + \nu_2$  corresponde a una de las frecuencias de transición a un estado Rydberg.

El estudio de los dos fenómenos mencionados y de efectos competitivos entre ellos requiere del análisis de la dinámica de un sistema atómico de cuatro niveles activos (Ver Fig. 1), en interacción con cuatro campos, a saber: el láser de bombeo, el campo hiper-Raman y los campos generados por 4-WDM y 4-WSM. Dado que el campo hiper-Raman se amplifica a lo largo del medio no lineal, la polarización fuente de 4-WSM varía con la coordenada del amplificador; por consiguiente cálculos basados en el tratamiento perturbativo (9, 18), no permiten predecir correctamente las eficiencias de conversión. En la sección II se plantean las ecuaciones dinámicas del sistema atómico en interacción con el campo electromagnético total dentro de la aproximación semiclásica. En la Sección III se obtienen las ecuaciones de propagación de los campos dentro de la aproximación de amplitudes y fases lentamente variables.

En la sección IV se estudia la amplificación de los campos en la región de campo hiper-Raman débil y se obtienen expresiones analíticas para la ganancia de los diferentes procesos en el amplificador, incluyendo desajustes de fase.

Los efectos de saturación en la transición de dos fotones, la fotoionización y la absorción del haz incidente y de la radiación generada han sido discutidos en la literatura (19, 20). Sin embargo, el efecto de la fluorescencia y/o la inversión de población generada entre el nivel  $|2\rangle$  (Fig. 1) y un nivel intermedio energéticamente inferior ha sido despreciado para polarizaciones no lineales inducidas completamente por campos externos (19). En un amplificador como el aquí considerado, la saturación de la radiación hiper-Raman conlleva una distribución de poblaciones diferentes incluso de la correspondiente a la saturación de la transición de dos fotones. El régimen de campo hiper-Raman fuerte es discutido en la Sección V. Se estudia la dependencia de los procesos considerados con la densidad del vapor activo y la potencia del haz incidente; se analiza el efecto del desajuste de fase y se presentan curvas de sintonizabilidad de la radiación generada en condiciones de ajuste de la fase mediante mezcla con

un "buffer gas". La Sección VI contiene discusión de los resultados y comparación con datos experimentales y la Sección VII las conclusiones generales.

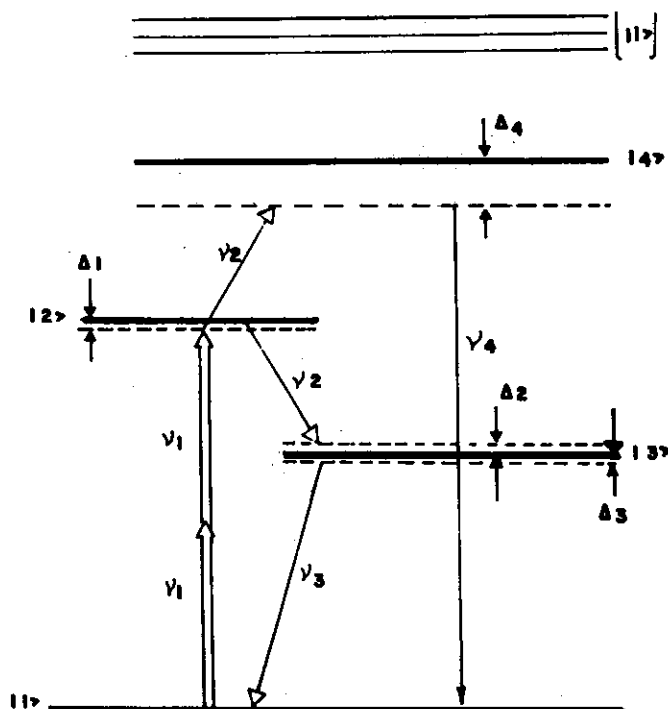


Figura 1. Diagrama de niveles activos indicando los diferentes fenómenos no lineales de interés.

## II. Teoría semiclásica:

Cuando efectos de naturaleza puramente cuántica del campo, como la emisión espontánea, no son determinantes de la dinámica del sistema, el análisis de la interacción de sistemas atómicos con la radiación electromagnética puede ser efectuado semiclásicamente considerando el campo como una onda clásica que satisface las ecuaciones de Maxwell. En ausencia de campo electromagnético, un sistema atómico aislado está caracterizado por un conjunto de estados propios del hamiltoniano atómico  $H_a$  que satisfacen una ecuación de Schrödinger independiente del tiempo. El campo electromagnético produce transiciones entre estos estados, e incluso corrimientos y desdoblamiento dinámicos de ellos (30).

Cuando el campo electromagnético es monocromático y cuasi-resonante con una transición atómica, la descripción teórica del sistema átomo-campo puede simplificarse notablemente considerando solamente los dos estados atómicos acoplados cuasi-resonantemente por el campo. La interacción de tales "átomos de dos niveles" con campos electromagnéticos ha sido ampliamente estudiada (ver. p. ej. 31).

La descripción teórica no perturbativa de los fenómenos objeto de investigación en este trabajo, requiere considerar un sistema atómico con cuatro niveles activos y un conjunto de estados intermedios  $\{|1\rangle$  que, conjuntamente con el estado  $|3\rangle$ , de-

\* Fenómeno no lineal en que dos fotones del campo incidente son absorbidos con la emisión simultánea de un fotón de menor energía. La dispersión hiper-Raman ha sido estudiada en detalle tanto teórica como experimentalmente (23-27) y, por su gran eficiencia de conversión, ha sido considerada como una posible fuente de radiación coherente sintonizable en el infrarrojo (23).

terminan la probabilidad de la transición de dos fotones (1, 32, 33) (Ver Fig. 1). El campo electromagnético en el medio es la superposición del campo láser incidente con el campo hiper-Raman y los campos generados por mezcla de cuatro ondas. Por sencillez se considerarán los campos como ondas planas linealmente polarizadas a lo largo de la dirección  $u$  y propagándose en la dirección  $z$ . El campo eléctrico total está dado por:

$$\mathbf{E}(z, t) = 1/2u \sum_{\alpha=1}^4 (\mathbf{E}_{\alpha}(z, t) \exp(i\mathbf{k}_{\alpha}z - i\nu_{\alpha}t) + \text{c.c.}) \quad (1)$$

donde  $\mathbf{k}_{\alpha} = k_{\alpha}z$ ,  $\alpha = 1, 2, 3, 4$ , son los vectores de onda de los diferentes campos en el medio, y  $\nu_{\alpha}$  su frecuencia angular\*. Las amplitudes complejas  $\mathbf{E}_{\alpha}(z, t)$  se consideran lentamente variables durante un período y a lo largo de una longitud de onda.

El Hamiltoniano del sistema atómico sujeto a interacción con el campo está dado en la aproximación dipolar eléctrica por:

$$H = H_a + U \quad (2)$$

donde  $U = -\mathbf{d} \cdot \mathbf{E}(z, t)$  representa el hamiltoniano de interacción y  $\mathbf{d} = -e\mathbf{r}$  es el operador momento dipolar eléctrico atómico.

La matriz densidad evoluciona de acuerdo con la ecuación

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -i/\hbar [H, \rho] + \dot{\rho}_R \quad (3)$$

donde  $\dot{\rho}_R$  ha sido introducido fenomenológicamente para simular el efecto de procesos de relajación tales como emisión espontánea y relajación de fase o transferencia de población por colisiones.

Siguiendo el método empleado en (27), los elementos de la matriz o pueden expandirse en serie de Fourier según:

$$\rho_{mj}(z, t) = \sum_{\text{KNLM}} \sigma_{mj}^{\text{KNLM}} \exp(i\nu_{\text{KNLM}}t - ik_{\text{KNLM}}z) \quad (4)$$

donde  $\sigma_{mj}^{\text{KNLM}}$  son amplitudes lentamente variables de términos rápidamente oscilantes con frecuencias  $\nu_{\text{KNLM}} = K\nu_1 + N\nu_2 + L\nu_3 + M\nu_4$  y de rápida dependencia espacial determinada por  $k_{\text{KNLM}} = Kk_1 + Nk_2 + Lk_3 + Mk_4$ .

Para cada elemento matricial  $\rho_{mj}$  hay una amplitud resonante  $\sigma_{mj}^{\text{KNLM}}$  tal que si  $\hbar\omega_{mj}$  es la diferencia de energía entre los estados  $|m\rangle$  y  $|j\rangle$ , se satisface:

$$\omega_{mj} + \nu_{\text{KNLM}} = 0 \quad (5)$$

Conservando sólo los términos de primer orden en  $\xi_{\alpha}$ ,  $\alpha=2, 3, 4$ , se obtienen ecuaciones para las amplitudes  $\sigma_{mj}^{\text{KNLM}}$ , que describen la evolución de poblaciones ( $m=j$ ) y elementos matriciales no diagonales cuasiresonantes ( $m \neq j$ ) (por simplicidad omitimos los supraindices KNLM que están determinados por la relación (5)):

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{21} &= -(\Gamma_{21} + i\Delta_1 + i\delta_{21})\sigma_{21} + i\nu_{21}(\sigma_{22} - \sigma_{11}) \\ &\quad + \sum_{\alpha=3,4} (i\sigma_{2\alpha}\nu_{\alpha 1} - i\nu_{2\alpha}\sigma_{\alpha 1}) \exp(i\phi_{\alpha}z) \\ \dot{\sigma}_{23} &= -(\Gamma_{23} + i\Delta_2 + i\delta_{23})\sigma_{23} + i\nu_{23}(\sigma_{22} - \sigma_{33}) - i\sigma_{43}\nu_{24} \\ &\quad + (i\sigma_{21}\nu_{13} - i\nu_{21}\sigma_{13}) \exp(i\phi_3z) \\ \dot{\sigma}_{13} &= -(\Gamma_{13} - i\Delta_3 + i\delta_{13})\sigma_{13} - i\nu_{13}(\sigma_{33} - \sigma_{11}) \\ &\quad - i\sigma_{43}\nu_{14} \exp(-i\phi_2z) + i\sigma_{12}\nu_{23} - i\nu_{12}\sigma_{23} \exp(i\phi_3z) \\ \dot{\sigma}_{24} &= -(\Gamma_{24} + i\Delta_1 - i\Delta_4 + i\delta_{24})\sigma_{24} + i\nu_{24}(\sigma_{22} - \sigma_{44}) - i\sigma_{34}\nu_{23} \\ &\quad + (i\sigma_{21}\nu_{14} - i\nu_{21}\sigma_{14}) \exp(i\phi_4z) \\ \dot{\sigma}_{14} &= -(\Gamma_{14} - i\Delta_4 + i\delta_{14})\sigma_{14} - i\nu_{14}(\sigma_{44} - \sigma_{11}) \\ &\quad - i\sigma_{34}\nu_{13} \exp(i\phi_2z) + (i\sigma_{12}\nu_{24} - i\nu_{12}\sigma_{24}) \exp(i\phi_4z) \\ \dot{\sigma}_{34} &= -(\Gamma_{34} - i\Delta_4 + i\Delta_3 + i\delta_{34})\sigma_{34} + (i\sigma_{32}\nu_{24} - i\nu_{32}\sigma_{24}) \\ &\quad + (i\sigma_{31}\nu_{14} - i\nu_{31}\sigma_{14}) \exp(-i\phi_2z) \\ \dot{\sigma}_{11} &= \Gamma_3\sigma_{33} + (i\sigma_{12}\nu_{21} + i\nu_{31}\sigma_{13} + \text{c.c.}) \\ \dot{\sigma}_{22} &= -\Gamma_2\sigma_{22} - (i\sigma_{12}\nu_{21} + i\nu_{23}\sigma_{32} + \text{c.c.}) \\ \dot{\sigma}_{33} &= -\Gamma_3\sigma_{33} + \Gamma_2\sigma_{22} + (i\sigma_{32}\nu_{23} + i\nu_{13}\sigma_{31} + \text{c.c.}) \\ \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} + \sigma_{44} &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

Los factores  $\Gamma_j$ ,  $j=2, 3, 4$ , representan las tasas de depoblación de los niveles  $|2\rangle$ ,  $|3\rangle$  y  $|4\rangle$  respectivamente y  $\Gamma_{mj}$ , con  $m \neq j$ , las tasas de relajación de fase debida a colisiones elásticas. Las desintonizaciones de los campos de las frecuencias atómicas  $\omega_{mj}$  están definidas como sigue:

$$\Delta_1 = \omega_{21} - 2\nu_1, \quad \Delta_2 = \omega_{23} - \nu_2, \quad \Delta_3 = \omega_{31} - \nu_3, \quad \Delta_4 = \omega_{41} - \nu_4 \quad (7)$$

Por conservación de energía  $2\nu_1 + \nu_2 = \nu_4$  y  $\Delta_1 = \Delta_2 + \Delta_3$ . Los corrimientos Stark dinámicos de los niveles  $m, k = 1, 2, 3, 4$ , con  $m, \delta_{mk} =: \delta_m - \delta_k$ , son proporcionales a la intensidad del campo láser incidente y están dados por:

$$\delta_m = -\frac{1}{2\hbar^2} \sum_j \frac{|d_{mj}|^2 \omega_{jm}}{\omega_{jm}^2 - \nu_j^2} |E_1|^2 \quad (8)$$

\* El símbolo  $\nu_{\alpha}$  será empleado para designar la frecuencia angular de los campos y  $\omega_{1j}$  designará las frecuencias angulares de transiciones atómicas.



donde la suma sobre  $j$  incluye además de los cuatro niveles activos, el conjunto  $\{|i\rangle\}$  de niveles intermedios para la transición de dos fotones. Los elementos matriciales reducidos del hamiltoniano de interacción están dados por:

$$v_{23} = -d_{23} \bar{E}_2 / 2\hbar, \quad v_{31} = -d_{31} \bar{E}_3 / 2\hbar, \quad v_{42} = -d_{24} \bar{E}_2 / 2\hbar, \quad v_{41} = -d_{41} \bar{E}_4 / 2\hbar, \\ \text{y } v_{21} = k_{21} \bar{E}_1^2 / 2\hbar, \text{ con } k_{21} = 1/2\hbar \sum_j d_{2j} d_{j1} / (\omega_{2j} - \nu_1) \quad (9)$$

Los desajustes de fase en los distintos procesos de mezcla de cuatro ondas que toman lugar en el sistema están representados por  $\phi_2 = k_4 - 2k_2 - k_3$ ,  $\phi_3 = k_3 + k_2 - 2k_1$  y  $\phi_4 = k_{41} - k_2 - 2k_1$ .

### III. Ecuaciones de propagación de los campos en el medio

La propagación de campos electromagnéticos en medios dieléctricos homogéneos está descrita por la ecuación de onda:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (10)$$

La polarización  $\mathbf{P}$  del medio, generada por el campo  $\mathbf{E}$  es fuente de campo en la ecuación (10) y puede expresarse en forma análoga a la ecuación (1) como una superposición de ondas cuasi-monocromáticas:

$$\mathbf{P}(z, t) = 1/2\omega \sum_{\alpha=1}^4 \mathcal{P}_{\alpha}(z, t) \exp(ik_{\alpha}z - j\omega_{\alpha}t) + \text{c.c.} \quad (11)$$

donde  $\mathcal{P}_{\alpha}(z, t)$  son amplitudes complejas.

Llevando (1) y (11) a (10) y suponiendo que las amplitudes y fases de los campos y polarizaciones varían lentamente en un período y una longitud de onda (aproximación de amplitud y fase lentamente variables) se obtiene:

$$\frac{\partial \mathcal{E}_{\alpha}}{\partial z} + \frac{1}{v_{\alpha}} \frac{\partial \mathcal{E}_{\alpha}}{\partial t} = \frac{ik_{\alpha}}{2\epsilon_{\alpha}} \mathcal{P}_{\alpha}^{NL} \quad \alpha=2, 3, 4 \quad (12)$$

donde el término de absorción no resonante ha sido omitido por ser despreciable en comparación con otros términos.

La polarización macroscópica está relacionada con el momento dipolar atómico a través del promedio mecanocuántico:

$$\mathbf{P} = N \text{Tr}(\rho \mathbf{d}) \quad (13)$$

donde  $N$  es la densidad atómica,  $\rho$  es la matriz densidad atómica y  $\mathbf{d}$  el operador momento dipolar

eléctrico atómico. Utilizando esta relación y las ecuaciones (4) y (11) se obtiene:

$$\mathcal{P}_2^{NL} = 2N (d_{32} \sigma_{23} + d_{24} \sigma_{42}) \\ \mathcal{P}_3^{NL} = 2N d_{13} \sigma_{31} \\ \mathcal{P}_4^{NL} = 2N d_{14} \sigma_{41} \quad (14)$$

Las contribuciones de los elementos no resonantes determinan la susceptibilidad lineal y por ende la velocidad de propagación  $v_{\alpha}$  de la onda en el medio.

Las ecuaciones (12) forman un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales en dos variables, acopladas a través de (14) con las ecuaciones (6). Para el estudio de propagación de pulsos en el medio, el sistema completo debe ser resuelto numéricamente, con gran consumo de tiempo de cálculo. Sin embargo, algunas características de la ganancia para los diversos procesos no lineales pueden ser analizadas en el estado estacionario, esto es, cuando todas las derivadas temporales son nulas. El problema se reduce así a la solución de un sistema de ecuaciones algebraicas para la matriz densidad y un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias para la propagación de los campos en el medio. Esta solución es estrictamente válida para el caso de bombeo con láseres continuos, y aproximada para pulsos de mayor duración que el inverso de las tasas de relajación del sistema.

De (12), (14), y las definiciones (9) de los elementos matriciales reducidos de la interacción, se obtiene para el estado estacionario:

$$\frac{\partial v_{23}}{\partial z} = -i\lambda_2 (\sigma_{23} + \mu \sigma_{42}) \quad , \quad \lambda_2 = \frac{k_2 N}{2\hbar \epsilon_2} |d_{23}|^2 \quad , \quad \mu = \frac{d_{24}}{d_{23}^*} \\ \frac{\partial v_{31}}{\partial z} = -i\lambda_3 \sigma_{31} \quad , \quad \lambda_3 = \frac{k_3 N}{2\hbar \epsilon_3} |d_{13}|^2 \\ \frac{\partial v_{41}}{\partial z} = -i\lambda_4 \sigma_{41} \quad , \quad \lambda_4 = \frac{k_4 N}{2\hbar \epsilon_4} |d_{14}|^2 \quad (15)$$

Para el láser de bombeo existe una ecuación análoga, pero los factores involucrados son pequeños (27) y puede considerarse que su amplitud permanece constante.

### IV. Ganancia para campo Hiper-Raman débil

Debido a la inversión de población creada por el láser de bombeo entre los estados  $|2\rangle$  y  $|3\rangle$ , el campo hiper-Raman es amplificado inicialmente exponencialmente y eventualmente alcanza la saturación al propagarse en el medio. Para muestras de pequeño espesor efectivo, la ganancia hiper-Raman (34, 35) y de la mezcla de cuatro ondas está determinada por la solución de las ecuaciones (6) a primer orden en  $v_{23}$ ,  $v_{13}$  y  $v_{41}$ .

Una simplificación adicional puede hacerse considerando que cuando la frecuencia  $2\nu_1 + \nu_2$  dista de la resonancia con el nivel  $|4\rangle$ , la población en ese estado es aproximadamente nula y el efecto del acoplamiento con  $\sigma_{34}$  es despreciable. Resolviendo en el estado estacionario y con estas aproximaciones las ecuaciones (6) se obtiene:

$$\sigma_{2j} = \frac{D_{2j}}{S_1 S_{2j}} (iV_{2j} (\beta_j + D_{21}^* D_{1j} |V_{12}|^2) + V_{1j} V_{21} [D_{21} + D_{1j} (1 + \beta_j)] e^{-i\phi_j z}) \quad (16)$$

$$\sigma_{1j} = \frac{D_{1j}}{S_1 S_{2j}} (iV_{1j} (1 + \beta_j - D_{21} D_{2j} |V_{12}|^2) + V_{12} V_{2j} (D_{2j} \beta_j - D_{21}^*) e^{i\phi_j z}), \quad j = 3, 4$$

donde

$$D_{21} = (\Gamma_{21} + i\Delta_1 + i\delta_{21})^{-1}$$

$$D_{23} = (\Gamma_{23} + i\Delta_2 + i\delta_{23})^{-1}$$

$$D_{24} = (\Gamma_{24} - i\Delta_4 + i\delta_{24})^{-1}$$

$$D_{13} = (\Gamma_{13} - i\Delta_3 + i\delta_{13})^{-1}$$

$$D_{14} = (\Gamma_{14} + i\Delta_4 + i\delta_{14})^{-1}$$

$$S_1 = 1 + \mathcal{L}_1^2 I_1^2$$

$$\mathcal{L}_1 = \frac{\Gamma_{21}^2}{\Gamma_{21}^2 + (\Delta_1 + \delta_{21})^2}$$

$$I_1 = 2|V_{21}| \sqrt{(\Gamma_1/\Gamma_{21})}$$

$$\Gamma_1 = 1/2 (2/\Gamma_2 + 1/\Gamma_3)$$

$$S_{2j} = 1 + D_{2j} D_{1j} |V_{21}|^2 \quad (17)$$

$$\beta_3 = (1/\Gamma_2 - 1/\Gamma_3) \mathcal{L}_1 I_1^2 / (2\Gamma_1)$$

$$\beta_4 = \mathcal{L}_1 I_1^2 / (2\Gamma_2 \Gamma_1)$$

Llevando (16) a (15) se obtiene

$$\frac{dv_{23}}{dz} = Av_{23} + Bv_{13} e^{-i\phi_3 z} + Cv_{41} e^{i\phi_4 z}$$

$$\frac{dv_{13}}{dz} = Dv_{13} + Fv_{23} e^{i\phi_3 z} \quad (18)$$

$$\frac{dv_{41}}{dz} = Gv_{41} + Hv_{23} e^{-i\phi_4 z}$$

donde

$$A = \Lambda_2 \left( \frac{D_{23}}{S_1 S_{23}} (\beta_3 + D_{21}^* D_{13} |V_{12}|^2) - |\mu|^2 \frac{D_{24}^* (\beta_4 + D_{21}^* D_{14} |V_{12}|^2)}{S_1 S_{24}^*} \right)$$

$$B = -i \Lambda_2 \frac{D_{23}}{S_1 S_{23}} V_{21} [D_{21} + D_{13} (1 + \beta_3)]$$

$$C = -i \Lambda_2 \mu \frac{D_{24}^*}{S_1 S_{24}^*} V_{12} [D_{21}^* + D_{14}^* (1 + \beta_4)]$$

$$D = -\Lambda_3 \frac{D_{13}}{S_1 S_{23}} (1 + \beta_3 - D_{21} D_{23} |V_{12}|^2) \quad (19)$$

$$F = i \Lambda_3 \frac{D_{13}}{S_1 S_{23}} V_{12} (D_{23} \beta_3 - D_{21}^*)$$

$$G = -\Lambda_4 \frac{D_{14}^*}{S_1 S_{24}^*} (1 + \beta_4 - D_{21}^* D_{24}^* |V_{12}|^2)$$

$$H = -i \Lambda_4 \frac{D_{14}^*}{S_1 S_{24}^*} \mu^* V_{21} (D_{24}^* \beta_4 - D_{21})$$

Introduciendo las nuevas variables

$$v_{13} =: V_{13} \exp(-i\phi_3 z), \quad v_{41} =: V_{41} \exp(i\phi_4 z) \quad (20)$$

las ecuaciones (18) toman la forma:

$$\frac{dV_{23}}{dz} = AV_{23} + BV_{13} + CV_{41} \quad (a)$$

$$\frac{dV_{13}}{dz} = (D - i\phi_3) V_{13} + FV_{23} \quad (b) \quad (21)$$

$$\frac{dV_{41}}{dz} = (G + i\phi_4) V_{41} + HV_{23} \quad (c)$$

La solución analítica del sistema de ecuaciones (21) se obtiene sin mayor complicación mediante la transformada de Laplace. Si el tiempo de vida del estado  $|2\rangle$  es mucho mayor que el inverso de las ratas de relajación  $r_{1j}$ , el acoplamiento del campo hiper-Raman con los campos  $E_3$  y  $E_4$  en la ecuación (21a) es despreciable y se obtienen expresiones simplificadas para la transformada inversa:

$$v_{23} = V_{23}(0) \exp(Az)$$

$$V_{13} = V_{23}(0) \frac{F}{D - A + i\phi_3} (\exp(Az) - \exp(Dz - i\phi_3 z)) \quad (22)$$

$$V_{41} = V_{23}(0) \frac{H}{A - G - i\phi_4} (\exp(Az) - \exp(Gz + i\phi_4 z))$$

Se ha supuesto que el único campo no nulo en  $z=0$  es  $E_2$  ( $V_{23}(0) \neq 0$ ). Puesto que las partes reales de D y G son negativas, el crecimiento de los campos  $E_3$  y  $E_4$  para  $z > D^{-1}, G^{-1}$  es exponencial y con la misma ganancia A del campo hiper-Raman. El desajuste de fase produce en ambos casos dos efectos: (a) Disminuye el factor multiplicativo de la exponencial, disminuyendo por ende la eficiencia de conversión. (b) Introduce oscilaciones en  $E_3$  y  $E_4$  para  $z < D^{-1}$  y  $z < G^{-1}$  respectivamente.

Este resultado analítico puede ser confrontado con cálculos numéricos. El programa utilizado resuelve el sistema de ecuaciones (6) en el estado estacionario para valores dados de los campos, mediante una rutina de inversión de matrices. Los elementos  $\sigma_{ij}$  así determinados son llevados a (15) para avanzar en un paso la integración numérica de las ecuaciones de propagación de los elementos matriciales reducidos  $v_{ij}$ . La integración se realiza mediante un predictor-corrector tipo Adams-Bashforth. Los nuevos valores de los campos se utilizan en (6) para recalcular la matriz densidad y así sucesivamente.

Para efectos del cálculo numérico se ha elegido como unidad de tiempo el nseg. y de longitud el cm. Las ratas de relajación  $\Gamma_2=0.1$ ,  $\Gamma_3=1.$ ,  $\Gamma_{1j}=10$   $1 \neq j=1,2,3,4$ , y la frecuencia efectiva de Rabi para la transición de dos fotones  $|v_{21}|=1.21.$ , están dadas en  $\text{nseg}^{-1}$ . Las ganancias  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  y  $\lambda_4$  (ec. 15) están dadas en  $\text{nseg}^{-1}\text{cm}^{-1}$  y guardan entre sí la relación  $\lambda_2 = \lambda_3/10 = \lambda_4$ . Estos valores han sido elegidos en concordancia con valores característicos de la generación de radiación de 158.9 nm y 229 nm en vapor de Cd (24), experimento al que se hará referencia más adelante.

Los resultados numéricos para  $\lambda_2=37$  y  $\Delta_4=100$  pueden verse en las Figs. 2, 4. Por simplicidad se ha realizado el cálculo para  $\Delta_1=0$ , haciendo nulos arbitrariamente los corrimientos Stark dinámicos. En la Fig. 2 se observa el crecimiento exponencial, y con igual ganancia, de la intensidad de los campos con la longitud del amplificador para  $z \leq 7$ , en concordancia con las ecuaciones (22). Las curvas continuas fueron obtenidas suponiendo ajuste de fase perfecto; la curva punteada para desajustes de fase constantes  $\phi_3=-1$ ,  $\phi_4=-2$ . Puede observarse que la introducción de un desajuste de fase

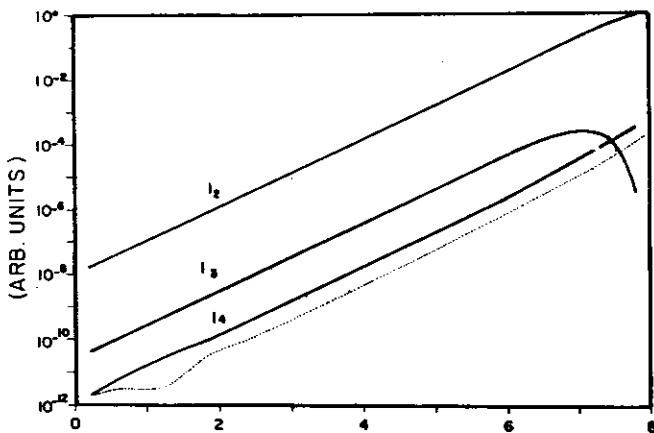


Figura 2. Intensidades de los campos  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_4$  en unidades arbitrarias como función de la coordenada del amplificador para una densidad de vapor constante. Las líneas continuas corresponden a desajustes de fase nulos y la línea punteada a  $\phi_3=-1$ ,  $\phi_4=-2\text{cm}^{-1}$ . El cálculo fue realizado para  $\lambda_2=37\text{nseg}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $\Delta_1=\Delta_2=0$ ,  $\Delta_4=100$ ,  $\Gamma_2=0.1$ ,  $\Gamma_3=1.$ ,  $\Gamma_{1j}=10$   $\text{nseg}^{-1}$ ,  $1 \neq j=1,2,3,4$ , y  $|v_{21}|=1.21$   $\text{nseg}^{-1}$ .

Los corrimientos Stark fueron hechos nulos arbitrariamente.

conlleva la aparición de una oscilación para  $z \leq 7$  y una disminución notable de la intensidad del campo  $E_4$ , dejando prácticamente inmodificados los otros campos.

Este comportamiento ya había sido predicho para los campos  $E_2$  y  $E_3$  en la referencia (27). En el régimen de campo hiper-Raman débil, la introducción en el modelo teórico del campo  $E_4$  no altera la amplificación exponencial de los campos en el medio. Sólo se observa un corrimiento del régimen de saturación hacia regiones de mayor longitud del amplificador. (o de mayor densidad del medio, que es el parámetro variable en el experimento).

La Fig. 3 muestra la distribución de poblaciones en los cuatro niveles. En la región de campo hiper-Raman débil el sistema se comporta (esencialmente como un sistema de dos niveles ( $|1\rangle$  y  $|2\rangle$  en la Fig. 1) que bombeado por un campo cuasi-resonante (en este caso con una transición de dos fotones) alcanza en el estado estacionario igualdad de población en los dos niveles. Hacia  $z = 7$  se observa el comienzo de la saturación. El campo hiper-Raman interactúa con la transición entre los estados  $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$  y tiende a equilibrar sus poblaciones. Un análisis más detallado de este régimen será hecho en la próxima sección.

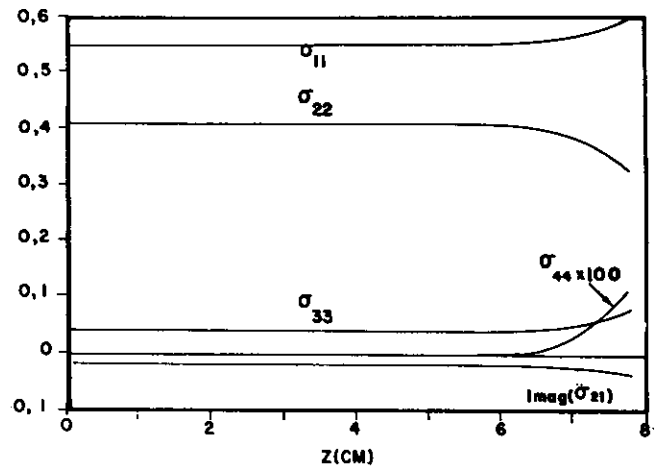


Figura 3. Poblaciones en los niveles activos como función de la longitud del amplificador para desajuste de fase nulo. Todos los demás parámetros como en la Fig. 2

### V. Régimen de saturación

El análisis del régimen de saturación ha sido realizado numéricamente. En la Fig. 4 se muestran las poblaciones y la coherencia  $\sigma_{21}$  en función de la longitud del amplificador para  $\lambda_2=200$ ,  $\Delta_4=100$  y desajuste de fase nulo. La saturación comienza alrededor de  $z=2$ , donde las poblaciones de los niveles  $|2\rangle$  y  $|3\rangle$  tienden a equilibrarse. Las curvas de intensidad correspondientes (Líneas continuas en la Fig. 5) ya no presentan un crecimiento exponencial, pero tampoco lineal como fue encontrado teóricamente para  $I_2$  e  $I_3$  en la referencia (27). La generación de la suma de frecuencias  $2\nu_1 + \nu_2$  parece ser mucho más eficiente que la generación de la di-

ferencia. Sin embargo la eficiencia depende fuertemente del ajuste de fase: las curvas discontinuas en la Fig. 5 fueron obtenidas con  $\varphi_3 = -1$  y  $\varphi_4 = -2$ . Mientras  $I_2 \approx I_3$  aumentan ligeramente,  $I_4$  decrece en un orden de magnitud y presenta oscilaciones.

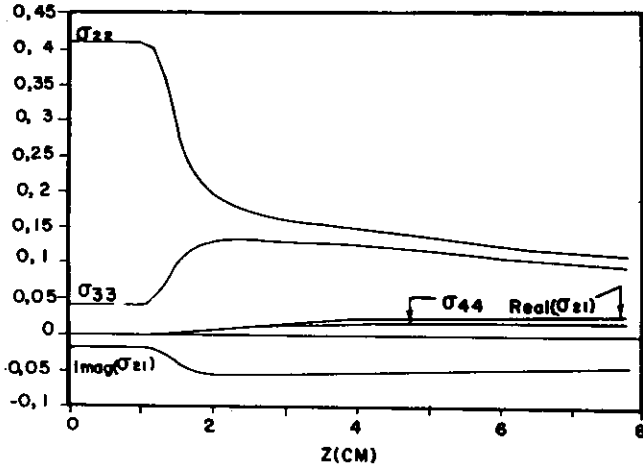


Figura 4. Poblaciones y coherencia de dos fotones como función de la longitud del amplificador para  $\Delta_2 = 200 \text{ nseg}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ . Todos los demás parámetros como en la Fig. 2.

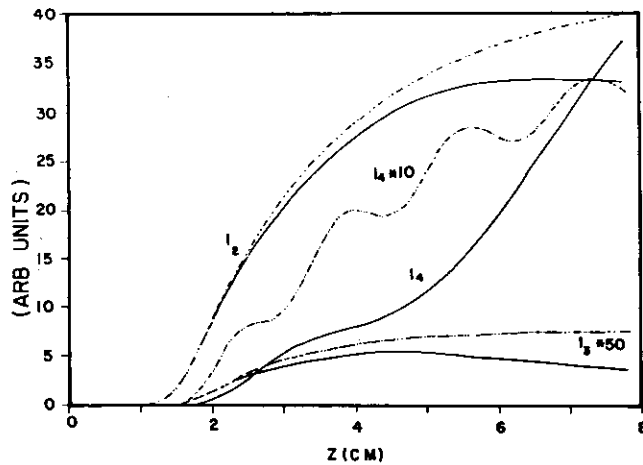


Figura 5. Dependencia de las intensidades con la coordenada del amplificador, para desajuste de fase nulo (líneas continuas) y para  $\varphi_3 = -1$ ,  $\varphi_4 = -2 \text{ cm}^{-1}$  (líneas discontinuas). Todos los parámetros como en la Fig. 4.

Experimentalmente (24) se ha observado una dependencia lineal de la intensidad hiper-Raman con la densidad del medio activo en la región de saturación. Este comportamiento se obtiene también aquí al reducir el acoplamiento entre los niveles  $|2\rangle$  y  $|4\rangle$  mediante un incremento de  $\Delta_4$ , como muestra la Fig. 6. Las líneas continuas corresponden a desajuste de fase nulo.  $I_4$  sigue siendo generada con mayor eficiencia que  $I_3$ , sin embargo, la introducción de desajustes de fase (líneas discontinuas) reduce fuertemente la intensidad  $I_4$  y hace más eficiente la generación de la diferencia de frecuencias. Las curvas de población no difieren mayormente de las mostradas en la Fig. 4, excepto por una fuerte reducción en la población del nivel  $|4\rangle$ .

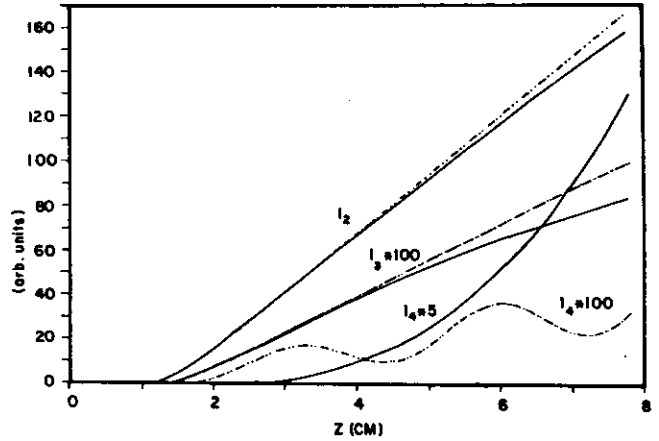


Figura 6. Intensidades como función de la coordenada del amplificador para  $\Delta_4 = 1000 \text{ nseg}^{-1}$ . Líneas continuas para desajuste de fase nulo y discontinuas para  $\varphi_3 = -1$ ,  $\varphi_4 = -2 \text{ cm}^{-1}$ . Demás parámetros como en la Fig. 4.

### VI. Discusión y comparación con datos experimentales

Como aplicación se realizaron cálculos tomando vapor de Cd como medio no lineal. 4-WSM y 4-WDM a 158.9 nm y 229 nm han sido observados (24) cuando un láser de 375 nm se sintoniza en resonancia con la transición  $5s^2 \ ^1S_0 \rightarrow 5s6s \ ^1S_0$ . La mezcla de frecuencias  $2\nu_1 + \nu_2$  tiene lugar con la radiación hiper-Raman de  $1.04 \mu\text{m}$  generada en la transición  $^1S_0 \rightarrow 5s5p \ ^1P_1$ .

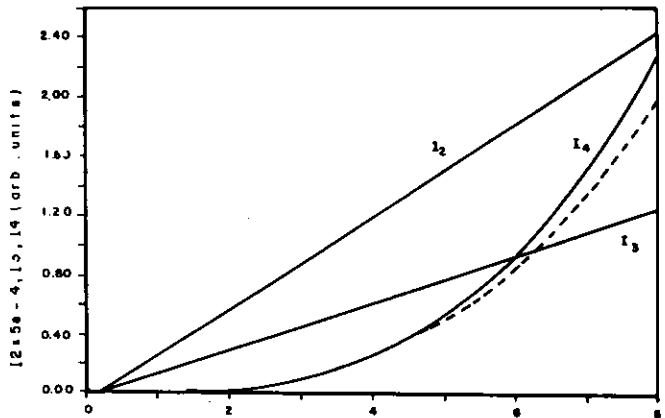


Figura 7. 4-WDM y 4-WSM para vapor de Cd bombeado por un láser de 375 nm en resonancia con una transición de dos fotones.  $N_{\text{Cd}} = 10^{14} \text{ átomos/cm}^3$ .

La Fig. 7 muestra las intensidades de los campos como función de la coordenada del amplificador para  $N_{\text{Cd}} = 10^{14} \text{ átomos/cm}^3$ . La gráfica ha sido calculada incluyendo corrimientos Stark dinámicos de los niveles y desajustes de fase. Estos últimos han sido calculados teniendo en cuenta la distribución de poblaciones para cada z. De esta forma quedan incluidas en el análisis las variaciones de índice de refracción por efectos de saturación de la transición de dos fotones o de la dispersión hiper-Raman. Las curvas continuas se obtuvieron suponiendo ajuste de fase en la región de saturación del

campo hiper-Raman mediante la adición de Argón como "buffer gas" a la densidad óptima  $N_0$ . La curva punteada representa la intensidad de 4-WSM en ausencia de Argón. El efecto del desajuste de fase no es muy notable aquí, debido a la baja densidad del Cd. Para densidades de Cd mayores, el desajuste de fase introduce oscilaciones en la intensidad  $I_4$  y la atenúa fuertemente.

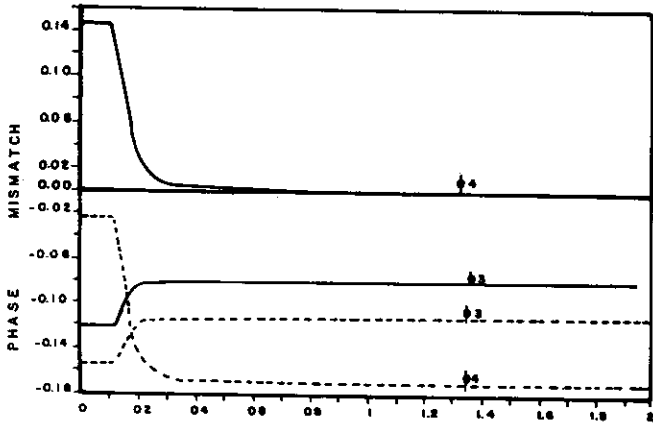


Figura 8. Variación de los desajustes de fase en el medio para propagación en vapor de Cd (curvas punteadas) y en una mezcla adecuada Cd: Ar (curvas continuas) para lograr ajuste de fase en la región de saturación del campo hiper-Raman.

La Fig. 8 muestra la variación en el medio de los desajustes de fase. Las curvas punteadas corresponden al desajuste de fase en el vapor de Cd y los trazos continuos a la mezcla Cd: Ar adecuada para lograr ajuste de fase. Para  $z < 2$  cm la distribución de poblaciones es determinada por la saturación en la transición de dos fotones, pero para  $z > 0.2$  la saturación del campo hiper-Raman altera esta distribución y cambia fuertemente los valores del desajuste de fase.

La comparación cuantitativa con el experimento es difícil dentro de nuestro modelo por varias razones: (a) Los cálculos han sido realizados en el estado estacionario. (b) El láser de bombeo se ha supuesto monocromático. (c) Las densidades atómicas utilizadas en el experimento dan valores para  $\lambda_2$  mucho mayores que los que por razones de cálculo podemos utilizar aquí. Es de anotar sin embargo, que las predicciones teóricas hechas en (27) para la radiación hiper-Raman sobre las mismas bases, resultaron en excelente acuerdo cualitativo con los resultados experimentales.

Las curvas 9 y 10 son una comparación cualitativa de la dependencia de las intensidades con la densidad del medio y la intensidad del láser de bombeo respectivamente. La dependencia medida (24) de las intensidades de los campos con la longitud efectiva  $Nz$  puede verse en la Fig. 9. A las densidades atómicas ( $10^{17}$ - $10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$ ), utilizadas en el experimento, el sistema se encuentra en el régimen de saturación. Las intensidades calculadas teórica-

mente se han superpuesto a los datos experimentales, gráficas como función de  $N(z-z_{\text{sat}})/z_{\text{sat}}$  corresponde a la longitud del amplificador en que se inicia el régimen de saturación. Los cálculos fueron realizados para  $\lambda_2=1000$ ,  $\Delta_4=5000$ , y  $\Gamma_{ij}=50$ , valores que si bien no coinciden con los del experimento permiten una comparación cualitativa con los resultados experimentales. No se incluyó el desajuste de fase ni corrimientos Stark dinámicos. El acuerdo cualitativo es excelente excepto para la región de altas densidades en que probablemente el desajuste de fase se hace importante.

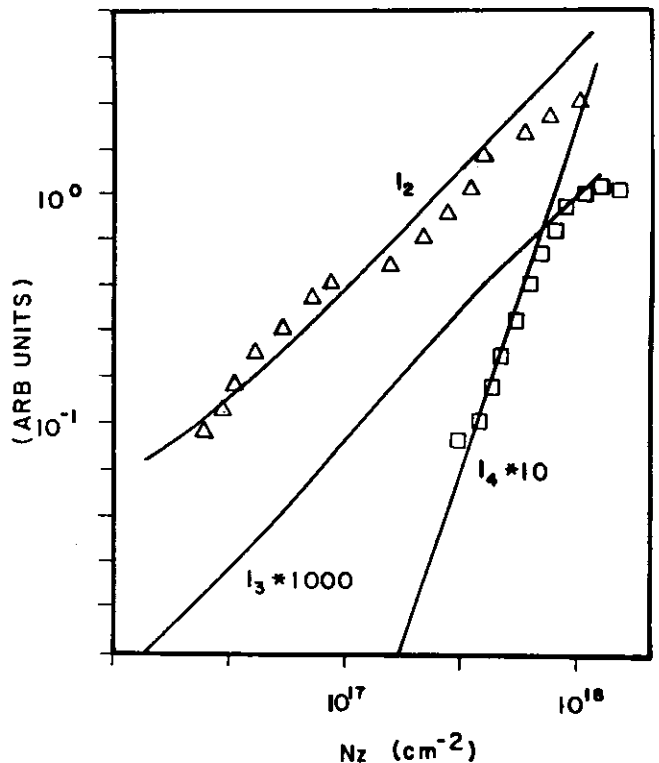


Figura 9. Intensidades de campo en unidades arbitrarias como función de la densidad del medio. Han sido también representados valores experimentales para  $I_2$  ( $\Delta$ ) e  $I_4$  ( $\square$ ) tomados de la referencia (24). Para el cálculo teórico se empleó  $\lambda_2=1000$   $\text{nseg}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ,  $\Delta_4=5000$ , y  $\Gamma_{ij}=50$   $\text{nseg}^{-1}$ . Los demás parámetros como en la Fig. 2.

La dependencia de los campos con la intensidad del campo de bombeo puede verse en la Fig. 10. Teóricamente se predice una saturación e incluso un decrecimiento de la intensidad del campo  $E_4$  con la intensidad de bombeo. Experimentalmente la saturación parece tener lugar para campos mucho más intensos, lo que es comprensible debido a que en el cálculo teórico hemos supuesto un láser de bombeo monocromático.

Para estudiar el efecto del desajuste de fase se realizaron cálculos para la misma ganancia de la Fig. 7 (correspondiente a  $N_{\text{Cd}}=10^{14}$  átomos/ $\text{cm}^3$ ) pero incrementando el desajuste de fase en un orden de magnitud. La simulación consistente del experimento para ( $N_{\text{Cd}}=10^{15}$  átomos/ $\text{cm}^3$ ) no es viable debido a limitaciones computacionales. La curva de trazo continuo en la Fig. 11 representa el caso de ajuste de fase perfecto con Argón a la densidad óp-

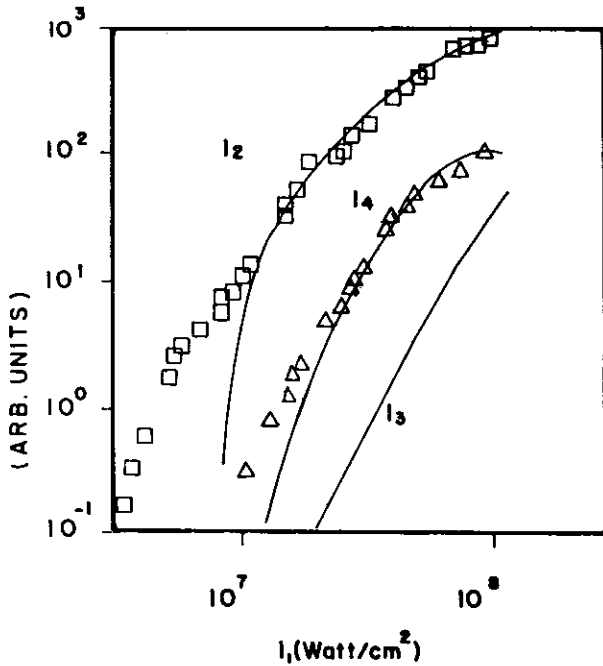


Figura 10. Intensidades de campo en función de la intensidad del láser de bombeo. Los valores experimentales para  $I_2$  ( $\square$ ) e  $I_4$  ( $\Delta$ ) fueron tomados de la referencia (24). Parámetros como en la Fig. 9.

tima  $N_0$ . En orden decreciente y trazos discontinuos se muestran las intensidades obtenidas para densidades de Argón de 0.7, 0.5, 0.4, 0.3, y 0.1  $N_0$ . En la Fig. 12 se ha graficado la intensidad  $I_4$  obtenida al final del amplificador, en  $z=1=8\text{cm}$  como función de la densidad de Argón. La curva representa la función de desajuste de fase  $\text{sen}^2(\phi l/2)/(\phi l/2)^2$  características de la mezcla de frecuencias con ondas planas (9).

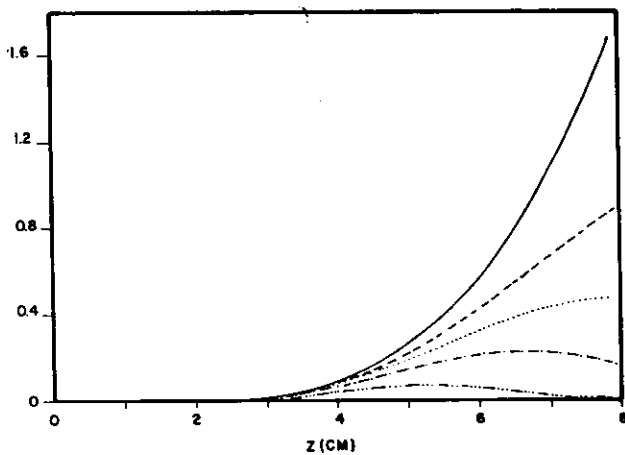


Figura 11. Intensidad de 4-WSM en función de la coordenada del amplificador para diferentes densidades de Argón. La curva continua corresponde a la densidad óptima de ajuste de fase perfecto en la región de saturación ( $N_0$ ). Las curvas discontinuas corresponden en orden decreciente a densidades de Argón de 0.7, 0.5, 0.4, 0.3, 0.1  $N_0$ .

Finalmente la Fig. 13 muestra curvas normalizadas de la intensidad de los campos como función de  $\Delta_1$ . La curva continua representa la ganancia hi-

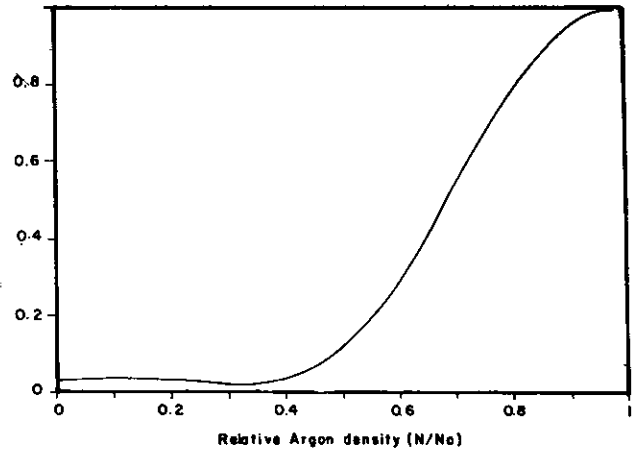


Figura 12. Función de desajuste de fase: Intensidad normalizada de 4-WSM como función de la densidad de Argón referida a la densidad óptima  $N_0$ .

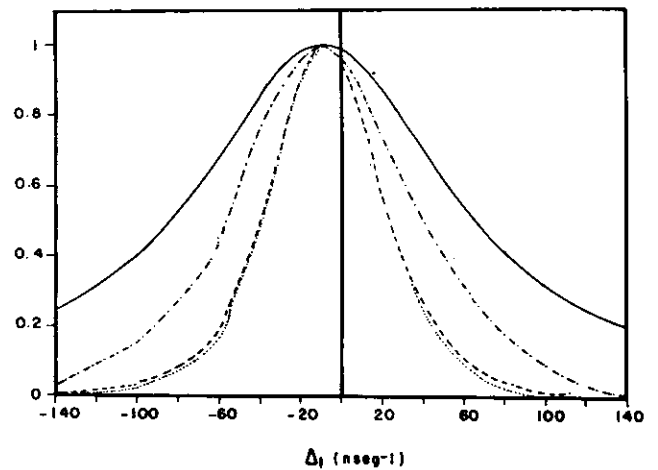


Figura 13. Curva continua: Perfil de ganancia de la dispersión hiper-Raman a la entrada del amplificador como función de  $\Delta_1$ . Curvas discontinuas: Perfiles obtenidos al final del amplificador: -.-.- radiación hiper-Raman, - - - 4-WDM, . . . 4-WSM. Para efectos de comparación, todas las curvas han sido normalizadas a 1.  $N_{Cd}=10^{14}$  átomos/cm<sup>3</sup>.

per-Raman para pequeños espesores efectivos, ganancia que determina en lo esencial la estructura de las curvas obtenidas después de propagación a lo largo del amplificador (curvas en trazo discontinuo) y por consiguiente la sintonizabilidad de la radiación generada por mezcla de cuatro ondas. Experimentalmente se ha observado un ancho mucho mayor para la curva correspondiente a la diferencia de frecuencias que para la correspondiente a la suma (24). Este efecto, que no se observa aquí, puede deberse a los desajustes de fase, que a las relativamente altas densidades de Cd ( $N_{Cd}=10^{17}$  átomos/cm<sup>3</sup>) utilizadas en el experimento resultan importantes y pueden incluso ser responsables de la baja eficiencia de conversión observada.

### VII. Conclusiones

De los resultados presentados aquí puede concluirse que la generación de frecuencias  $2\nu_1 + \nu_2$  en vapores atómicos puede ser un proceso más eficien-

te que la generación de la diferencia. Tal debe ser el caso especialmente cuando los niveles  $|3\rangle$  y  $|4\rangle$  están casi-equidistantes energéticamente del nivel  $|2\rangle$ . Esta situación puede darse en experimentos con átomos de Rydberg. Sin embargo, un factor fuertemente limitante de la eficiencia del proceso es el ajuste de fase, que debería entonces ser procurado mediante una adecuada combinación del vapor metálico con gases nobles.

El conocimiento de la dinámica de los procesos analizados puede ser apoyo útil para los experimentadores interesados en ampliar cada vez más el rango espectral de radiación coherente sintonizable en el UV y VUV. Este tipo de fuentes encuentran grande aplicación en mediciones espectroscópicas

de alta resolución en átomos y moléculas, o en espectroscopia de fotoionización y fotodisociación por excitación selectiva, y su potencialidad en otros campos es inmensa.

Es claro que la generación de VUV por 4—WSM debe ser más eficiente si se utilizan dos láseres de bombeo (17, 21, 22); pero se ha demostrado que utilizando un sólo láser de bombeo es posible generar radiación ultravioleta por 4—WSM en forma tan o más eficiente que mediante 4—WDM si la frecuencia  $2\nu_1 + \nu_2$  es cercanamente resonante con la frecuencia de una transición atómica, lo que permitiría obtener un gran número de líneas en el VUV bombeando resonantemente vapores metálicos a lo largo de la serie de estados Rydberg.

## REFERENCIAS

1. GOPPERT-MAYER, M. 1931. *Ann. Phys. (Leipzig)*. 9, 273.
2. MAIMAN, M. 1960. *Nature* 187, 493.
3. FRANKEN, P.A., HILL, A.E., PETERS, C.W. & WEINREICH, G. 1961. *Phys. Rev. Lett.* 7, 118.
4. MOSSBERG, T., FLUSBERG, A. & HARTMANN, S.R. 1978. *Opt. Commun.* 25, 121.
5. DINEV, S., GUZMAN DE GARCIA, A., MEYSTRE, P., SALOMAA, R.R., & WALTHER, H. 1983. "Laser Spectroscopy VI", ed. H.P. Weber and W. Lüthy, Springer Verlag, p. 183.
6. NEW, G.H.C. & WARD, J.F. 1967. *Phys. Rev. Lett.* 19, 556. WARD, J.F. & NEW, G.H.C. 1969. *Phys. Rev.* 185, 57.
7. BOKOR, J., BUCKSBAUM, P.H. & FREEMAN, R.R. 1983. *Opt. Lett.* 8, 217. KUNG, A.H. 1983. *Opt. Lett.* 8, 24. LAGO, A., HILBER, G., HILBIG, R. & WALLENSTEIN, R. 1985. *Láser Optoelektron.* 17, 357.
8. HARRIS, S.E. & MILES, R.B. 1971. *Appl. Phys. Lett.* 19, 385. MILES, R.B. & HARRIS, S.E. 1973. *IEEE J. QE-9*, 470. YOUNG, J.F., BJORKLUND, G.C., KUNG, A.H., MILES, R.B., HARRIS, S.E. 1971. *Phys. Rev. Lett.* 27, 1551.
9. BJORKLUND, G.C. 1975. *IEEE J. QE-11*, 287.
10. KUNG, A.H., YOUNG, J.F., BJORKLUND, G.C. & HARRIS, S.E. 1972. *Phys. Rev. Lett.* 29, 985.
11. ———, ——— & HARRIS, S.E. 1973. *Appl. Phys. Lett.* 22, 301.
12. HARRIS, S.E., YOUNG, J.F., KUNG, A.H., BLOOM, D.M. & BJORKLUND, G.C. "Laser Spectroscopy I" ed. R.G. Brewer and A. Mooradian, Plenum Press, N.Y., p. 59.
13. HODGSON, R.T., SOROKIN, P.P. & WYNNE, J.J. 1974. *Phys. Rev. Lett.* 32, 343.
14. HILBIG, R., HILBER, G., TIMMERMANN, A. & WALLENSTEIN, R. 1983. "Laser Spectroscopy VI" ed. H.P. Weber and W. Lüthy, Springer Verlag, Berlin Heidelberg p. 387; S.D., Kramer, C.H. Chen et al., *ibid.*, p. 392.
15. HILBIG, R., HILBER, G., LAGO, A., TIMMERMANN, A. & WALLENSTEIN, R. 1985. "Laser Spectroscopy VII" ed. T.W. Hänsch and Y.R. Shen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, p. 181.
16. STOICHEFF, R.P., HERMAN, P.R., LAROCQUE, P.E. & LIPSON, R.H. 1985. "Laser Spectroscopy VII" ed. T.W. Hänsch and Y.R. Shen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, p. 174.
17. HILBIG, R., HILBER, G., LAGO, A., WOLFF, B. & WALLENSTEIN, R. 1986. *Comments At. Mol. Phys.* D18, 157.
18. ARMSTRONG, J.A., BLOEMBERGEN, N., DUCUING, J. & PERSHAN, P.S. 1962. *Phys. Rev.* 127, 1918.
19. GEORGES, A.T., LAMBROPOULOS, P. & MARBURGER, J.H. 1977. *Phys. Rev.* A15, 300.
20. SCHEINGRABER, H. & VIDAL, C.R. 1981. *Opt. Commun.* 38, 75.
21. JAMROZ, W. & STOICHEFF, B.P. 1983. In *Progress in Optics*, ed. E. Wolf, North Holland, Amsterdam, vol. 20. p. 326.
22. HILBER, G., LAGO, A. & WALLENSTEIN, R. 1987. "Laser Spectroscopy VIII" ed. W. Persson and S. Svanberg, Springer Verlag, p. 446.
23. REIF, J. & WALTHER, H. 1978. *Appl. Phys.* 15, 361.
24. HEINRICH, J. 1983. *Dissertation, Universität Düsseldorf.*
25. HERNANN, J.A. & THOMPSON, B.V. 1981. *J. Phys. B* 14, 2961.
26. LOUISELL, W.H. & MEYSTRE, P. 1981. *Phys. Rev. A* 23, 1015.
27. GUZMAN DE GARCIA, A. 1984. *Dissertation, Ludwig-Maximilian Universität, München, y referencias citadas allí.*
28. SMITH, A.V. & WARD, J.F. 1980. *IEEE J. QE-17*, 525.
29. HILBIG, R. & WALLENSTEIN, R. 1983. *IEEE J. QE-19*, 194.
30. AUTLER, S.H. & TOWNES, C.H. 1955. *Phys. Rev.* 100, 707. JAVAN, A. 1957. *Phys. Rev.* 107, 1579. KONTOROVICH, V.M., PROKHOROV, A.M. 1958. *Sov. Phys. JETP* 6, 1100. BRUNNER, W., PAUL, H., RICHTER, G. & STEUDEL, H. 1968. *Ann. Physik* 21, 187. STEUDEL, H. 1969. *Ann. Physik* 22, 113.
31. ALLEN, L. & EBERLY, J.H. 1975. "Optical resonance and two-level atoms". Wiley NY, y referencias allí citadas
32. TAKATSUJI, M. 1975. *Phys. Rev. A* 11, 619
33. GRISCHKOWSKY, D., LOY, M.M. & LIAO, P.F. 1975. *Phys. Rev. A* 12, 251.
34. GUZMAN DE GARCIA, A., MEYSTRE, P. & SARGENT, M. III, 1982. *Opt. Commun.* 43, 364.
35. GUZMAN DE GARCIA, A., MEYSTRE, P. & SALOMAA, R.R.E. 1985. *Phys. Rev. A* 32, 1531.



# MAGNOLIACEAE NATIVAS DEL BRASIL

por

Gustavo Lozano-Contreras\*

## Resumen

Lozano-Contreras, G.: Magnoliaceae nativas del Brasil. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 579-583, 1990. ISSN 0370-3908.

El estudio de los ejemplares tipo de las especies de Magnoliaceae, descritas del Brasil, así como el análisis de los ejemplares de herbario, permite el reconocimiento de 4 especies del género *Talauma* incluyendo la descripción de una nueva; tres de estas especies son endémicas y la otra ha sido encontrada en colecciones procedentes del Perú.

Magnoliaceae A.L. de Jussieu, 1789 nom. conserv.

Arboles y arbustos perennifolios o más comúnmente deciduos; ramas jóvenes con una cicatriz en forma de anillo alrededor de cada nudo. Hojas alternas simples, penninervias, enteras, raro lobadas; estípulas largas encerrando la yema terminal, deciduas, libres o adheridas al pecíolo. Flores grandes entomófilas, generalmente polinizadas por coleópteros, terminales, pseudolaterales o raro axilares, hermafroditas, perianto generalmente espiralado, usualmente en 3 series, 6-18 piezas, diferenciado en sépalos y pétalos; estambres numerosos dispuestos en varias series espiraladas, libres, generalmente sin diferenciación en filamento y antera, con cuatro microsporangios, conectivo generalmente con prolongación apical de forma variada; carpelos generalmente numerosos, dispuestos en espiral, libres o unidos hacia la antesis, 2 o más óvulos por carpelo, anátropos. Fruto en folículo, abayados, samaroides o unidos formando un sincarpo con dehiscencia circuncisil; semillas suspendidas por un largo funículo y provistas de sarcotesta.

**Distribución:** Regiones tropicales y subtropicales del viejo y nuevo mundo.

La familia consta de 12 géneros y alrededor de 230 especies; en Brasil he tenido la oportunidad de observar material de Herbario de 3 géneros: *Magno-*

*lia* (*M. grandiflora* L.), *Michelia* (*M. champaca* L. y *M. figo* (Lour.) Spreng.) y *Talauma*; los dos primeros son cultivados y el tercero crece espontáneamente, su estudio nos ha permitido reconocer cuatro especies para el Brasil, las cuales son tratadas a continuación.

*Talauma* Juss, Gen. 281, 1789

Arboles perennifolios; ramillas lenticeladas con entrenudos marcados por cicatrices anulares. Yemas foliares protegidas por catáfilos unidos al pecíolo en toda su longitud. Hojas simples alternas, pecioladas, pecíolos con cicatriz adaxial; lámina foliar elíptica o anchamente elíptica u ovada, nervios secundarios penninervios, 10-19 por lado.

Flores grandes solitarias, terminales, protegidas por 1-2 hipsófilos vaginales; perianto formado por 3 sépalos y 6 (-7) pétalos, generalmente blancos ("amarillo"), gruesos, carnosos; estambres ca. 100-180, distribuidos en 4-8 series espiraladas; gineceo formado por 46-111 carpelos en distribución espiralada, cada carpelo lleva 2 óvulos.

Fruto globoso sincárpico con dehiscencia circuncisil, leñoso; semillas 1-2 por carpelo, con sarcotesta roja o anaranjada.

**Distribución:** Asia, Oceanía y América tropical, alrededor de 70 especies.

## CLAVE PARA LAS ESPECIES DE TALAUMA

1. Yemas vegetativas y nudos provistos de indumento.

\* Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural, Universidad Nacional, Apartado 7495, Bogotá, Colombia.

2. Pelos cortos adpresos principalmente en los entrenudos jóvenes y yemas; lámina foliar ovado-elíptica, generalmente asimétrica, coriácea; pecíolo con cicatriz muy engrosada, ápice generalmente emarginado, Fruto con las paredes externas de los carpelos con indumento adpreso . . . . . 2. *T. irwiniana*

2. Pelos largos rectos principalmente sobre el nervio medio por el envés y los nudos jóvenes.

3. Lámina foliar elíptica, papirácea (color verde en ejemplares de Herbario), pecíolo con los flancos de la cicatriz engrosados; ápice atenuado agudo u obtuso, nervios secundarios 15-19 por lado . . . . . 1. *T. amazonica*

3. Lámina foliar anchamente elíptica, membranacea o raro papirácea (con tonalidades canela en ejemplares de Herbario), pecíolos sin engrosamiento aparente en los flancos de la cicatriz, ápice redondeado, nervios secundarios 10-13 por lado . . . . . 4. *T. sellowiana*

1. Yemas vegetativas y nudos glabros; hojas ovadas o largamente ovadas, ápice obtuso, cicatriz engrosada hacia la base del pecíolo . . . . . 3. *T. ovata*

1. *Talauma amazonica* Ducke, Arch. Jard. Bot. Río Janeiro 4: 11. 1925. Fig. 1

Tipo. BRASIL. "Prope medium flum Tapajoz (Pará) loco Francey, . . ." 10 ene 1922, A. Ducke sn, fl (Holótipo R B No. 12487, isótipo P).

Arbol 15-20 m, corteza odora; ramillas glabras a excepción de los nudos, los cuales presentan pelos largos de color amarillos, caducos, lenticelas esparcidas, entrenudos 0.67-1.05 cm long. x 0.54-0.57 cm diám. Hojas alternas pecioladas, pecíolos 1.8-3.3 cm long. x 0.17-0.19 cm diámetro, adaxialmente planos recubiertos por una cicatriz dejada por la yema foliar al desprenderse, los flancos lisos cubiertos por indumento, abaxialmente convexo, base engrosada; lámina foliar elíptica, glabra a excepción del nervio medio o costa que presenta pelos largos amarillos, papirácea, 11.1-28.5 cm long. x 4.2-10.5 cm, base cuneada, ápice agudo o cuspidado, nervios secundarios 15-19 por lado.

Flores blancas terminales, odoras; 1 (-2) hipósfilos vaginales, dispuesto a 0.65 cm de longitud del perianto; sépalos 3 obovados, gruesos con alrededor de 11 nervios longitudinales más oscuros, 6.0-7.0 cm long. x 3.5-4.0 cm lat., base truncada, ápice redondeado; pétalos 6, obovados, naviculares, asimétricos, gruesos, con varios nervios longitudinales, 5.0-5.5 cm long. x 2.5-3.0 cm lat., base muy carnosa y angosta, ápice redondeado; estambres ca. 100 lineares-obovados, distribuidos en 4 series espiraladas; ginoecio cupuliforme, carpelos ca 46, unidos formando un solo órgano. Fruto globoso (Fig. 5), con dehiscencia circuncisil en masas variables de carpelos. Semillas 1-2 con arilo rojo.

Distribución: Selva Neotropical Inferior o en lo denominado por Hueck (1978) como Pluviselva tropical siempre verde del Perú y Brasil.

Las hojas elípticas, el indumento formado por pelos largos principalmente sobre la costa por el envés, el número de nervios secundarios y el menor número de carpelos la apartan de las otras especies del Brasil.

2. *Talauma irwiniana* G. Lozano-C. sp. nov. Fig. 2

Arbor sempervirens ca 15 m alt, trunco 0.50 m diam. (ad altitudinem pectoris). Ramuli hornotini (vel annotini) tomentosi crassi. Folia alterna petiolata, lamina ovata vel elliptica, coriacea, margine repanda, base attenuata, apice emarginata, nervis lateralibus utrinque 11-13. Flores solitarii pedunculati, hypsophyllis vaginalibus 1, sepalis 3, petalis 6, staminibus ca, 114 in 4 seriebus adscendentibus spiraliter dispositis, carpellis 111. Fructus sphaericus.

Tipo. BRASIL: Goias, "Chapada dos veadeiros ca. 15 km W of Veadeiros", alt. 1000 m, 12 Feb 1966, Irwin, Grear jr, Sousa & Reis dos Santos 12681, fr (Holotipo RB, Isotipos MO, COL).

Arbol aproximadamente 15 m alto, 0.50 m en diámetro altura del pecho; ramillas jóvenes tomen-

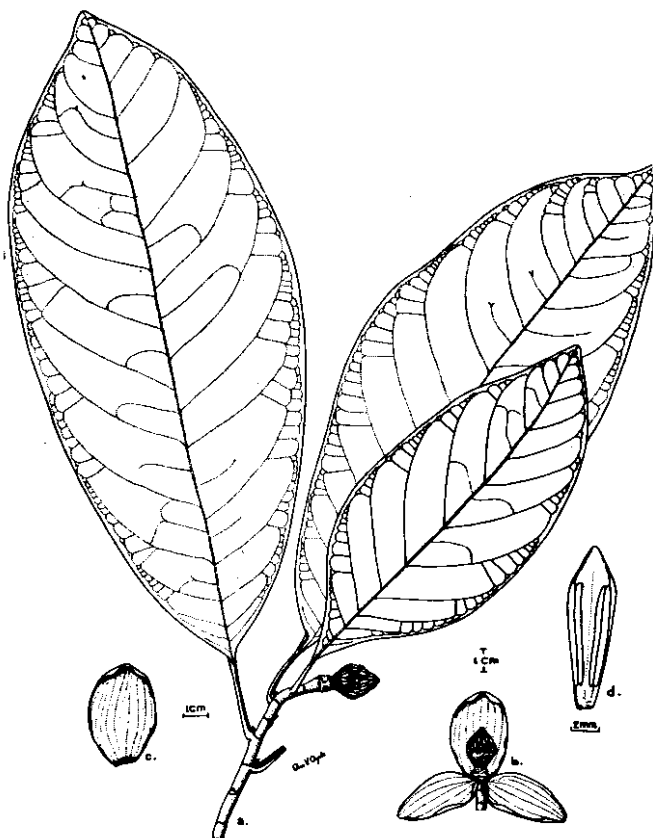


Figura 1. *Talauma amazonica* (Ducke sn). a, morfología de las estructuras vegetativa y gineceo; b, flor con los sépalos y gineceo; c, detalle de un sépalo; d, estambre.

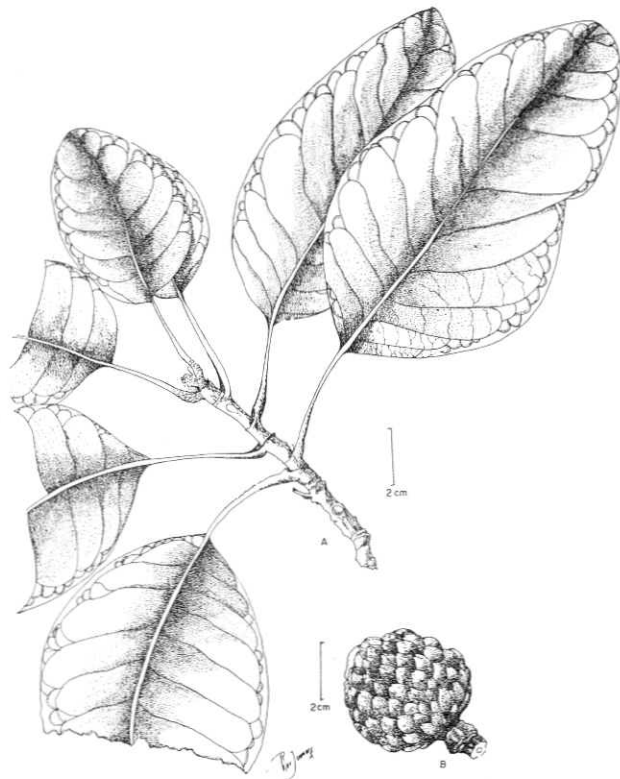


Figura 2. *Talauma irwiniana* (Irwin & Al. 12681). A, morfología de las estructuras vegetativas; B, fruto inmaduro.

tosas, indumento color crema en especímenes de herbario, caduco, ramillas adultas rimosas, con escasas lenticelas ovaladas, entrenudos, 0.70-1.1 cm long. (M = 0.9 cm, N = 10) x 0.55-0.70 cm diám. (M = 0.62 cm, N = 10). Hojas alternas pecioladas, pecíolos basalmente engrosados, 3.8-5.6 cm long. (M = 4.7 cm, N = 10) x 0.20-0.35 cm diám. (M = 0.28 cm, N = 10), cuando jóvenes tomentosos, bien desarrollados con cicatriz adaxial que lo recubre en toda su longitud y fuertemente suberificada con líneas transversales, abaxialmente convexo; lámina foliar ovado raro elíptica, asimétrica, brillante en ejemplares de herbario, coriácea, 11.1-15.3 cm long. (M = 13.6 cm, N = 7) x 6.3-8.4 cm lat. mayor (M = 7.8 cm, N = 7), ápice emarginado u obtuso, base atenuada, margen repando u ondeado, cuando joven tomentosa por el envés, tomento caduco, nervio medio impreso por la haz, prominente por el envés, nervios secundarios penninervios 11-13, retículo prominente por ambas caras.

Flores solitarias terminales, por las cicatrices dejadas por las piezas al desprenderse se observa que están constituidas por 1 hipsófilo vaginal, 3 sépalos, 6 pétalos, ca 114 estambres dispuestos en 4 series ascendentes espiraladas, gineceo formado por 111 carpelos unidos dispuestos espiraladamente. Fruto inmaduro esférico (Fig. 5). 3.9 cm long. x 4.2 cm diámetro, carpelos ovados tomentosos exteriormente, 0.74-1.15 cm long. (M = 0.91 cm, N = 10) x 0.33-0.74 cm ancho (M = 0.55 cm, N = 10), estilos caducos.

**Distribución.** Selva Neotropical Inferior o en los denominados por Hueck (1978), bosques sub-

tropicales deciduos y mesofíticos del Brasil meridional.

*Talauma irwiniana* puede fácilmente reconocerse de las restantes especies brasileras del género por las hojas coriáceas, margen ondeado, nudos de las ramas jóvenes y fruto tomentoso; la única especie del grupo globoso con indumento es *T. dixonii* del Ecuador pero sus características de hoja forma de fruto, etc. la apartan totalmente.

3. *Talauma ovata* St. Hil., Fl., Bras. Merid. 1: 26, tab. 4A. . . . . Fig. 3

*Talauma dubia* Eichl., en Mart., Fl. Bras. 13 (1): 126. 1864.

**Tipo.** BRASIL: Minas Gerais, "In paludosa prope Olho d'Oyoo in deserto . . ." Wilgreen, Lindberg, Stephan &, St. Hilaire 1, fl (Holotipo P).

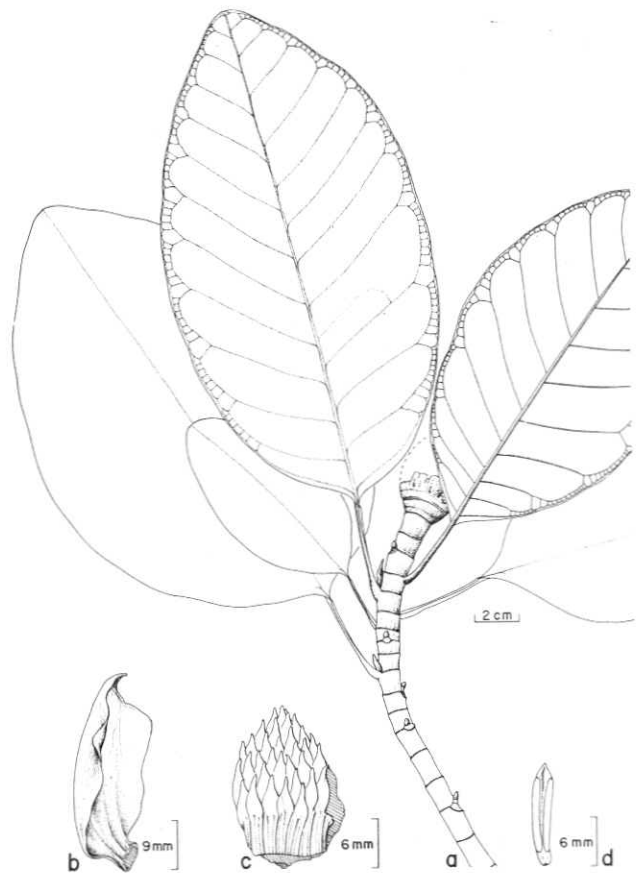


Figura 3. *Talauma ovata* (Wilgreen, Lindberg, Stephan & St. Hilaire 1). a, morfología de las estructuras vegetativas; b, pétalo; c, porción del gineceo; d, estambre.

Arbol 20-25 m altura, 25-35 cm diámetro a la altura del pecho; ramillas glabras lenticeladas, entrenudos glabros, 0.65-1.15 cm longitud (M = 0.94 cm N = 10) x 0.45-0.64 cm diám. (M = 0.54 cm, N = 10). Hojas alternas pecioladas, pecíolos delgados, glabros, 2.7-4.5 cm long. (M = 3.63 cm, N = 10) x 0.15-0.21 cm diám (M = 0.18 cm, N = 10), adaxialmente plano con una cicatriz dejada por la yema vegetativa al desprenderse y con líneas marcadas transversales de suberificación, adaxialmente convexo, basalmente engrosado; lámina foliar ova-

da glabra, papirácea, 13,2-16,5 cm long (M = 15,3 cm, N = 9) x 8,4-10,3 cm lat. (M = 9,2 cm, N = 9), base y ápice redondeados u obtusos, nervios secundarios penninervios, 10-13, retículo prominulo por ambas caras.

Flores terminales blancas (según el ejemplar coleccionado por Prance & al. 59697 las flores son amarillas); 1-2 hipsófilos vaginales amplexantes, situados entre 0,4-0,5 cm de distancia del perianto; 3 sépalos anchamente elípticos gruesos, cocleariformes, glabros, 4,5-4,8 cm long. x 3,5-3,8 cm lat, ápice apiculado, base truncada; (6-) 7 pétalos carnosos, obovados, naviculares, 3,0-3,8 cm long x 2,4-3,2 cm lat x 0,3 cm espesor, ápice apiculado, base truncada muy engrosada. Estambres angostamente obovados, 144-150, distribuidos en 4 series espiraladas. Ginoecio hemisférico, carpelos 68-71, unidos formando un solo órgano. Fruto globoso (Fig. 5) con dehiscencia circuncisil en masas de carpelos; semillas 1-2 por carpelo con arilo rojo.

**Distribución:** Selva Neotropical Inferior o en los denominados por Hueck (1978), bosques subtropicales deciduos y mesofíticos del Brasil meridional y oriental.

**Material examinado** Goiás: Vecindad de Platinata, 3 Oct 1965, Irwin, Souza & Reis dos Santos 8905, fl (RB, UB); ca 25 km E de Brasilia, 28 Ene 1966, Irwin, Souza & Reis dos Santos 12084, fr (MO); ca, 10 km al N de Brasilia, selvas del río Torto, 8 jul 1966, Irwin, Grear, Souza & Reis dos Santos 18092, fr (UB, MO); Monte alegre, Paraná, 23 mar 1954, Kuhlmann sn, est. (RB); Carretera Brasilia a Taguatinga, 12 sep 1964, Prance & Silva 58998, fl. fr. (P, RB, UB); Serra do Caiápo, 42 km S de Cayaponia, 27 oct 1964, Prance & Silva 59697, fl (RB, UB); ca 18 km SSW de Brasilia, torre Tv, cerca de Vargem Bonita, Fazenda Agua Limpa, 1 nov. 1976, Ratter, da Fonsêca, Fonsêca, Ribeiro & Silva 3519, fr (UB); 7 oct 1976, Ratter, da Fonsêca, Fonsêca, Ribeiro & Silva 3702, fr (UB); 21 oct 1976, Ratter da Fonsêca, Fonsêca, Ribeiro & Silva 3806, fl (UB); MINAS GERAIS, Serra da Espinhaço, Serra do Cipo, 18 feb 1972, Anderson, Stieber & Kirkbride 36210, est. (UB); Serra do Espinhaço, ca 20 km E de Diamantina, 15 mar 1970, Irwin, da Fonsêca, Souza, Reis do Santos & Ramos 27630, fr (UB); 7 km NE de Diamantina, carretera a Mendanha, 29 ene 1969, Irwin, Reis do Santos, Souza & da Fonsêca 22808, fr (MO); probablemente Brasilia, 9 oct 1965, Heringer 10629, fl (UB).

Las colecciones Irwin & alli 8905, 12084, 18092 y 22802, con frutos asimétricos, hojas con pecíolos más largos y lámina foliar un poco más largas concuerdan con la descripción y fototipo de *Talauma dubia* Eichl., pero los demás caracteres incluyendo las piezas florales analizadas con base en una flor coinciden con *T. ovata*, por tanto sin disponer de material adicional que nos permita un mejor examen, he creído conveniente incluirla en la sinonimia. Puede ser fácilmente separada teniendo en

cuenta la forma de la lámina foliar, número de carpelos, morfología del sincarpo y por no presentar indumento sobre las ramillas, hojas y frutos.

4. *Talauma sellowiana* St. Hil, Flora Bras. Merid. p. 26-27, tab 4B. 1825. Fig. 4

*Talauma fragrantissima* Hook., Ic. Pl. t. 208-212. 1840.

Tipo. BRASIL. Sao Paulo "in sylvis, prope Hypanema, haud longe ab urbe Soracaba", Sellow 2, fl (Holotipo P, Isotipo P).

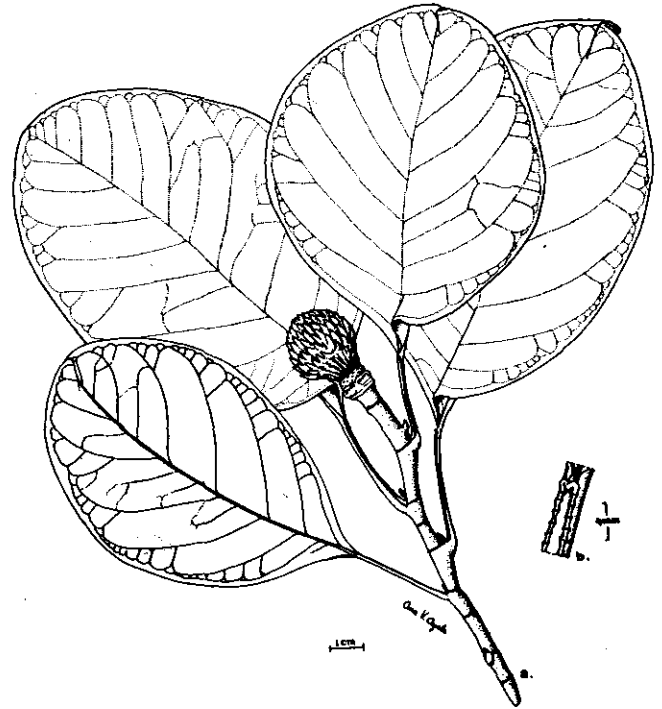


Figura 4. *Talauma sellowiana* (Sellow 2). a, morfología de las estructuras vegetativas y gineceo; b, detalle de la cicatriz sobre la superficie adaxial del pecíolo.

Arbol 7 m altura, ramillas teretes con escasos pelos, caducos sobre los nudos en las ramas jóvenes, luego glabras, lenticelas escasas, entrenudos 0,5-1,12 cm long. (M = 0,76 cm, N = 14) x 0,56-0,8 cm diám. (M = 0,63 cm, N = 14). Hojas alternas pecioladas, pecíolos 2,0-3,0 cm long. (M = 2,5 cm, N = 6) x 0,20-0,28 cm lat. (M = 0,23 cm, N = 6), adaxialmente plano con una cicatriz dejada por la yema foliar al desprenderse y con indumento sobre los flancos, abaxialmente convexa con surcos longitudinales; lámina foliar membranoso-papirácea, anchamente elíptica, 12,2-20,2 cm long. (M = 15,4 cm, N = 15) x 6,8-10,8 cm lat. (M = 9,0 cm, N = 15), ápice redondeado o emarginado, base cuneada, las hojas jóvenes con escasos pelos a excepción de la costa media en la cual son muy abundantes, nervios secundarios 10-13 por lado, prominentes por el envés, retículo prominulo por ambas caras.

Flores blancas terminales; 1 hipsófilo vaginal amplexante dispuesto a 28 cm de longitud del perianto; sépalos 3 oblongos, naviculares, 3,4-4,0 cm

long, x 2.7-3.2 cm lat., con varios nervios longitudinales no muy visibles, ápice redondeado o emarginado, base truncada, gruesos; pétalos 6, obovados, naviculares, inequiláteros, crasos, 2.7-3.1 cm long x 1.5-2.9 cm lat. x 0.3 cm con espesor, los internos de menor tamaño, ápice redondeado, base angosta truncada; estambres lineares en 8 series espiraladas dispuestos, ca 180, 0.9-1.0 cm long. x 0.2-0.25 cm lat., base truncada, ápice agudo; ginoecio hemisférico, carpelos 102, unidos formando un solo órgano. Fruto globoso (Fig. 5).

**Distribución.** Selva Neotropical Inferior o en los denominados por Hueck (1978) bosques subtropicales deciduos y mesofíticos del Brasil oriental.

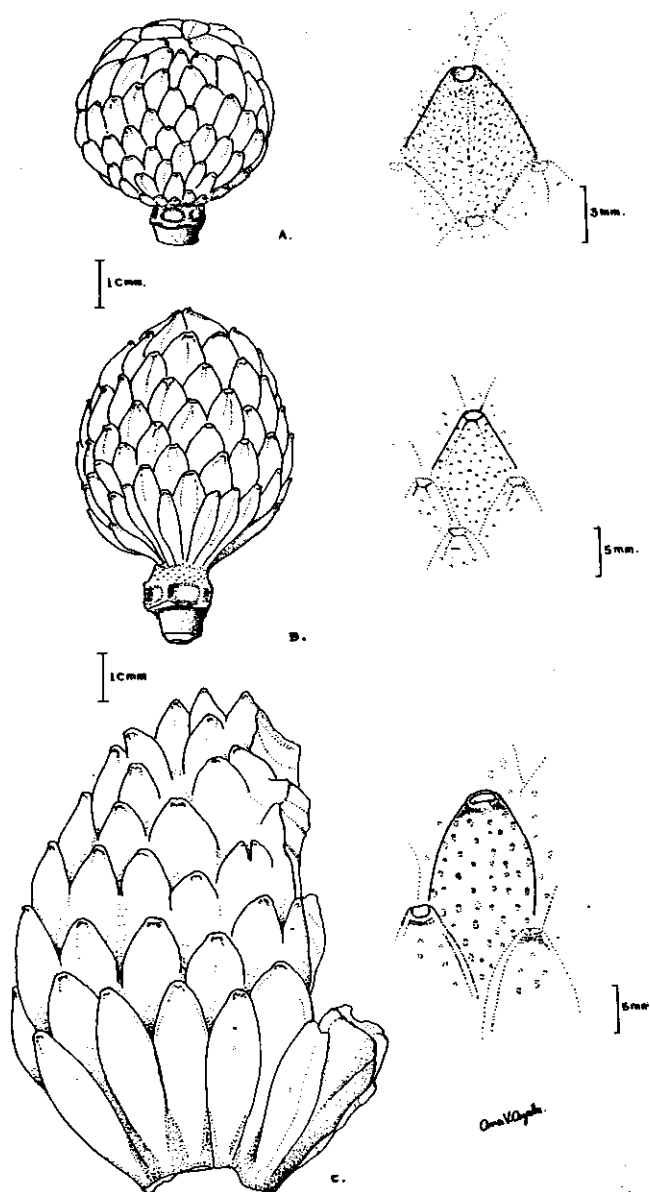


Figura 5. Forma del sincarpo y superficie externa de los carpelos. A, *Talauma irwiniana* (Irwin & al. 12681); B, *T. ovata* (Irwin & al. 22808), C, *T. sellowiana* (Mexia 5199).

**Material examinado.** MINAS GERAIS: Viçosa, 2 nov. 1935, J. G. Kuhlmann 2120, fl (RB); carretera a San Miguel, km 5 de viçosa, 21 oct. 1930, Mexia 5199, fr (MO); RIO DE JANEIRO: Fazenda de San Antonio, 7 may 1876, Herbario de Glaziou 8216, est (P); San Antonio de Munderno, 9 oct 1878, Herbario de Glaziou 10222, fl (P); Serra dos Orgaos, may 1889, Guillemín 953, fr (P); 1931, Paulino Reitz & Victorio F sn, est (RB); Claussen sn, fl (P).

Un ejemplar depositado en P, procedente del Museo Botánico de Berlín coleccionado por Sellow y con un número 1, determinado por Eichler con el nombre de *Talauma ovata*, es exactamente igual al ejemplar tipo de *T. sellowiana* y seguramente creó la confusión de que las dos especies eran lo mismo. El material en fruto de esta especie (véase Mexia 5199) con 32 cm en diámetro, es más grande que la de *T. ovata* al igual que las paredes exteriores de los carpelos y los segmentos que se desprenden. La apreciación de Saint-Hilaire sobre el parecido con *T. dodecapetala* es correcta por la semejanza en la forma de la lámina foliar, más no en el fruto, el cual es de mayor tamaño y forma muy diferente.

#### Agradecimientos

Expreso mi gratitud a los Herbarios de las siguientes instituciones; Instituto Nacional de Pesquisas de Amazonia (INPA), Muséum National d' Histoire Naturelle (P), Universidad de Brasilia (UB) y Missouri Botanical Garden (MO). Un reconocimiento especial merecen: Dra. Marlene Freitas Da Silva, Dra. Alicia Lourteig y Dr. Alwyn Gentry por su ayuda en el préstamo de colecciones; ilustran este trabajo Ana Victoria Ayala y Pilar Jiménez.

#### BIBLIOGRAFIA

- DANDY, J.E. 1927. The genera of Magnoliaceae. Bull. Misc. Inf. R. Bot. Gard. Kew 257-264.
- HOWARD, R.A. 1948. The morphology and systematics of the West Indian Magnoliaceae. Bull. Torr. Bot. Club 75 (4): 335-357.
- HUECK, K. 1978. Los Bosques de Sudamérica. 475 pp. Sociedad Alemana de Cooperación Técnica Ltda. Gotinga.
- LOZANO, C.G. 1983. Flora de Colombia 1. Magnoliaceae 119 pp. Imprenta Nacional, Bogotá.
- MARTIUS, K.F.O. VON 1864. Flora Brasiliensis. Magnoliaceae 12 (38): 122-126, pl. 28-29 Munchen.
- SAINT-HILAIRE, J. 1805. Exposition des familles naturelles 2: 74, tabs. 83-84 París.

# GEOLOGIA DE LA HOYA HIDROGRAFICA DEL RIO MICAY

por

Jaime Galvis\*, Ricardo de la Espriella\*, Alberto Fandiño \*  
y Hernando Pinto\*

## Resumen

Galvis, J., R. de la Espriella, A. Fandiño & H. Pinto : Geología de la Hoya hidrográfica del río Micay. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 585-594, 1990. ISSN 0370-3908.

La litología de la cuenca incluye rocas volcánicas básicas e intercalaciones de rocas ultrabásicas del Cretáceo, rocas sedimentarias con metamorfismo variable del grupo Dagua, vulcanitas Terciarias de composición variable con predominio de composición diorítica, rocas sedimentarias del Oligoceno y el plioceno, terrazas aluviales antiguas del Cuaternario y sedimentos marinos y aluviales. Se describen los plegamientos que produjo el levantamiento de la Cordillera Occidental y los sistemas de fallamiento causados por el plegamiento NE-SW y NW-SE producidos por actividad tectónica reciente. Los eventos de generación litológica y de tectonismo se ordenan cronológicamente.

## Abstract

The lithology of the Micay river basin, to the west of the Departamento del Cauca, Colombia, includes Cretaceous basic volcanic rocks (basalts, andesites, spilites, etc.) interbedded by ultrabasic rocks (peridotites and dunites); sedimentary rocks with varying degrees of metamorphism (slates, graywackes, mudstones and proportionally less cherts and limestones) of the Dagua Group; Tertiary volcanic rocks (dacites and andesites); Tertiary intrusive rocks that range between gabbro and tonalite with predominant diorite, sometimes intruded by andesite or diabase dykes; Oligocene to Pliocene sedimentary rocks; old Quaternary alluvial terraces (chert and quartz pebbles with ferruginous cementation); Quaternary volcanic rocks (mainly basalts uplifted through fissures and minor deposits of piroclastic rocks); and Recent marine (bar sands and mudstones) and alluvial (sands and gravels) rocks.

On tectonism, there are descriptions of the folding that produced the Western Cordillera uplift, and of the main fault systems: the NE-SW system, an effect of the folding, and the NW-SE system, an effect of the recent volcanic activity.

The lithological genesis and the tectonic events are chronologically ordered in the chapter on geologic history.



## Introducción

El objetivo del presente artículo es presentar los resultados de las investigaciones sobre geología regional efectuadas durante la Etapa de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Arrieros del Micay, en la hoya hidrográfica del río Micay, en el NW del Departamento del Cauca.

La cartografía de la Cuenca del Micay se realizó principalmente por medio de la interpretación de fotografías aéreas convencionales e imágenes de radar, apoyada por observaciones de campo durante tres travesías a lo largo de los principales caminos que cruzan la cuenca, y reconocimientos con mayor detalle en zonas específicas.

Los resultados obtenidos tienen limitaciones, debido a la inexistencia de bases topográficas adecuadas de extensas zonas de la cuenca, a la dificultad de verificaciones de campo en zonas de difícil acceso, y a las limitaciones de tiempo para cubrir adecuadamente toda el área de la cuenca.

Por lo tanto, en muchos sectores la localización de los contactos geológicos puede no ser muy exacta; en áreas litológicamente heterogéneas, donde se presentan dificultades en la cartografía de las unidades geológicas, se prefirió agruparlas dentro de la litología predominante. Esto es especialmente cierto para algunas unidades, e. g. el Cuaternario Volcánico (Qv), las ultrabasitas (Kvu), etc.

No se pretende, por lo tanto, que el estado actual del conocimiento sobre todos los aspectos sea completo, pero si se aspira a que sea la base para que estudios posteriores puedan complementarlo.

## Litología

En la cuenca del río Micay aflora una gran variedad de rocas volcánicas, plutónicas, metamórficas y sedimentarias, cuyas edades varían desde el Cretáceo hasta el Cuaternario (Fig. 1).

### Basaltos y Ultrabasitas del Cretáceo (Kv)

Esta unidad puede considerarse como correspondiente a lo que se conoce como Grupo Diabásico (Hubach, 1934, 1953, 1955, 1956 y 1957, Nelson, 1962, París y Marín, 1979, Espinosa, 1980, Ortega, 1984, etc). Sin embargo, en la literatura geológica frecuentemente se han incluido por error en este Grupo basaltos más recientes, lo que ha llevado a una confusión en su edad relativa respecto a otras unidades geológicas.

En la cuenca del Micay se presentan las siguientes vulcanitas Cretáceas (Senerco, SMA y Sedic 1987 – 1988): basaltos olivínicos en los que se observa plagioclasa, clinopiroxeno y olivino (Fig. 2); basaltos piroxénicos compuestos de plagioclasa y piroxeno; andesitas con plagioclasa (variedad ande-

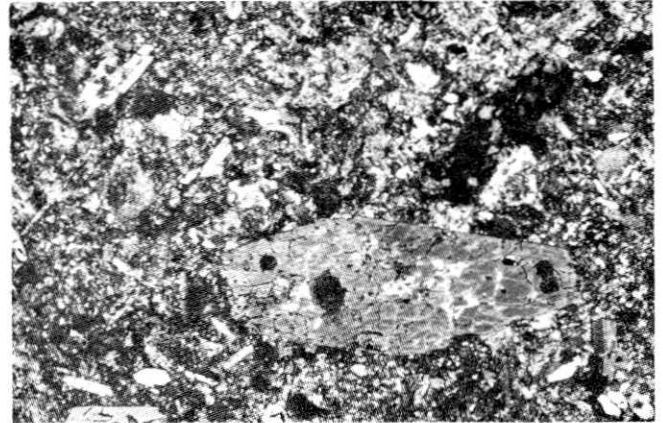
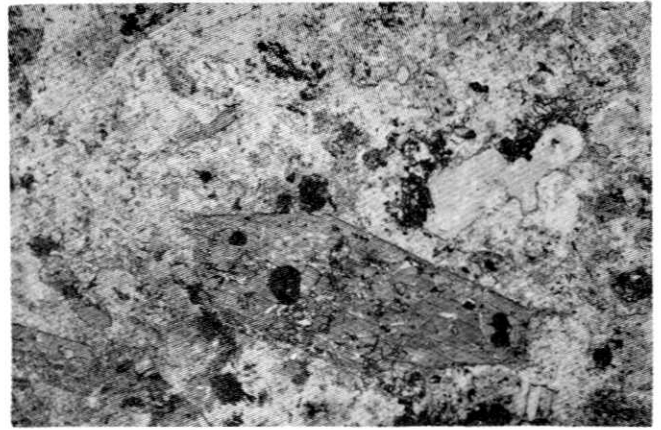


Figura 2. SECCION DELGADA DE BASALTO. Basalto con textura porfirítica; fenocristales de piroxeno, matriz criptocristalina donde se observa devitrificación. (Foto: A. Fandiño).

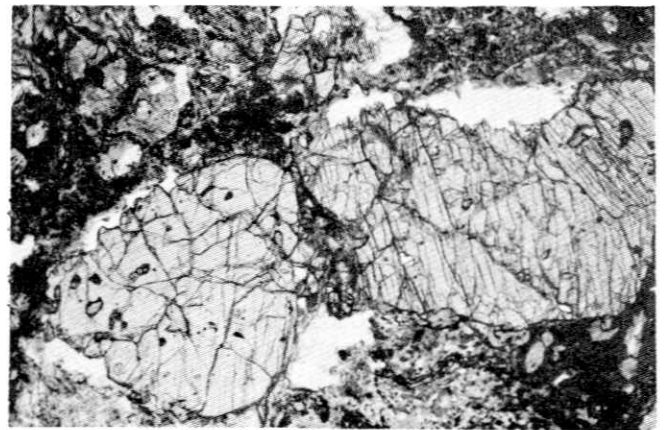
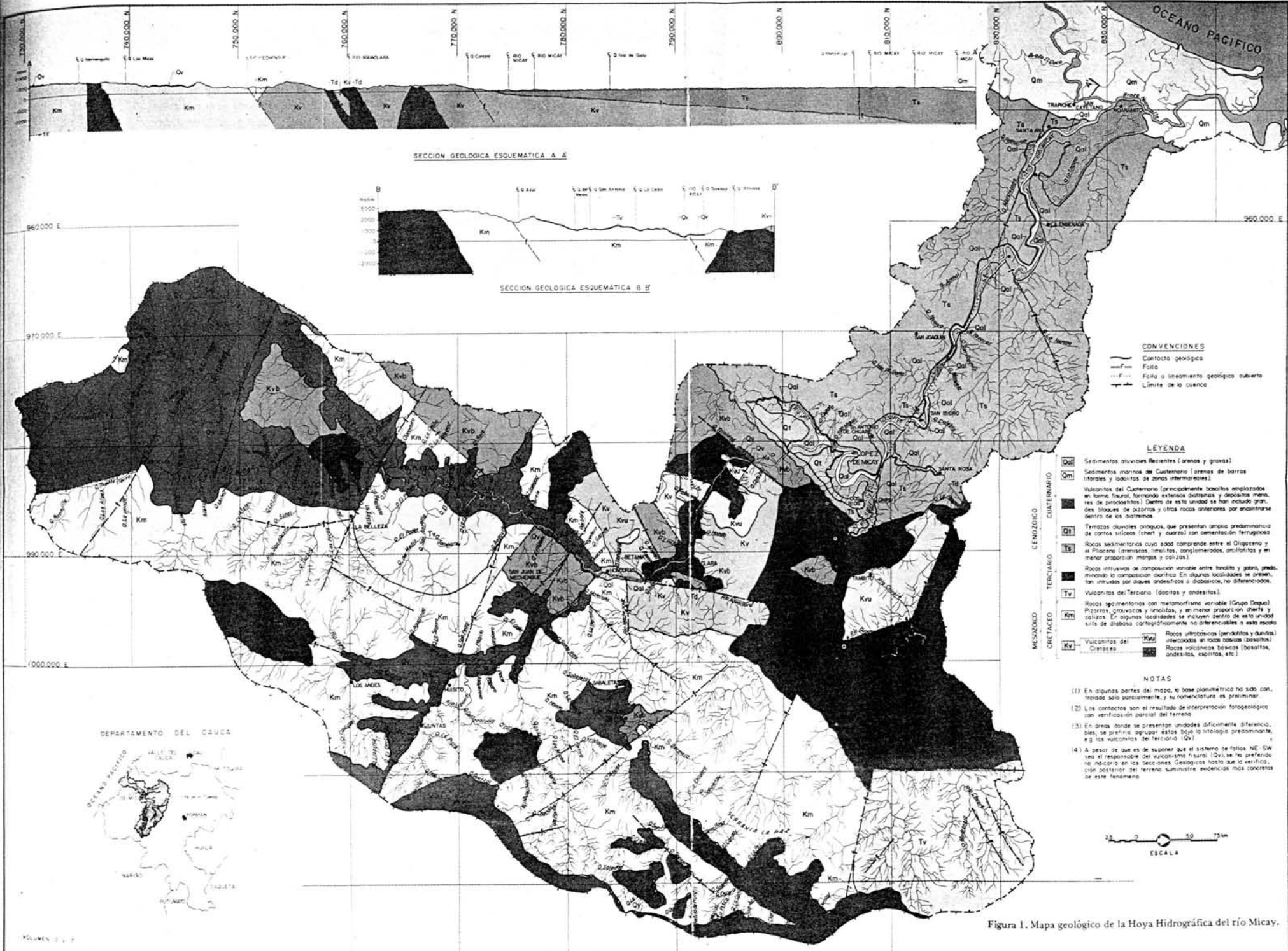


Figura 3. SECCION DELGADA DE DUNITA. Olivino parcialmente serpentinizado; minerales accesorios cromita y magnética. (Foto: A. Fandiño).



SECCION GEOLOGICA ESQUEMATICA A-E

SECCION GEOLOGICA ESQUEMATICA B-B'

**CONVENCIONES**

- Contacto geológico
- - - Faltas
- · - · - Faltas o lineamientos geológicos cubiertos
- Limite de la cuenca

**LEYENDA**

- |   |  |
|---|--|
| <p>Qal</p> <p>Qm</p> <p>Ql</p> <p>Ts</p> <p>Tv</p> <p>Km</p> <p>Kv</p> <p>Kvb</p> | <p>Sedimentos aluviales recientes (arenas y gravas)</p> <p>Sedimentos marinos del Cuaternario (arenas de barras litorales y lodolitos de zonas intermareales)</p> <p>Vulcanitos del Cuaternario (principalmente basaltos emplazados en forma fisural, formando estrias distantes y depósitos menores de piroclásticos). Dentro de esta unidad se han incluido grandes bloques de puzozitas y otras rocas anteriores por encontrarse dentro de los depósitos</p> <p>Terrazas aluviales antiguas, que presentan amplia predominancia de capotas sílicas (chert y cuarzo) con cementación ferruginosa</p> <p>Rocas sedimentarias cuyo edad comprende entre el Oligoceno y el Plioceno (areniscas, limolitas, conglomerados, arcillolitas y en menor proporción margas y calizas)</p> <p>Rocas intrusivas de composición variable entre feldspático y granítico, predominando la composición andesítica. En algunas localidades se presentan intrusivos por cuarcos andesíticos o diabásicos, no diferenciados.</p> <p>Vulcanitos del Terciario (dacitos y andesitos)</p> <p>Rocas ígneas con metamorfismo variable (Grupo Dagua)</p> <p>Puzozitas, graníticas y limolitas, y en menor proporción arenitas y calizas. En algunas localidades se incluyen dentro de esta unidad sillitas de diabasa cartografiadamente no diferenciadas de esta escala</p> <p>Rocas ultrabásicas (peridotitas y dunitas) intercaladas en rocas básicas (basaltos)</p> <p>Vulcanitos del Cretáceo</p> <p>Rocas volcánicas básicas (basaltos, andesitos, espinitos, etc.)</p> |
|---|--|

**NOTAS**

- (1) En algunas partes del mapa, la base planimétrica no ha sido controlada solo parcialmente, y la nomenclatura es preliminar.
- (2) Los contactos son el resultado de interpretación fotogeológica con verificación parcial del terreno.
- (3) En áreas donde se presentan unidades difícilmente diferenciables, se prefirió agrupar estas bajo la litología predominante, es decir, los vulcanitos del terciario (Ql).
- (4) A pesar de que es de suponer que el sistema de fallas NE-SW sea el responsable del vulcanismo fisural (Qv), se ha preferido no incorporar en las secciones Geológicas hasta que se verifique con posterioridad del terreno sumamente evidencias más concretas de este fenómeno.



DEPARTAMENTO DEL CAUCA



Figura 1. Mapa geológico de la Hoya Hidrográfica del río Micay.



sina), piroxeno y escaso cuarzo; peridotitas compuestas de olivino, generalmente serpentinizado, ortopiroxeno, clinopiroxeno y cromita como mineral accesorio; y dunitas (Fig. 3) compuestas casi exclusivamente de olivino notablemente serpentinizado (Fig. 4), también con cromita como mineral accesorio. Las dunitas y las peridotitas se mencionan dentro de las rocas volcánicas (aunque la ortodoxia geológica las ha considerado como rocas plutónicas), debido a que presentan características tales como el almohadillamiento (Fig. 5) y superficies con hialoclastitas, y a que generalmente se hallan intercaladas entre derrames lávicos basálticos, aspectos que indican su génesis por coladas de lava submarina.

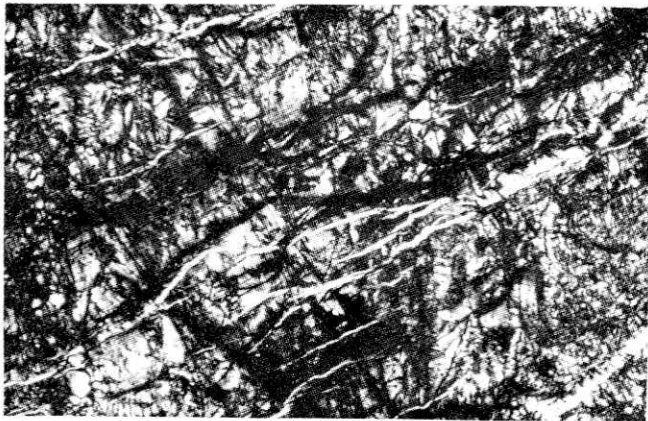
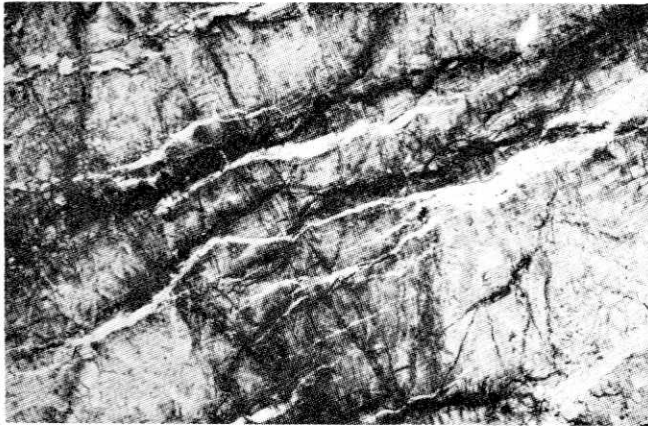


Figura 4. SECCION DELGADA DE DUNITA. Estructura reticular en dunita totalmente serpentinizada. (Foto: A. Fandiño).

Los basaltos del Cretáceo muestran un ligero metamorfismo, que se evidencia por la frecuente presencia de minerales tales como clorita, pumpeilyita y epidota. Las peridotitas y las dunitas generalmente presentan notable serpentización.

Los basaltos comúnmente presentan una meteorización incipiente (Fig. 5), lo que permite identificar con facilidad sus exposiciones. Las ultrabasitas (Fig. 6) presentan intensa meteorización donde la superficie topográfica es suave, dando lugar a la formación de una arcilla amarilla de dos o más metros de espesor, y de costras de plintita de 1 a 5 cm de espesor. La meteorización de las ultrabasitas es menos pronunciada en zonas de topografía abrupta.

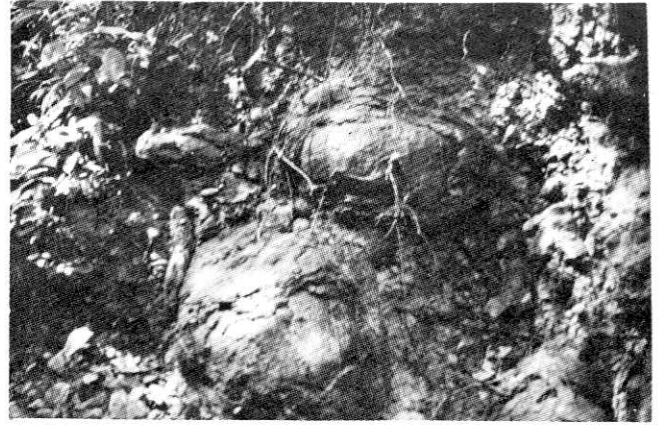


Figura 5. BASALTOS ALMOHADILLADOS. Margen occidental del río Micay, aproximadamente 9 kms al sur de López de Micay. Lavas basálticas (Kvb) con estructuras almohadilladas. Nótese la meteorización esferoidal. (Foto: J. Galvis).

Geográficamente, las vulcanitas Cretáceas se encuentran predominantemente hacia el occidente de la parte cordillerana de la cuenca del Micay. Las ultrabasitas (peridotitas y dunitas) presentan sus mejores exposiciones en la cuenca de la quebrada Nayita, en el sector superior de la cuenca de la quebrada Mangalal, en el curso inferior del río Aguacalara y en un amplio sector del curso del río Chuare. No se debe descartar la posibilidad de que levantamientos más detallados muestren la presencia de esta unidad en otros sectores de la cuenca.



Figura 6. PERIDOTITAS ALMOHADILLADAS. Margen occidental del río Micay, aproximadamente 2 kms al NW de la desembocadura de la quebrada Navita. Afloramiento de lavas ultrabásicas (Kvu). Obsérvese la costra amarilla de meteorización. La roca aún exhibe las estructuras almohadilladas. (Foto: J. Galvis).

#### Sedimentitas de la Formación Dagua (Km)

Esta unidad ha sido frecuentemente mencionada en la literatura geológica (Hubach, 1934, 1953, 1955, 1956 y 1957, Nelson, 1962, Julivert, 1968, París y Marín, 1979, etc).

Cronológicamente esta unidad es más reciente que las vulcanitas antes mencionadas, aunque se depositó también durante el Cretáceo. Comprende sedimentos con metamorfismo de bajo grado, en los cuales predomina la composición pelítica. De

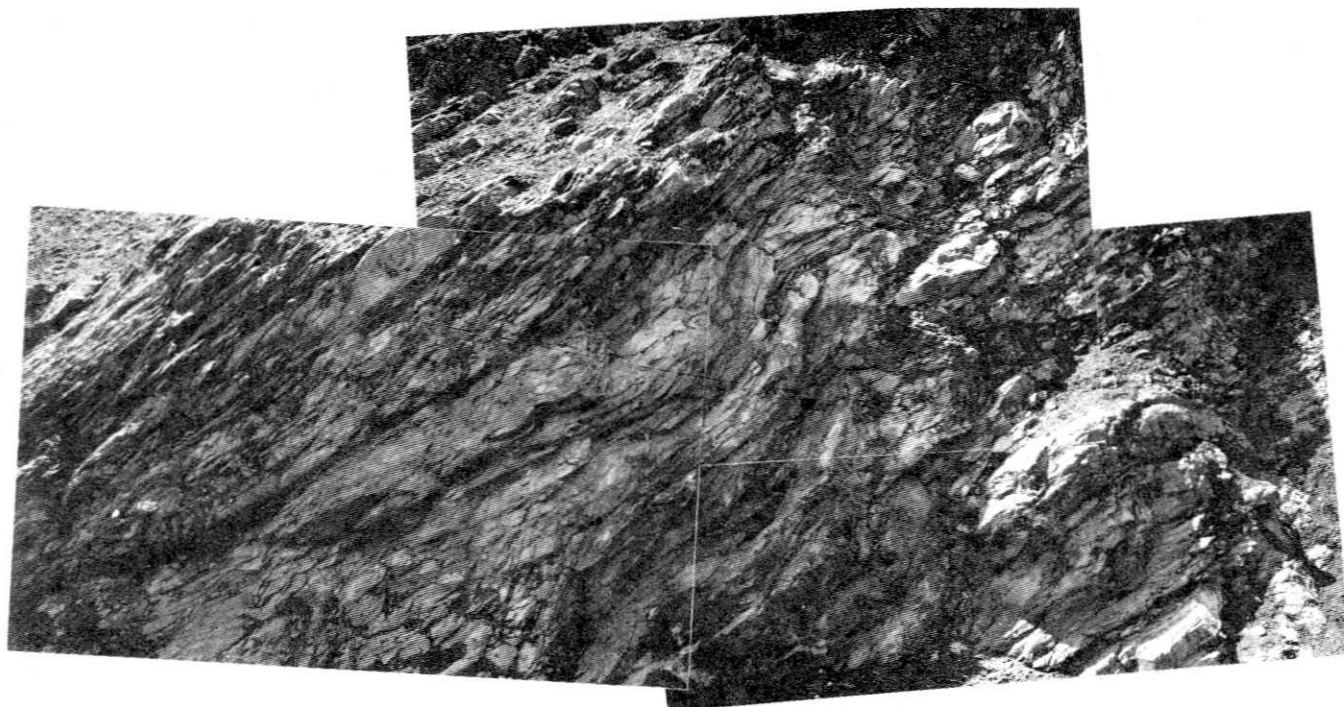


Figura 7. FILITAS. Carretera El Sinai-La Belleza. Afloramiento de filitas (Km) muy tectonizadas. (Foto: M. Herrán).

ésta se presentan pizarras de colores verdes y grises oscuros que en algunos sitios, tales como las cabeceras del río Aguaclara, pueden calificarse como verdaderas filitas (Fig. 7). La composición mineralógica de estas rocas es notablemente monótona; presentan sericita y clorita, como minerales petrográficos. En algunos sectores hay notable abundancia de grafito (especialmente al sur de la cuenca).

Luego de las metapelitas, los metasedimentos más abundantes son las metagrauvas. Presentan un color gris oscuro moteado, grano medio, y se componen principalmente de fragmentos de roca incluidos en una matriz arcillosa cloritizada. Además de los metasedimentos mencionados, el Dagua presenta metacherts de colores crema y gris oscuro a negro, en bancos delgados, intensamente plegados. Hay además metacalizas silíceas de color gris oscuro a negro, en estratos de poco espesor, aparentemente lenticulares. Además de las litologías mencionadas, es interesante la presencia de niveles de óxidos de manganeso, de los cuales se observó una excelente exposición, al S del paraje denominado La Emboscada, al N de la localidad de El Plateado.

Los sedimentos del Dagua están expuestos en gran parte del sector alto de la cuenca del Micay, siendo la unidad geológica más extensa. Los afloramientos de metagrauvas son relativamente frecuentes en toda el área; los metacherts son especialmente conspicuos al S de la Cuenca. Las metacalizas se observan en pequeños sectores del curso alto del río Aguaclara y entre El Plateado y La Emboscada.

#### Plutonitas Terciarias (Td)

Estas rocas fueron reseñadas por París y Marín (1979) y Ortega (1984). Comprenden rocas intrusivas de composición variable, principalmente diorita, tonalita, gabro y lamprófiro.

La diorita (Fig. 8), presenta plagioclasa de composición andesina, anfíbol de pleocroísmo verde muy pálido, escaso cuarzo, minerales opacos, apatito y esfena (Figs. 9 y 10). Es notable la ausen-

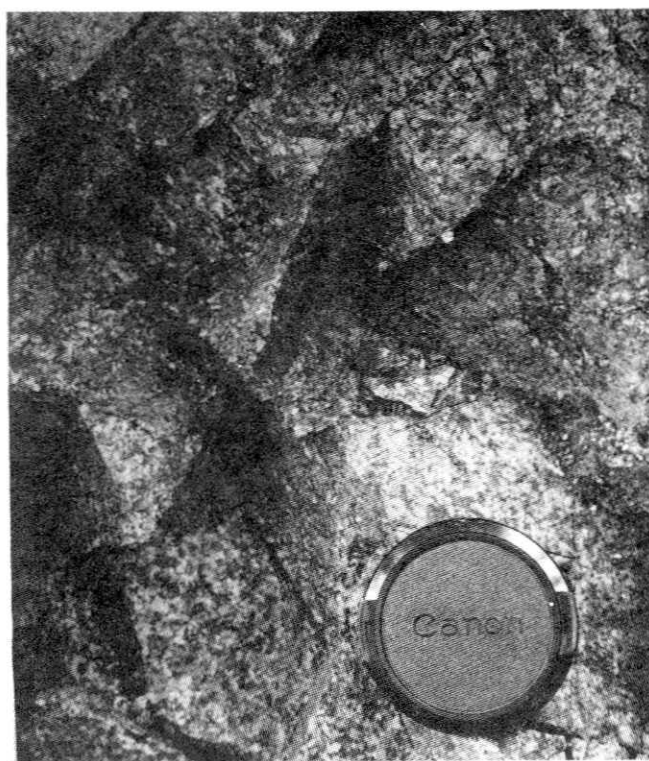


Figura 8. DIORITA. Diorita (Td) con diaclasamiento en varias direcciones. El aspecto moteado es producido por cristales de anfíbol de color oscuro y de plagioclasa de color claro. (Foto: A. Fandiño).



cia de biotita. La tonalita presenta plagioclasa, cuarzo, anfíbol verde pálido, y los mismos minerales accesorios de la diorita. El gabro presenta anfíbol y/o piroxeno, plagioclasa cálcica, y abundantes minerales opacos (ver Fig. 11). Esta composición característicamente se presenta en proximidades del contacto de la intrusión con rocas ultrabásicas, lo que permite suponer que la composición gábrica se debe a asimilación de ultrabasitas por el plutón. Los lamprófiros (ver Fig. 12) se observan aquí compuestos de grandes cristales de anfíbol y en menor proporción plagioclasa. Se presentan en proximidades de contactos con roca ultrabásicas y básicas. Es curioso anotar que una pequeña intrusión al Sur de El Plateado, presenta feldespato de potasio y biotita, minerales ausentes en las demás rocas plutónicas de la cuenca del río Micay.

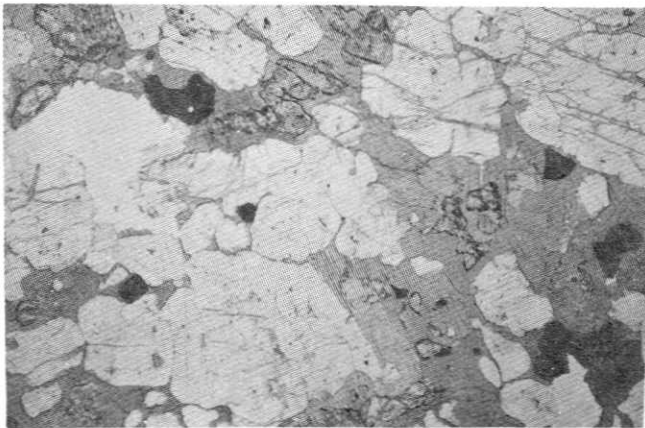


Figura 9. SECCION DELGADA DE DIORITA. (Foto: A. Fandiño).

La mayor exposición de rocas plutónicas se encuentra en la cuenca del río Chuare; hay además exposiciones menores en la cuenca de la quebrada El Rosario, en las cabeceras del río Tope, al Norte de Veinte de Julio, en un sector entre los ríos Micay y Plateado al Sur del caserío El Plateado, y a lo largo del río Micay y algunos afluentes entre el caserío de Aguaclara y la quebrada Trinidad (Fig. 1).

Existen también numerosos diques de poco espesor, generalmente de composición dacítica y andesíticas, instruyendo todas las unidades antes mencionadas.

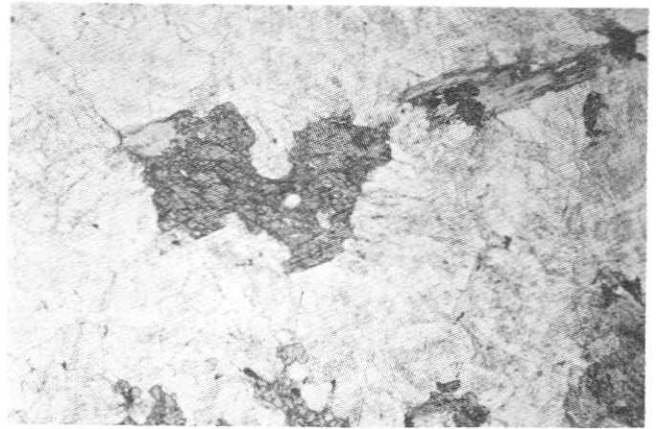


Figura 10. SECCION DELGADA DE DIORITA. (Foto: A. Fandiño)

#### Vulcanitas Terciarias (Tv)

Se observaron dos focos de actividad volcánica Terciaria: uno situado en la parte superior de la cuenca del río Chuare y el otro en la cuenca de la quebrada San Antonio. En el del río Chuare, se reconoce en las fotografías aéreas la protrusión de un posible cuello volcánico y lo que parece ser una zona de lavas alrededor. En la quebrada San Antonio la morfología sugiere una estructura similar, pero el cuello volcánico no es claramente definible.

Las escasas observaciones de las rocas volcánicas en mención, han permitido identificar dacitas,



Figura 11. SECCION DELGADA DE GABRO. Plagioclasa, anfíbol débilmente pleocroico, epidota en venillas, clorita y escasos gránulos de magnetita y pirita. (Foto: A. Fandiño).



Figura 12. LAMPROFIRO. Quebrada Sabaletas. Los cristales negros alargados son anfíboles, los blancos plagioclasa. El tamaño de los cristales es generalmente mayor de 1 cm. (Foto: J. Galvis).

pero es presumible que se presenten variaciones composicionales a andesita (Fig. 13), roca de frecuente ocurrencia en el vulcanismo Terciario de la Cordillera Occidental.

**Sedimentos Terciarios (Ts)**

Bajo esta denominación se agrupan sedimentos de edades que varían desde el Oligoceno hasta el Plioceno buzando en general hacia el NW, pero

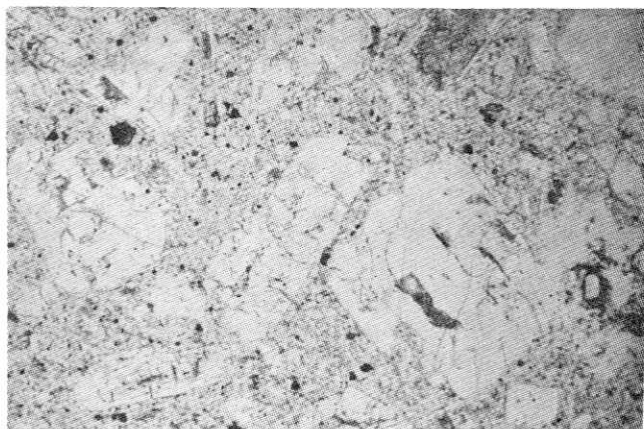


Figura 13. SECCION DELGADA DE ANDESITA. Cristales de plagioclasa zonada con bordes de andesina y núcleo de labradorita; anfíbol; esporádicamente piroxeno. La muestra presenta alteración hidrotermal con presencia de carbonatos y matriz de microlitos principalmente de plagioclasa. (Foto: A. Fandiño).

con plegamientos locales. Hacia la base de la secuencia se encuentra margas, calizas y arcillolitas de posible edad Oligocena (los sedimentos calcáreos son comunes en el Oligoceno de la Costa Pacífica de Colombia). Sobre esos sedimentos, reposan areniscas de color gris verdoso, conglomerados (Fig. 14) y arcillolitas con abundantes restos vegetales, que corresponden al Terciario Superior.

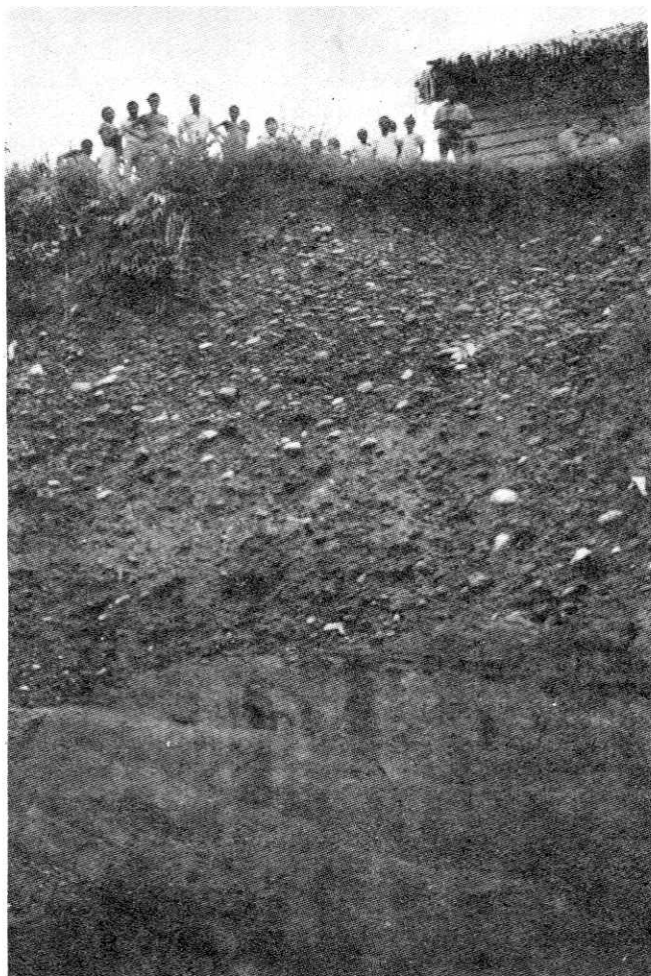


Figura 14. SEDIMENTOS DEL TERCIARIO. Río Micay, localidad de San Isidro. Rocas Terciarias (Ts) que consisten de intercalaciones de areniscas y conglomerados lenticulares. En la parte superior depósitos aluviales. (Foto: J. Galvis).

A estas rocas sedimentarias Terciarias pertenece la muestra J-5 (Fig. 15), que se ha clasificado como una limolita con matriz margosa; presenta clastos de feldespato, cuarzo, piroxeno, anfíbol y fragmentos de roca. Contiene además abundantes restos de foraminíferos y otros organismos marinos.

Estas rocas se presentan regionalmente buzando hacia el W o NW; sin embargo, en muchos sectores están plegadas, como se puede observar en el curso inferior del río Siguí, antes de su desembocadura al río Micay, donde hay pequeños pliegues tumbados. En diferentes sitios a lo largo del curso inferior del río Micay, y cerca a la desembocadura del río Jolí al río Micay, también afloran los estratos inclinados del Terciario.



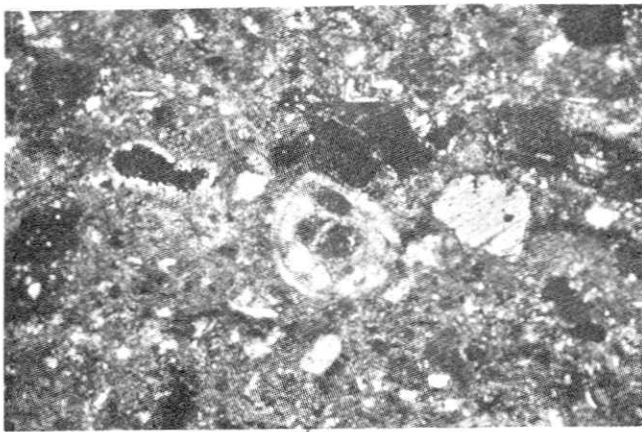
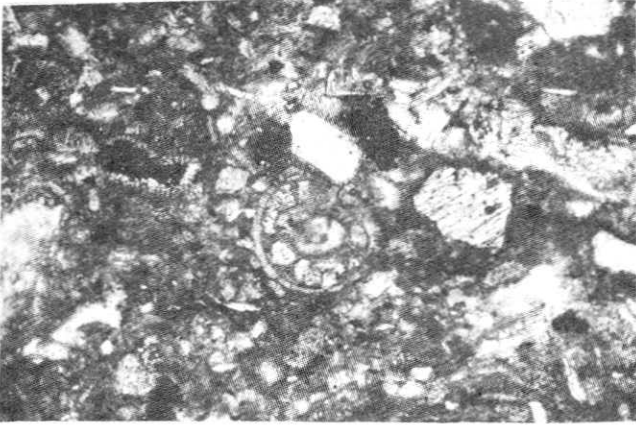


Figura 15. SECCION DELGADA DE LIMOLITA. Matriz margosa y clastos de feldspato, cuarzo, piroxeno, anfíbol y fragmentos de roca. Abundantes restos fósiles de foraminíferos y otros organismos marinos. (Foto: A. Fandiño).

Las unidades sedimentarias Terciarias de la cuenca del Micay se hallan en su parte más occidental (Fig. 1), desde Angosturas y Santa Cruz del Siguí, hasta el litoral Pacífico. Producen un relieve ondulado, con colinas de poca altura, pero frecuentemente con paredes verticales. Este tipo de morfología es aún más notorio en los sitios donde el Terciario está afectado por fallas.

#### Rocas Volcánicas Cuaternarias (Ov)

Con esta denominación se agrupan rocas efusivas básicas, depositadas después del levantamiento de la Cordillera Occidental. Se presentan depósitos piroclásticos en extensos rellenos a lo largo de antiguas depresiones topográficas, y también formando diatremas alargados. Esto parece evidenciar un vulcanismo fisural, controlado por grandes fallas de rumbo NE-SW, paralelas al rumbo general de la cordillera.

Los basaltos que constituyen esta unidad están compuestos de plagioclasa en microlíftos, y clinopiroxeno (rara vez ortopiroxeno) en fenocristales; generalmente presentan abundante matriz vítrea; los minerales accesorios son escasos.

Dentro del material piroclástico propiamente dicho es frecuente la composición andesítica. En

los diatremas (Fig. 16) se observan grandes bloques de la roca pre-existente (frecuentemente pizarras de la Formación Dagua) fracturados y rodeados por la roca basáltica, como se puede observar entre las localidades de El Plateado y El Mango. Los basaltos también se encuentran en forma de grandes sills inyectados entre las rocas de la Formación Dagua.



Figura 16. BLOQUE DE FILITAS EN UN DIATREMA. Carretera La Belleza - El Plateado, cerca a esta última localidad. Bloque de metasedimentos (en el que se alcanza a apreciar la foliación) embebido dentro de material volcánico meteorizado. (Foto: M. Herrán).

Estas vulcanitas recientes se meteorizan con relativa facilidad debido a su alto contenido en vidrio, dando lugar a la formación de suelos relativamente fértiles al compararlos con los que se forman a partir de otras unidades litológicas de la región del Micay.

La distribución de los basaltos Cuaternarios se presenta en forma de fajas, comúnmente a lo largo de antiguas fallas que sirvieron como vía a la efusión; por esto es característico en la zona ver fallas obliteradas en su expresión morfológica debido a derrames basálticos. Al extremo Sur de la cuenca se presenta una gran extensión cubierta por estas vulcanitas, área en la que se observan una serie de alineamientos (posibles fallas) que forman un patrón rectangular poco común. Al Suroeste de allí, en las

cabeceras del río Iscuandé, parece encontrarse un gran foco de vulcanismo basáltico, éste ya no fisural; probablemente de allí provino gran parte de las rocas extrusivas que cubren las cuencas superiores del río Plateado y del río Guáitara. Entre el río Guáitara y el Micay hay una zona con marcado drenaje radial, lo que sugiere la existencia de un antiguo foco volcánico.

#### Terrazas Antiguas (Ot)

Se han denominado así unas terrazas altas cuya base se halla por encima del nivel topográfico del río Micay. Se componen principalmente de gujarros de chert y cuarzo, y en menor proporción cantos de rocas plutónicas y efusivas. Presentan un cemento ferruginoso que les da un tono rojizo.

Estas terrazas ocupan una faja discontinua, paralela al contacto de los sedimentos Terciarios con los basaltos y demás rocas ígneas expuestas en el piedemonte. El sitio más accesible para observar esta unidad, es la colina sobre la que está construida la iglesia de López de Micay.

#### Terrazas y Aluviones Recientes (Oal)

Bajo esta denominación se incluyen los depósitos que forman las terrazas y aluviones de los ríos Micay, Siguí, Jolí y Gualalá. Estos depósitos son de extensión considerable en el curso inferior de dichos ríos, en la llanura Pacífica. En el curso superior del Micay, los aluviones son escasos, pero pueden mencionarse el de San Juan de Mechengue y el que se halla aguas abajo de la desembocadura de la quebrada Los Cristales. No todos los depósitos recientes han sido cartografiados como unidades geológicas independientes, por su reducida magnitud. La zona aluvial del Micay se extiende aguas abajo de López como una faja irregular hasta la zona de influencia de las mareas.

#### Sedimentos Marinos Cuaternarios (Qm)

Este nombre se refiere a los depósitos de lodo de la llanura intermareal y a las arenas de las barras litorales que cierran el estuario de los ríos Micay y Naya.

#### Tectónica

El evento tectónico más importante ocurrido en lo que hoy es la cuenca del río Micay, es el intenso plegamiento con directriz NE-SW que produjo el levantamiento de la Cordillera Occidental. Este evento orogénico afectó las unidades litológicas del Cretáceo y del Terciario. Aunque no es posible situarlo cronológicamente con precisión, es claro que los sedimentos de edad Oligocena fueron plegados en la zona transcordillerana del Cauca y del Patía. La intensidad del plegamiento disminuye gradualmente hacia el Occidente hasta el borde de la llanura Pacífica, en la cual los sedimentos presen-

tan regionalmente una leve inclinación hacia el Occidente, aunque localmente existan pequeños pliegues tumbados, como los que se observan en el curso inferior del río Siguí.

Con el plegamiento, se produjeron numerosas fallas con rumbo NE-SW. Es factible que en su mayor parte se trate de fallas inversas, originadas en un episodio de compresión intensa. Como se expuso en la litología de las vulcanitas Cuaternarias, es notorio que estas fallas no se noten en varios sectores debido al vulcanismo fisural eyectado a lo largo de ellas, o porque han sido cubiertas por rellenos de rocas piroclásticas.

Entre las fallas con dirección NE-SW, cabe mencionar las siguientes:

- La falla a lo largo del curso del río Micay entre Árgelia y el caserío La Belleza, parcialmente obliterada por el relleno volcánico.
- La que forma el valle del río Huisitó, entre el caserío Huisitó y Los Andes, cuyo trazo también se halla en parte fosilizado por piroclásticas.
- La falla que parece controlar el curso del río Micay en el área de Mechengue.
- La falla que controla parte del curso del río Aguaclara y que continúa al Sur hasta la desembocadura del río Tope al río Micay.
- La falla a lo largo del río San Joaquín en cercanías de la Gallera.
- La falla en la quebrada Trinidad, que encauza al río Micay en el sector de la desembocadura de la quebrada La Brea.
- Además de las mencionadas, hay numerosas fallas menores con rumbo similar, e. g. en el caserío de Aguaclara, en el curso superior de la quebrada San Antonio, en el curso medio de los ríos Mechengue, Tope, etc.

Es interesante mencionar fallas de esta misma dirección en el curso superior de los ríos Plateado, Micay y Guáitara, que forman un curioso patrón rectangular de fallas. En general, los sistemas de fallamiento NE-SW no parecen ser activos, puesto que los depósitos piroclásticos y los diatremas presentes en gran parte de su trazo no presentan indicios de actividad tectónica reciente. Excepción, tal vez, la constituye la falla que cruza por el caserío de Zaragoza en el bajo Micay, y afecta sedimentos del Terciario Tardío. Este es el único alineamiento importante con dirección NE-SW de la llanura Pacífica. Su trazo se prolonga hasta el río Naya.

La actividad tectónica reciente produce alineamientos con dirección NW—SE. Con ese rumbo se observan grandes fallas:

- Tal vez la más importante de éstas es la que controla el curso del río Micay desde la desembocadura del río Siguí hasta el estuario, y que se puede seguir al SE en las cabeceras del Siguí y en la cuenca superior del río Aguaclara. Esta falla afecta sedimentos del Terciario Tardío cerca de la desembocadura del río Siguí en el Micay.
- Una falla de longitud considerable, paralela a la antes mencionada, al NE del curso del río Chuaré, cruza la cordillera desde la planicie de Popayán hasta la Llanura Pacífica.
- La falla que se presenta en el curso medio del río Tope, cruzada por el río Micay aguas abajo de San Juan de Mechengue, y que aparentemente se prolonga hasta encauzar el curso medio del río Saija.
- La falla que, desde las planicies del Tambo (al NE de la cuenca), cruza acerca al caserío de Huisitó y se proyecta al río Micay aguas arriba de la desembocadura de la quebrada El Rosario.
- Otra falla importante cruza el Micay en vecindades del caserío El Plateado, continúa encauzando la quebrada Pinche, y más al W parece encauzar al río Timbiquí.
- Un gran fallamiento regional que se localiza partiendo de la desembocadura del río Guáitara en el Micay hacia el NW.
- Un gran alineamiento que cruza el curso superior de la quebrada Las Pailas hacia el NW, y encauza el lecho superior del río Guapi.
- Hay además numerosos alineamientos, muy seguramente relacionados con este sistema, algunos de los cuales se han indicado en la Fig. 1.

Aunque la información existente no permite ser conclusivos al respecto, el sistema tectónico NW—SE parece encontrarse activo. Su expresión topográfica no es muy marcada, pero los trazos son claros. Aparentemente afecta las vulcanitas Cuaternarias. Estas fallas parecen ser de tipo transcurrente, pero el nivel de conocimiento actual no permite certeza absoluta.

Además de los dos grandes sistemas tectónicos mencionados, existen fallas en otras direcciones. Entre ellas pueden citarse, con dirección N—S, la que sirve de contacto Oriental al batolito de Chuare, la que encauza a la quebrada Puente Tierra al Sur de Argelia, la que encauza la quebrada Las Pailas, etc.

En el bajo río Mechengue se observa un importante alineamiento EW que encauza este río hasta su desembocadura en el Micay.

### Historia Geológica

La historia geológica de la Cordillera Occidental y su vertiente Pacífica, comienza en el período Cretáceo. En una dorsal oceánica, efusiones lávicas submarinas generaron los basaltos y ultrabasitas de edad Cretácea que se observan en la Cordillera. Sobre éstos se depositaron arcillas pelágicas y sedimentos turbidíticos, de procedencia no establecida, que constituyen lo que se conoce como Formación Dagua.

Durante el Cretáceo Tardío, o en el Terciario Temprano, se produjo una ruptura de la placa terrestre de la que formaban parte las unidades litológicas mencionadas. Esta ruptura, originada por esfuerzos compresivos, parece haber tenido una dirección aproximada N—S. La compresión causó el cabalgamiento de la porción Oriental sobre la Occidental, iniciándose un proceso de subducción. Todo esto tuvo lugar en el océano, lejos del actual continente Suramericano, con el cual no había relación alguna en esa época.

La subducción provocó intenso magmatismo al Este, lo que produjo el emplazamiento de grandes batolitos e intensa actividad volcánica, formándose un arco de islas. La actividad ígnea originó las rocas plutónicas y volcánicas Terciarias de la actual Cordillera Occidental y los fenómenos de alteración subsecuentes. Los esfuerzos compresivos y la elevación de temperatura que produjo la actividad magmática, metamorfizaron las rocas Cretáceas.

Durante el Terciario, el arco de islas fue gradualmente aproximándose al continente Suramericano, produciendo plegamientos en la cuenca marina situada al E del arco insular, la que gradualmente emergió, formándose la Cordillera Occidental. Al mismo tiempo, con el avance de la subducción, el frente magmático fue migrando hacia el Oriente hasta localizarse al E de dicha cordillera.

Desde el Terciario Medio comenzó a depositarse una espesa secuencia sedimentaria al Occidente del primer cordón volcánico del arco insular. Esos sedimentos constituyen la cubierta de la Llanura Pacífica.

Los esfuerzos compresivos, debidos a la aproximación al continente Suramericano, causaron grandes fallas inversas que, junto con el plegamiento, afectaron las unidades litológicas de la Cordillera Occidental. Durante el Cenozoico Tardío, y más específicamente en el Pleistoceno, sobrevino un episodio de vulcanismo básico fisural a lo largo de las fallas antes mencionadas. Esto ocurrió después del levantamiento de la cordillera, formándose extensos diairemas a lo largo de las fallas, además de de-



ósitos piroclásticos que rellenaron algunas depresiones topográficas.

Por último, cabe mencionar un evento tectónico incipiente que está produciendo fallas perpendiculares a la directriz de la Cordillera Occidental. Aparentemente se trata de fallas transcurrentes,

que tienden a dislocar la Cordillera. De éstas, tal vez el ejemplo más espectacular en el Pacífico colombiano es la falla que sale al Golfo de Buenaventura. En la costa del departamento del Cauca hay algunas de menor magnitud, tal como la que encauza al bajo Micay.

#### BIBLIOGRAFIA

- ESPINOSA, A. 1980. Sur les Roches Basiques et Ultrabasiques du Bassin du Patía (Cordillère Occidental des Andes Colombiennes): Etude Géologique et Petrographique: Tesis U. de Genève, Faculté de Sciences, Imprimerie Nationale, 242 pp.
- GEOTEC, LTDA. 1976. Mapa Geológico de Colombia, escala 1: 1'000.000 (1a. Edición): Bogotá.
- . 1988. Mapa Geológico de Colombia, escala 1: 1'200.000 (2a. Edición): Bogotá.
- GOMEZ, H. 1986. Algunos aspectos Neotectónicos hacia el Suroeste del Litoral Pacífico Surcolombiano: Revista CIAF, Vol. 11, Nos. 1-3, p. 281-298.
- HUBACH, E. & B. ALVARADO, 1934. Geología de los Departamentos del Valle y Cauca y en Especial del Carbón: Serv. Geol. Nal., Inf. No. 224, Inédito, 472 pp.
- . 1953. Anotaciones sobre Recursos y Vías para el Desarrollo del Departamento del Cauca: Inst. Geol. Nal., Inf. No. 669, 10 p.
- . 1955. El Cauca y las Unidades Geográficas y Geológicas del Departamento y los Recursos del Suelo y del Subsuelo: Inst. Geol. Nal., Inf. No. 1107, 19 p.
- . 1956. El Camino Viejo del Micay. Departamento del Cauca: Inst. Geol. Nal., Inf. No. 1164, 49 p.
- . 1957. Contribución a las Unidades Estratigráficas de Colombia: Inst. Geol. Nal., Inf. No. 1212, 166 p.
- Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras (Ingeominas), 1976. Mapa Geológico de Colombia, escala 1: 1'500.000: Bogotá.
- . 1988. Mapa Geológico General de Colombia, escala, 1: 1'500.000: Bogotá.
- JULIVERT, M. 1968. Lexique Stratigraphique, Amérique Latine, Volumen V, Fascicule 4a., Colombie, Première Partie, pag. 261-265, 266-277.
- NELSON, W.H. 1962. Contribución al conocimiento de la Cordillera Occidental. Sección Carretera Cali-Buenaventura: Serv. Geol. Nal., Bol. Geol. 10 (1-3): 81-108.
- ORTEGA, C. 1984. Complejo Ofiolítico en la Cuenca del Río Guapi: UIS, Bol. Geol. 29: 117-123.
- PARIS, G. & MARIN, P. 1979. Mapa generalizado del Departamento del Cauca: Ingeominas, 38 pp.
- PARRA, M. 1984. Ensayo de Correlación de los Diferentes Cuerpos Sedimentarios entre los ríos Bebará y Capá en el Departamento del Chocó: Tesis de Grado; inédita 71 pp.
- RODRIGUEZ, G. 1981. Facies Prehnita – Pumpellita en Rocas de los Grupos Diabásico y Dagua en la Parte Central y Sur de la Cordillera Occidental (Colombia): Geología Norandina, 3:3-10.
- SENERCO, SMA & SEDIC 1987-1988. Proyecto Hidroeléctrico Arrieros del Micay, Estudio de Factibilidad, Informes de Geología Nos. 1-8: CRC e ISA, Inéditos.
- . 1988. Proyecto Hidroeléctrico Arrieros del Micay, Informe Preliminar: CRC e ISA, Inédito, 94 pp.
- Servicio Geológico Nacional, 1944. Mapa Geológico General de la República de Colombia, escala 1: 2'000 000: Bogotá.
- . 1962. Mapa Geológico de la República de Colombia, escala 1: 1'500 000: Bogotá.

# ESTUDIOS SOBRE ENTOMOSTRACEOS DE COLOMBIA II- Una nueva especie de *Eulimnadia* PACKARD 1874 (Crustácea, Conchostraca)\*

por

Ewald W. Roessler\*\*

## Resumen

Roessler, E.: Estudios sobre Entomostráceos de Colombia. II. Una nueva especie de *Eulimnadia* Packard 1874 (Crustácea, Conchostraca). Rev. Acad. Colomb. Cienc. 17 (66): 595-603, 1990. ISSN 0370-3908.

Se propone como nueva especie a *Eulimnadia magdalenensis*. Adicionalmente se describen ejemplares neoténicos, se plantean problemas taxonómicos surgidos de esta condición y se discuten aspectos relativos a los cambios morfológicos ocurridos después de la maduración sexual.

## Summary

The study describes the morphological features of females and males of a new colombian of the genus *Eulimnadia*, *Eulimnadia magdalenensis* n. sp. Additionally it describes an specimen of both sexes with neotenic features. There are shortly discussed some problems in the taxonomical classification of this and other species of the genus related with aspects of neoteny and morphological changes which continue after sexual maturation.

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie werden morphologische Merkmale der Maennchen und Weibchen einer kolumbianischen Art des Genus *Eulimnadia*, *Eulimnadia magdalenensis* n. sp. beschrieben. Zusaetzlich wird je ein Exemplar beider Geschlechter mit neotenischen Merkmalen vorgestellt. Es werden kurz einige Probleme der taxonomischen Klassifizierung dieser und anderer Arten der Gattung im Zusammenhang mit neotenischen Phaenomenen sowie morphologischen Veraenderungen diskutiert, die auch nach Eintritt der Geschlechtsreife weitergehen.

---

\* El estudio recibió apoyo financiero de COLCIENCIAS (Proyecto No. 1204-05-127-86) y de la Universidad de los Andes. El autor agradece al HIMAT el suministro de datos hidrometeorológicos.

\*\* Universidad de los Andes, Departamento de Ciencias Biológicas, Apartado Aéreo 4976, Bogotá, D.E. — Colombia.

## Introducción

Los conchostráceos (concostráceos) forman uno de los subórdenes primitivos de los filópodos. Su caparazón bivalvo envuelve la cabeza y el tronco alargado. El cuerpo comprimido, lateralmente en diferente grado presenta un número creciente de segmentos portadores de apéndices de estructura foliácea. El tronco termina típicamente en un telson con un par de cercópodos fuertes.

La clasificación de los conchostráceos ha sido confusa desde su creación como unidad taxonómica, como documenta brevemente *Mattox*, (1959) y su taxonomía ha dejado mucho que desear también en la actualidad (comp. *Margaleff*, 1961). El género *Eulimnadia* Packard, 1874 parece especialmente adaptado a la vida en medios acuáticos lénticos de muy corta duración. Estas adaptaciones conducen frecuentemente a la expresión local y temporal de características neoténicas bajo determinadas presiones ambientales (*Roessler*, 1988b). Los caracteres neoténicos junto con la gran variabilidad morfológica de las especies han contribuido probablemente a la descripción de numerosas morfoespecies artificiales.

Para Colombia los conchostráceos no han sido reportados hasta la fecha, con excepción de *Cyclotheria hislopi*, una especie cosmopolita y circumtropical (*Roessler et al.*, 1986).

Para caracterizar la presente especie se ha seguido su ciclo vital en diferentes regiones de Colombia durante varios años, y su descripción taxonómica se basa en abundante material de todas las etapas del desarrollo ontogenético. En este primer estudio se describen como material típico hembra y macho de una población de un charco de mediana duración en el Departamento del Huila. Adicionalmente se presentan la hembra y el macho de una población con caracteres neoténicos manifiestos, procedente de un charco de muy corta duración en el Departamento del Tolima.

En otra entrega de esta serie se describirán el ciclo vital y las adaptaciones bioecológicas de la especie en referencia (*Roessler*, 1988b).

### *Eulimnadia magdalenensis* sp. nov.

Descripción de la hembra (Holótipo No. ICN—CR—416—88).

Caparazón bivalvo moderadamente comprimido y transparente con un color propio ligeramente amarillento a café, ovalado en vista lateral con la altura máxima aproximadamente a nivel del primer tercio de la longitud total (comp. Fig. 1a; 2a). Contorno dorsal fuertemente curvado en la parte anterior formándose una especie de joroba. Parte anterior, ligeramente cóncava, mientras la parte posterior se acerca a una línea recta conservándose una curvatura ligeramente convexa. El extremo poste-

rior del contorno dorsal presenta un corte abrupto iniciándose el contorno posterior de curvatura, convexa con una ligera concavidad; el extremo anterior es armónicamente redondeado y el contorno ventral presenta una curvatura convexa ancha (comp. Fig. 1a; 2a).

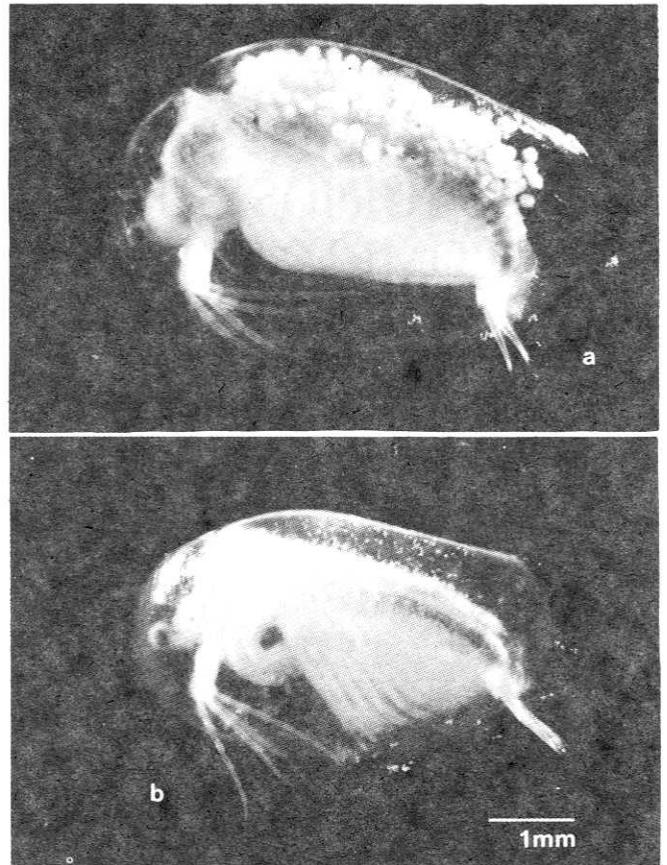


Figura 1. *Eulimnadia magdalenensis* n. sp. Vistas laterales: (a) ♀ madura (No. ICN—CR—420—1988); (b), ♂ maduro (No. ICN—CR—421—1988).

Valvas del holótipo con siete líneas de crecimiento (el borde externo incluido), franjas de crecimiento más anchas en el centro de las valvas. El estado del desarrollo ontogenético de esta hembra corresponde al estadio "S-12" que representa la décima segunda etapa con una valva que encierra el cuerpo. A doce etapas larvianas con valvas (S-1 a S-12) anteceden tres etapas naupliales y dos estadios metanaupliales, de modo que el espécimen se encuentra en su décimo séptimo estadio ontogenético después de la eclosión (comp. *Roessler*, 1988b). La postura de 345 huevos que se encuentra en la "cámara de incubación" es la cuarta o quinta de esta hembra.

Las dimensiones de las valvas del holótipo son longitud: 5,63 mm, altura: 3,88 mm, relación longitud/altura: 1,45.

Las dimensiones de las conchas de las etapas anteriores (S-6 hasta S-11) deducidas de las franjas de crecimiento, son las siguientes (en mm): Longitudes: 3,06; 3,64; 4,19; 4,8; 5,16; 5,41. Alturas: 2,03; 2,41; 2,8; 3,32; 3,64; 3,8. Relaciones longitudinales/alturas: 1,5; 1,5; 1,5; 1,45; 1,4; 1,4.

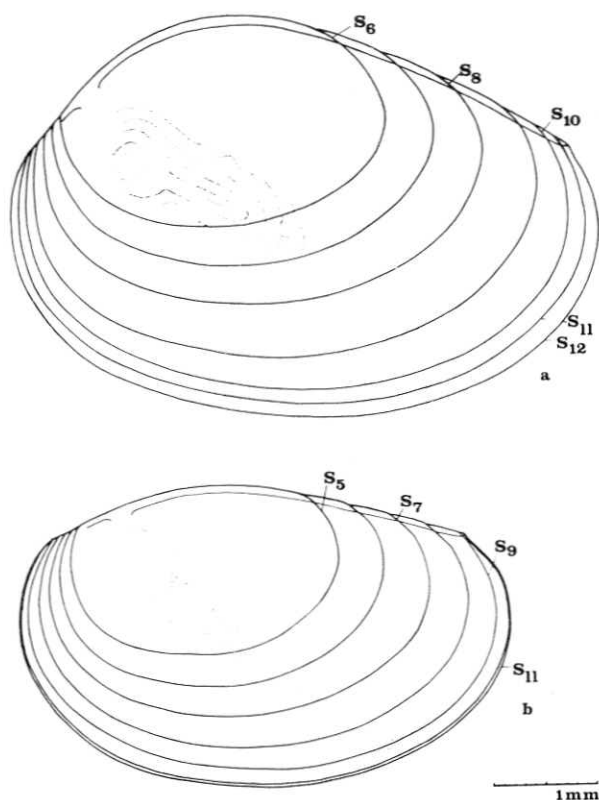


Figura 2. *Eulimnadia magdalenensis*; holótipo (No. ICN-CR-416-88), ♀ madura (a). Vista lateral del caparazón con siete líneas de crecimiento (borde externo incluido). El espécimen se encuentra en la etapa ontogenética S-12 (comp. texto). La línea interna corresponde al borde de la lámina externa del caparazón de la etapa larval S-6 y a la segunda línea de crecimiento del parátipo (No. ICN-CR-417-88) de la Figura 3. Las líneas punteadas demarcan la glándula de la valva y esquemáticamente el músculo aductor, parátipo (No. ICN-CR-417-88), ♂ maduro (b). Vista lateral del caparazón con siete líneas de crecimiento. El espécimen se encuentra en la etapa S-11; la línea interna corresponde al borde del caparazón de la etapa larval S-5.

Cabeza con "órgano frontal" típico en forma de campana irregular (comp. figs. 1; 3); rostrum pronunciado y puntiagudo característico.

Primeras antenas bien desarrolladas y extendidas ventralmente hasta el extremo proximal del primer segmento de los ramos de las segundas antenas. Estas últimas son relativamente largas y su borde dorsolateral está provisto de numerosas cerdas fuertes. Se distinguen dos ramos compuestos de nueve segmentos cada uno. El número y el tamaño de las cerdas o espinas dorsales decrece en dirección proximal-distal, mientras las setas natatorias del borde ventrolateral de los segmentos incrementan en número y tamaño en la misma dirección (comp. Figs. 1,3).

Los dieciocho segmentos postmaxilares tienen un desarrollo ligeramente asimétrico, presentando el lado izquierdo dieciocho extremidades desarrolladas mientras el lado derecho cuenta únicamente con diecisiete (com. Fig. 5).

El telson es alargado y de forma romboide con una morfología típica para el género (comp. Fig. 7b). Crestas dorsocaudales provistas de una serie de espinas de diferente tamaño. Las dos filas parecen partir de una primera espina impar en posición aproximadamente medial a causa de la asimetría de la dentición de las crestas dorsales de los flancos del telson (en otros ejemplares no se observa esta espina impar). Rige una gran variabilidad respecto al tamaño y el número de estas páginas fuera de su distribución asimétrica. Ambas crestas convergen sobre la superficie dorsomedial en una estrecha curva.

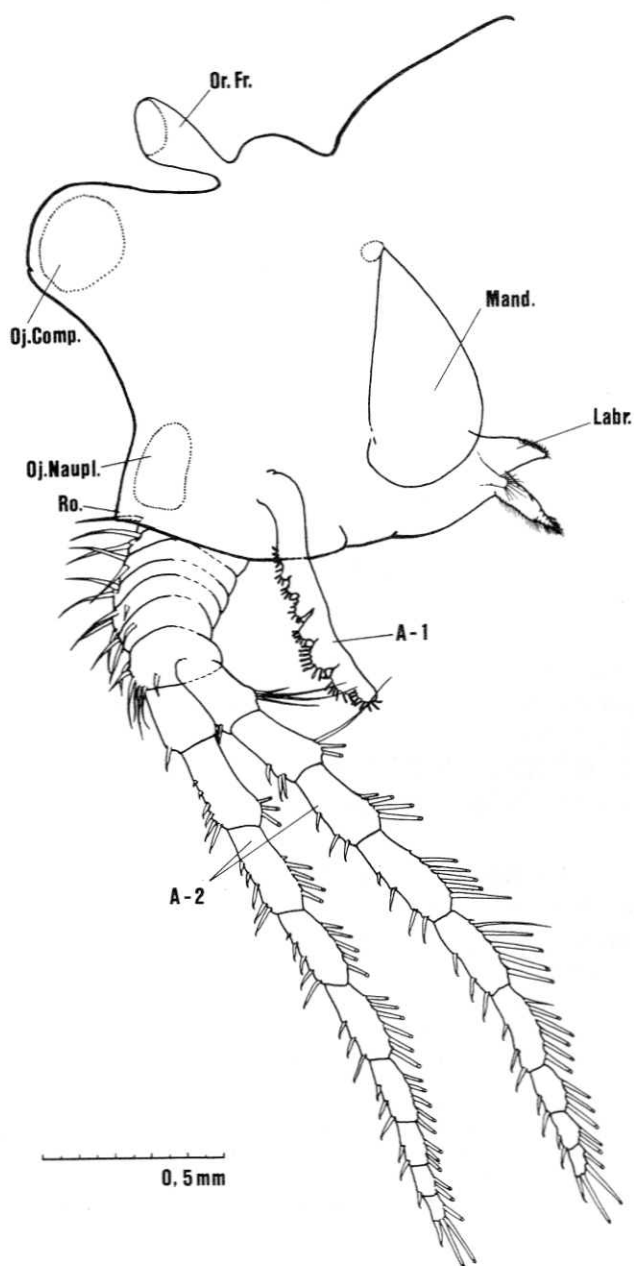


Figura 3. *Eulimnadia magdalenensis*; ♀ holótipo. Vista lateral de la cabeza con primeras y segundas antenas. Or. Fr. = "órgano frontal"; A-1 = primera antena; A-2 = segunda antena; Oj. comp. = ojo compuesto; Oj. Naupl. = ojo naupliar; Ro. = rostrum; Labr. = labrum; Mand. = mandíbula. Segunda antena izquierda removida.

Destacan dos proyecciones caudales dentiformes y yuxtapuestas, próximas a las articulaciones de las uñas terminales (cercópodos). En la superficie medio-dorsal del telson se observa un tubérculo caudal portador de dos setas filamentosas. Los cercópodos tienen aproximadamente la misma longitud del telson y portan en su borde medio-dorsal una serie de setas largas; los extremos distales son finamente denticulados en sus bordes cóncavos. El límite entre la dentición mencionada y la hilera de setas está caracterizada por la presencia de una espina pequeña (comp. Fig. 7b).

Huevos esféricos con diámetro de 0,17 hasta 0,2 mm, superficie con estructura alveolar característica (comp. Fig. 10 y Roessler, 1989, a, c).

Descripción del macho (Parátipo No. ICN-CR-417-88).

Machos, generalmente más pequeños que las hembras. Forma general del caparazón ovalada. La curvatura dorsal en la parte anterior es menos pronunciada que en la hembra. La altura máxima está a nivel de dos quintas partes de la longitud total en la parte anterior de las valvas. Las valvas presentan siete líneas de crecimiento, siendo la última franja muy estrecha (comp. Figs. 1; 2b). El macho se encuentra en la etapa ontogenética S-11, la decimo-primer etapa con una valva que encierra el cuerpo.

Las dimensiones de las valvas de este espécimen son: Longitud: 5,07 mm, altura: 2,96 mm, relación longitudinal/altura: 1,71.

Las dimensiones de las conchas en las etapas anteriores (S-5 hasta S-10) deducidas de las franjas de crecimiento son las siguientes: Longitudes: 2,57; 3,12; 3,66; 4,13; 4,84; 5,02. Alturas: 1,64; 1,96; 2,26; 2,56; 2,78; 2,92. Relación longitudes/alturas: 1,5; 1,5; 1,6; 1,6; 1,7; 1,7; 1,7.

La cabeza del macho, en comparación con la de la hembra, se caracteriza por el tamaño relativo mayor de los ojos compuestos y del ojo nauplio como también del "órgano frontal". Destaca en especial el rostro muy protuberante, alargado y puntiagudo (comp. Fig. 4). La primera antena es mucho más larga que la de la hembra y alcanza, con la punta, el quinto segmento de los ramos de la segunda antena. Se aprecia una segmentación en la región distal (comp. Fig. 4).

La segunda antena es birrámea y presenta una estructura similar a la descrita para la hembra. Mientras el exopodito cuenta con nueve segmentos, el endopodito no presenta sino ocho en esta fase del desarrollo ontogénico.

El macho de referencia cuenta con diecisiete segmentos y diecisiete pares de extremidades post-maxilares de las cuales los primeros dos son dife-

renciados como extremidades prehensiles con las características del género (comp. Figs. 1; 6).

El telson del macho es romboide y similar al de la hembra (comp. Fig. 7a). A diferencia de la hembra destaca una fuerte curvatura cóncava en el borde ventral. La proyección espinosa del telson en posición dorso-caudal, recta en la hembra, es más grande y curvada en el macho. El número de espinas de las crestas dorsolaterales aumenta ligeramente en comparación con la hembra. En el ejemplar de referencia se observan catorce espinas en el lado izquierdo y quince en el lado opuesto.

Los especímenes se capturaron durante los años de 1987 y 1988 en los Departamentos del Tolima y del Huila en charcos y lagunas temporales. Las capturas se realizaron mediante los métodos clá-

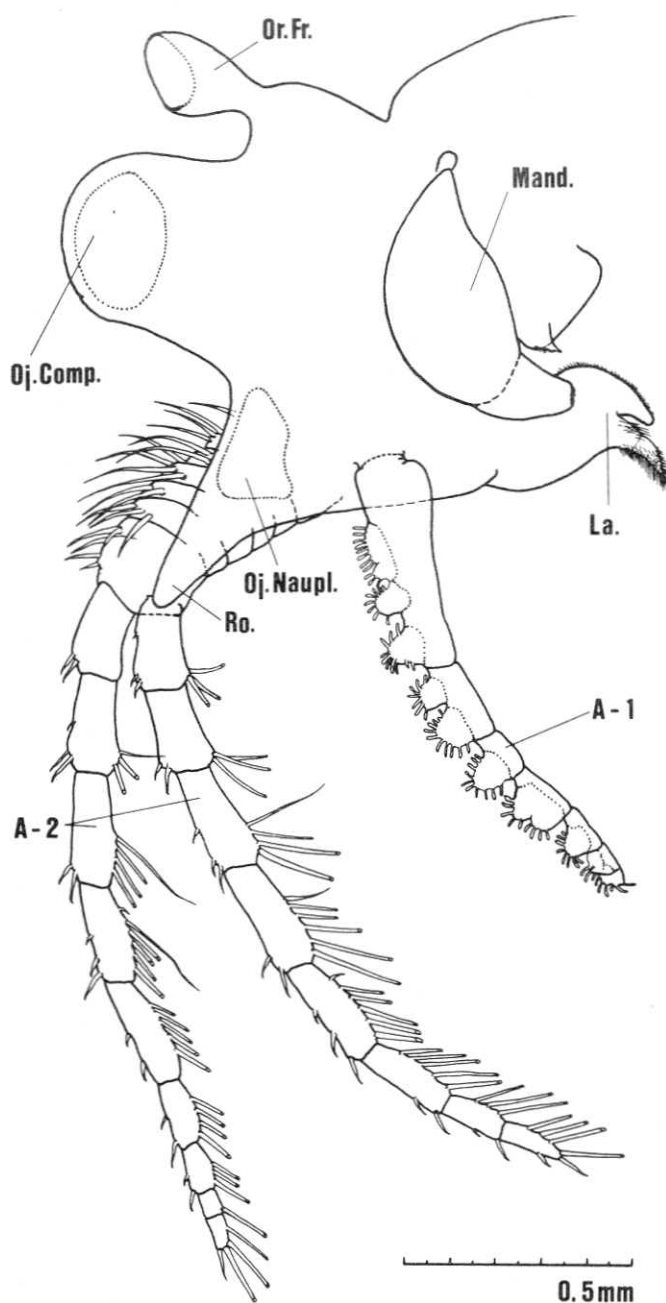


Figura 4. *Eulimnadia magdalenensis*; ♂ parátipo (No. ICN-CR-417-88). Vista lateral de la cabeza con primeras y segundas antenas. Segunda antena izquierda removida. Abreviaturas como en figura 3.



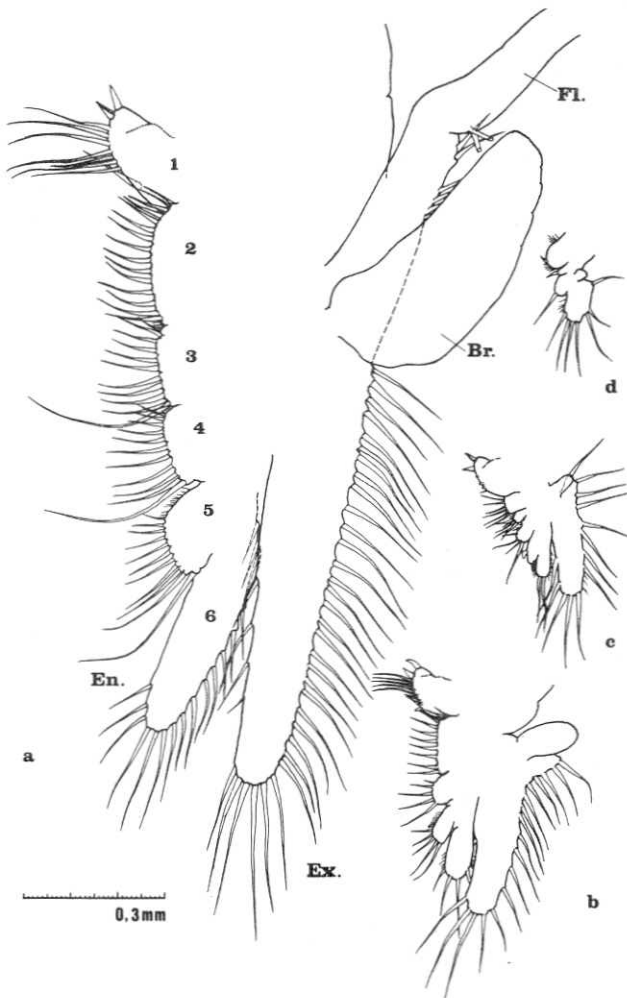


Figura 5. *Eulimnadia magdalenensis*; ♀, holótipo. Vista frontal del décimo (a), décimo sexto (b) y décimo séptimo (c) apéndice post-maxilar del lado izquierdo. Parátipo; décimo octavo apéndice post-maxilar del lado derecho (d). De las dos filas de setas o cerdas del borde medial se presenta solamente la fila anterior. En. = endopódito; Ex. = exopódito; 1 = endito 1 (=proceso maxilar); 2-6 = enditos 2-6, (denominaciones según Kuekenenthal-Krumbach, 1926/27); Fl. = flagellum.

sicos de la limnología. El material se conservó generalmente en alcohol al 80 o al 95%.

#### SISTEMATICA\*

Phylum: Arthropoda  
 Sub-Phylum: Crustácea  
 Orden: Diplostraca  
 Suborden: Conchostraca  
 Familia: Limnadiidae Sars, 1896.  
 Género: *Eulimnadia* Packard, 1874.

#### Material de referencia

El siguiente material de referencia se encuentra depositado en el Instituto de Ciencias Naturales — Museo de Historia Natural — Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.E., Colombia, (ICN).

\* Según Barnes, 1984 y Mattox, 1959.



Figura 6. *Eulimnadia magdalenensis* ♂ parátipo (No. ICN-CR-417-88). Vista frontal del primer (a), segundo (b) apéndice prehensil del lado izquierdo. Abreviaturas como en figura 5. (La configuración tridimensional de la extremidad aparece distorsionada en el plano bidimensional de la gráfica).

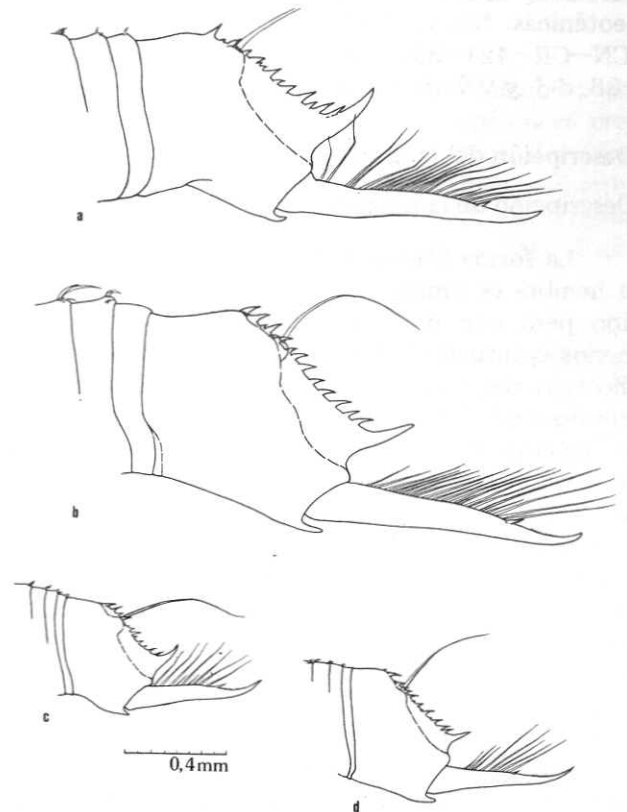


Figura 7. *Eulimnadia magdalenensis*; Vista lateral del telson con ceratopodos. Holótipo, ♀, (b); parátipo ♂ (No. ICN-CR-417-88) (a). Material neoténico: ♀ (No. ICN-CR-414-88) (d); ♂ (No. ICN-CR-415-88) (c).

**Holótipo**, ♀, sexualmente madura, No. ICN—CR—416—88, con siete líneas de crecimiento, diseccionado y conservado en alcohol.

**Parátipo**, ♂, sexualmente maduro, No. ICN—CR—417—88, con siete líneas de crecimiento, diseccionado y conservado en alcohol.

**Parátipos**, ♀♀ y ♂♂ de diferente edad, sexualmente maduros, conservados en alcohol, No. ICN—CR—418—88.

COLOMBIA. Departamento del Tolima, Charcos y lagunas temporales a lo largo de la carretera Natagaima — Neiva 300 — 500 m.

Material complementario, ♀ con características neoténicas, No. ICN—CR—414—88, diseccionado y conservado en alcohol.

Material complementario, ♂ con características neoténicas, No. ICN—CR—415—88, diseccionado y conservado en alcohol.

Material complementario, No. ICN—CR—419—88, muestra de una población con caracteres neoténicos, procedente del Departamento del Tolima ♂♂ y ♀♀ en diferente estado del desarrollo ontogenético, conservados en alcohol.

Material complementario, parte de una muestra de una generación posterior de la población representada en las muestras parciales Nos. ICN—CR—419; 414 y 415—87 pero sin características neoténicas: No. ICN—CR—420—88, ♀ madura; No. ICN—CR—421—88, o maduro, No. ICN—CR—422—88, ♂♂ y ♀♀ de diferente edad.

### Descripción del material neoténico

Descripción de la hembra (No. ICN—CR—414—88).

La forma general del caparazón bivalvo de esta hembra es similar a aquella descrita para el holotipo pero con una curvatura del contorno dorsal menos acentuada (comp. Fig. 9a). La valva es mucho más pequeña y las franjas de crecimiento son relativamente estrechas, en especial la franja externa. La etapa del desarrollo ontogenético corresponde al estadio S—8, la octava etapa con una valva que encierra el cuerpo. El espécimen se encuentra en su duodécima etapa después de la eclosión (comp. Roessler, 1988 b). Los 32 huevos que se encuentran en la "cámara de incubación" representan la tercera postura de este individuo. La primera postura en la población de referencia se observa en la etapa S—6.

Las dimensiones de las valvas de este espécimen son las siguientes: Longitud: 3,18 mm, altura: 2,01 mm, relación longitud/altura: 1,58.

Las dimensiones de las conchas de las etapas anteriores (S—4 hasta S—7) deducidas de las fran-

jas de crecimiento, son las siguientes (en mm): Longitudes: 2,08; 2,45; 2,84; 3,12. Alturas: 1,35; 1,59; 1,95. Relación longitudes/alturas: 1,5; 1,5; 1,6; 1,6.

La cabeza de la hembra muestra los caracteres morfológicos que corresponden a esta etapa. Destacan el rostro corto y redondeado, el "órgano frontal" de un tamaño relativo grande y en vista lateral de forma ovalada con una base cilíndrica ancha y corta. Las segundas antenas cuentan con siete segmentos y un número reducido de setas (comp. Fig. 8a).

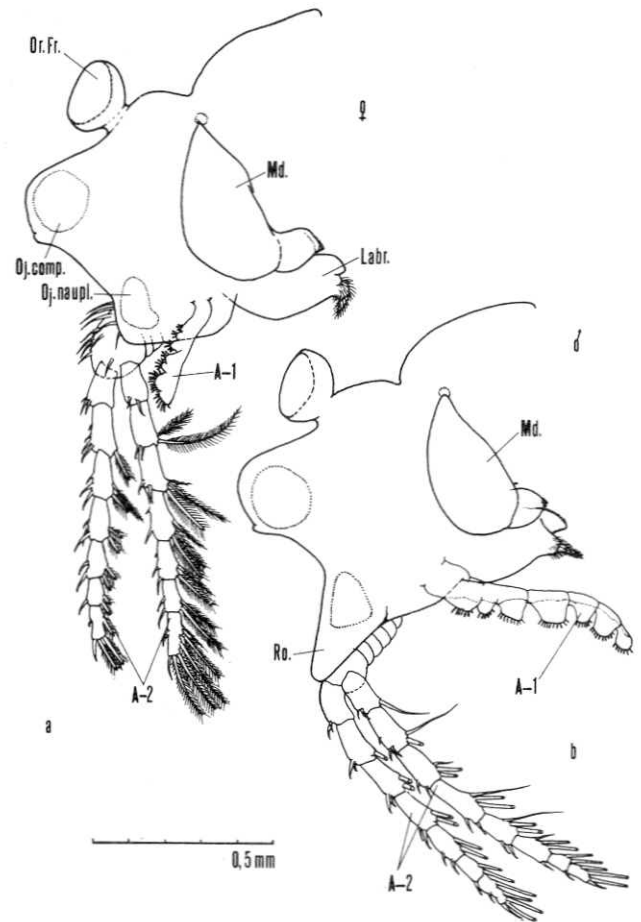


Figura 8. *Eulimnadia magdalenensis*, material con caracteres neoténicos. Vista lateral de la cabeza con primeras y segundas antenas. Abreviaciones como en figura 3. ♀, (No. ICN—CR—414—88) (a); ♂, (No. ICN—CR—415—88) (b). Segunda antena removida.

Las diferencias morfológicas de las extremidades post-maxilares en comparación con el holotipo no son muy notorias (comp. Fig. 9c). El número absoluto es de 16 pares en comparación con las 17/18 extremidades del holotipo. Sus tamaños absolutos y su dotación de setas y cerdas son inferiores; se observan relaciones morfométricas algo diferentes, distintivos que corresponden más bien a una extremidad posterior (= menos desarrollada) del holotipo. Estas características corresponden a etapas sexualmente inmaduras (larvales), si se toma



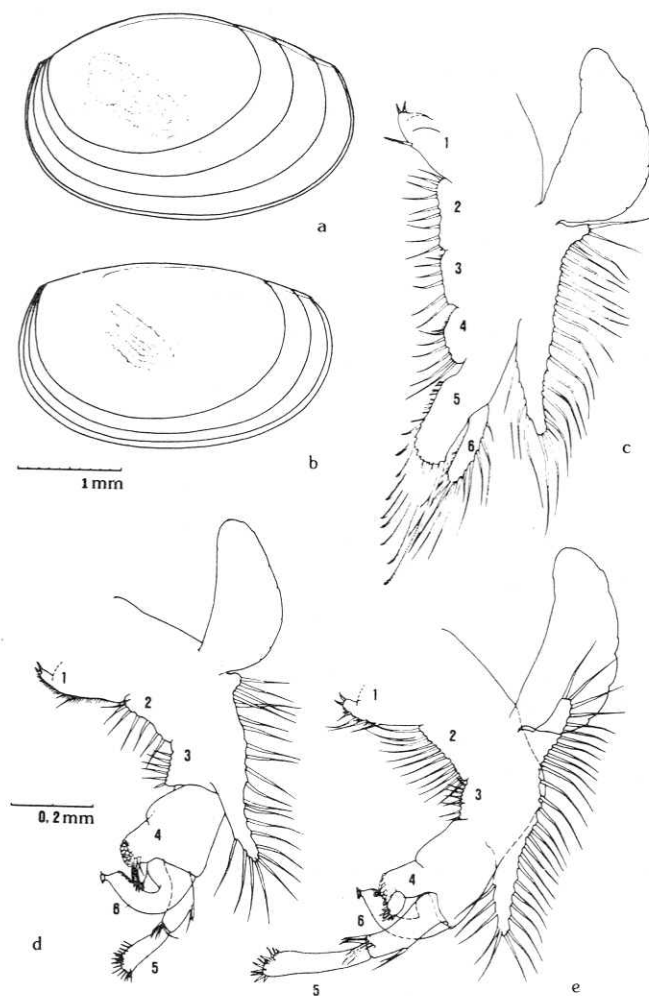


Figura 9. *Eulimnadia magdalenensis*, material con caracteres neoténicos. Vista lateral del caparazón; ♀ (a), (No. ICN-CR-414-88); ♂ (b), (No. ICN-CR-415-88). Vista frontal del primer apéndice postmaxilar izquierdo, o (c), (No. ICN-CR-414-88). Vista frontal del primer (d) y segundo (e) apéndice prehensil, (extremidad del lado izquierdo (d); del lado derecho (e)), o, (No. ICN-CR-415-88). Abreviaciones como en figura 5.

como referencia la población de la cual se seleccionó el holótipo. En esta población la maduración sexual y con ella la primera oviposición, se observa a más temprano con la etapa S-8 a S-9. (El holótipo se encuentra en la etapa S-12).

El telson es muy similar a aquel descrito para el holótipo con la diferencia de un menor tamaño acompañado por un número reducido de espinas de las crestas dorsolaterales y una cantidad inferior de setas sobre la superficie interna de los cercópodos (comp. Fig. 7d).

Descripción del macho (No. ICN-CR-415-88).

El caparazón del macho es de forma similar que aquel descrito para el parátipo (No. ICN-CR-

417-88)\*. Aunque el macho no tiene sino cuatro líneas de crecimiento, se encuentra en la misma etapa del desarrollo como la hembra anteriormente descrita (S-8); la lámina externa del caparazón correspondiente a la franja de crecimiento interna (S-4), se ha perdido en este caso (comp. Fig. 9b). También en esta etapa del desarrollo ontogenético, se aprecia cierta diferencia entre el tamaño de los sexos, aunque las diferencias no son tan notables como en etapas posteriores. Es aparente que estas diferencias se manifiestan ante todo en el momento de la maduración sexual (comp. Roessler, 1988b).

Las dimensiones de las valvas de este espécimen son las siguientes: Longitud: 3,00 mm, altura: 1,85 mm, relación longitud/altura: 1,7.

Las dimensiones de las valvas correspondientes a las etapas anteriores (S-5 hasta S-7) deducidas a partir de las franjas de crecimiento, son las siguientes (en mm): longitudes: 2,41; 2,73; 2,94; 3,04. Alturas: 1,51; 1,66; 1,74; 1,80. Relación longitudes/alturas: 1,6; 1,6; 1,7; 1,7.

La cabeza del macho presenta la morfología correspondiente a esta etapa del desarrollo y tiene las mismas características generales arriba descritas para la hembra. Destacan en el macho el rostro prolongado de forma cónica, pero menos puntiagudo que en el parátipo (No. ICN-CR-417-88), y las primeras antenas prolongadas y con cuatro segmentos terminales (comp. Fig. 8). El ramo externo de las segundas antenas presenta siete segmentos claramente separados, mientras el ramo interno cuenta con ocho.

Los primeros dos pares de extremidades postmaxilares son diferenciados como apéndices prehensiles y son muy similares a aquellos, descritos para el parátipo, a diferencia de un menor desarrollo respecto a su tamaño absoluto y una inferior dotación de setas y cerdas (comp. Figs. 6a,b; 9 d, e).

El telson de este macho es muy parecido a aquel descrito para el parátipo, con la diferencia de su menor tamaño y un número inferior de espinas de las crestas dorsolaterales y de las setas sobre la superficie interna de los cercópodos (comp. Fig. 7c).

## Discusión

Los especímenes anteriormente descritos como representantes "típicos" de *Eulimnadia magdalenensis* n. sp., pertenecen a una población "típica" y procedentes de una localidad considerada "típica" se encuentran en determinado estado de su desarrollo ontogenético. Las condiciones del "hábitat típico", un charco de mediana duración con temperaturas máximas de 35°C son responsables de que se presente la madurez sexual a más temprano con la etapa S-8 o S-9, la octava o novena etapa con una valva, que encierra todo el cuerpo.

\* En algunas generaciones posteriores de la misma población de la cual se seleccionó el presente espécimen se observaron individuos de ambos sexos de mayor tamaño. Los machos de estas generaciones presentan una notable curvatura cóncava en la parte posterior del contorno dorsal (comp. Fig. 1).

Los especímenes del material complementario pertenecen a una población de un charco de condiciones extremas, con temperaturas elevadas hasta de 43°C y de una duración que frecuentemente no permite el desarrollo completo de las poblaciones hasta la madurez sexual. En estas condiciones se observa la aceleración del desarrollo de las gónadas y los individuos entran en la madurez sexual con la etapa S-6. La velocidad del desarrollo incide en forma diferencial en la organogénesis. El sistema reproductor con las características sexuales primarias y secundarias se desarrolla de manera "prematura" y el ritmo de las mudas es algo acelerado. Los individuos resultan ser algo más pequeños pero la morfogénesis de los demás caracteres sigue aparentemente el mismo patrón observable en poblaciones de charcos más grandes y duraderos con temperaturas más bajas y poblaciones menos densas. El resultado de este desarrollo diferencial son individuos con características morfológicas de las etapas larvianas correspondientes, pero sexualmente maduros. Este fenómeno se conoce como neotenia (comp. Roessler, 1988 b).

El desarrollo de las poblaciones bajo condiciones naturales en la mayoría de los casos es muy uniforme respecto a la composición por edades (Roessler, 1988b). Se obtienen de esta forma muestras de poblaciones en determinado estado de su desarrollo y con características morfológicas particulares, que en alto grado dependen de las condiciones específicas ambientales. Si no se tiene en cuenta el alto grado de variabilidad posible, como se muestra con el material de referencia, es fácil describir los especímenes procedentes de distintas poblaciones como especies diferentes. Solamente a través de un seguimiento del desarrollo bajo diferentes condiciones ambientales, es posible asegurar la identidad de los especímenes de un muestreo, por lo menos con los métodos clásicos de la taxonomía.

Es de anotar, que esta forma al igual que la mayoría de las especies del género, tiene una longitud fisiológica muy por encima de la longitud ecológica que efectivamente se presenta bajo condiciones naturales (Roessler, 1988 b). El desarrollo ontogenético se caracteriza por una secuencia de mudas que se presentan durante toda la vida. Es de suma importancia mencionar que la morfogénesis continuada no solamente implica un aumento en el tamaño durante toda la vida, sino también cambios morfológicos con respecto p. ej. a relaciones morfométricas, número de extremidades y número, tamaño y demás caracteres de los diferentes tipos de setas, cerdas y espinas como adicionalmente un aumento en el número y la forma de los segmentos de las extremidades articulares en especial de las segundas antenas.

El aspecto morfológico de las valvas depende en alto grado de la edad de los especímenes por un lado y de las dimensiones de las franjas de crecimiento por el otro. En el laboratorio se ha cultivado esta especie hasta la etapa S-29 y se comprobó

que la extensión de estas franjas está estrechamente relacionada con determinados parámetros ambientales (comp. Roessler, 1988 b). Generalmente se observó por ejemplo, que franjas estrechas causan una mayor curvatura negativa del contorno frontal dorsal, lo que en última instancia significa una gran variabilidad de esta característica con base en condiciones ambientales.

La variabilidad de la forma general del caparazón es considerable. Mientras en la población de la cual fue seleccionado el holotipo, como en la mayoría de las poblaciones examinadas del Huila la curvatura dorsal del caparazón en su parte posterior es convexa, se observa en algunas poblaciones procedentes del Departamento del Tolima una curvatura negativa tanto en hembras como en los machos, aunque mucho más pronunciada en estos últimos (comp. Fig. 1).

*Eulimnadia brasiliensis* Sars, 1902 y *Eulimnadia magdalenensis* Roessler, 1988 comparten la forma general de la cabeza con el rostro puntiagudo en la hembra y cónica y muy prolongada en el macho. Los apéndices foliáceos en ambos casos son muy similares. La relación de longitudes entre el telson y los cercópodos es aproximadamente de 1: 1 en las dos especies. Diferencias significativas entre las dos formas se encuentran entre los tamaños relativos de las mandíbulas y sus puntos dorsolaterales de articulación y en la curvatura ventral de los cercópodos (convexa en *E. brasiliensis* y suavemente cóncava en forma de "S" en el *E. magdalenensis*; fuera de una serie de diferencias menores en la dotación de setas y cerdas, y en las relaciones morfométricas de los apéndices. (Es de mencionar, que las gráficas de esta especie reproducidas por Daday de Dees (1926); Fig. 142; p. 59) a partir del trabajo de Sars (1902) no corresponden con las figuras publicadas por este último).

El caparazón bivalvo en *E. brasiliensis* presenta una curvatura dorsal más acentuada que en el caso de *E. magdalenensis*; la relación longitud/altura en la hembra es diferente, mientras en el macho es de similar magnitud. Es muy posible sin embargo, que estas relaciones dependen de la edad y de las condiciones ambientales específicas, entre otros y no constituyen un rasgo diferencial entre las dos formas, dada la gran variabilidad observada en *E. magdalenensis* (comp. Roessler, 1988 a).

Se ha descrito un gran número de especies de este género, con base en rasgos morfológicos que carecen en muchos casos de significancia taxonómica y que podrían constituir diferentes expresiones morfológicas a partir de determinadas condiciones ambientales. Considero, que en una futura revisión de este género deberá suprimirse una serie de morfoespecies artificiales como lo indica también Margaleff (1961).

En Colombia se han encontrado hasta la fecha aparte de la forma aquí descrita, dos especies adi-

cionales de *Eulimnadia* que serán descritas en otros trabajos de esta serie. Es importante anotar, que las tres especies, aparte de diferencias morfológicas corporales en general, poseen huevos con forma general y superficies externas de estructura morfológica muy característica y significativamente diferente (comp. Fig. 10).

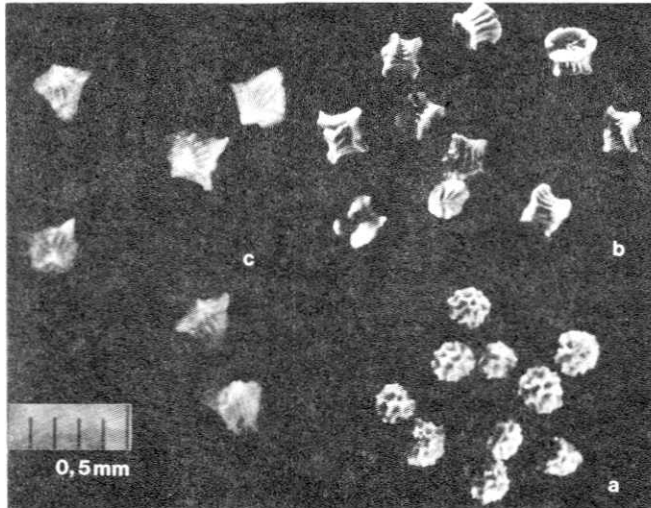


Figura 10. Microfotografía de huevos de tres especies colombianas de *Eulimnadia magdalenensis* (a), obsérvese la forma esférica y la estructura alveolar de la superficie de las envolturas, característica para esta especie. *Eulimnadia* n. spec. 1 (b), huevos cilíndricos con superficies surcadas. *Eulimnadia* n. spec. 2 (c), huevos piramidales o poligonales con superficies surcadas.

Esta característica constituye una valiosa base adicional para la diferenciación de las especies del género. El método tiene adicionalmente la ventaja

de ser fácilmente aplicable en el campo. Para la determinación basta una lupa de mediano poder de aumento. El relieve de la superficie de los huevos muestra también en otros grupos de crustáceos como los ostrácodos, diferencias específicas muy claras, tanto a nivel de especie como a nivel genérico, como pude comprobar durante mis estudios sobre los ostrácodos de agua dulce en Colombia.

#### BIBLIOGRAFIA

- BARNES, R.D., 1985. Zoología de los Invertebrados. México.
- DADAY DE DEES, E. 1926. Monographie Systematique des Phyllo-podes Conchostraces. Ann. Sci. Nat. Zool., Ser. 10, 9: 1-81.
- KUEKENTHAL, W. & KRUMBACH, T. 1926/27. Handbuch der Zoologie. III. De Gruyter, Berlin.
- MATTOX, N.T., 1959. Conchostraca. In: Fresh-Water Biology, W.T. Edmondson, Editor. New York.
- MARGALEFF, R. 1961. La vida en los Charcos de Agua Dulce de Nueva Esparta (Venezuela). Mem. Soc. Cienc. Nat. La salle (Caracas). Vol. 21 (59): 75-110.
- ROESSLER, E.W. et al. 1986. Estudios sobre los "Entomostráceos" de Colombia - I. Contribuciones al Conocimiento de la Historia Natural de *Cyclestheria hislopi* (Baird, 1859), (Arthropoda, Crustácea, Conchostraca), con énfasis en aspectos bioecológicos y del ciclo vital. *Caldasia*, 14 (68-70): 679-707.
- 1989a. Estudios sobre los "Entomostráceos" de Colombia - III. Estudio Taxonómico de una Nueva Especie Colombiana del Género *Eulimnadia*, *Eulimnadia colombiensis* n. sp. (Arthropoda, Crustácea, Conchostraca), *Caldasia* (en prensa)
- SARS, G.O. 1902. On a New South American Phyllopod, *Eulimnadia brasiliensis*, G.O. Sars, raised from Dried Mud. Arch. f. Mathem. & Naturv., B. XXIV. Nr. 6: 259-268.

ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES  
ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE EL AÑO ACADEMICO 1988 - 1989

**III Conferencia de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo**

Sin lugar a dudas, la principal actividad de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, durante el año académico 1988-1989, fue la preparación de la III Conferencia de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, que debía realizarse en Bogotá, entre el 16 y el 20 de octubre de 1989. Dentro de la preparación de este evento, el Sr. Presidente de la Academia viajó a Trieste en Septiembre de 1988 y volvió en marzo de 1989, cuando participó también en la reunión del Comité Ejecutivo de la Red de Organizaciones Científicas del Tercer Mundo.

Para organizar la III Conferencia, que fue iniciativa del Sr. Presidente de la República Dr. Virgilio Barco, el Gobierno Nacional adjudicó 50 millones de pesos, que exigieron a la Academia hacer todos los trámites para su adjudicación y para que se hagan efectivos, así como todos los trámites organizativos para la Conferencia, que incluyeron organización de la seguridad de los participantes, otorgamiento de las visas, etc. La organización de la conferencia implicó para la Academia un esfuerzo para mejorar su capacidad de comunicación internacional, para lo cual compró un aparato de Telefacsimil y logró la instalación del Discado Directo Internacional. Igualmente, y dentro del mismo esfuerzo, se estrecharon las relaciones con la oficina de protocolo de la Cancillería Nacional y se vinculó la Academia a la realización de Expociencia.

**“Estado y problemas de la ciencia en América Latina”**

Entre el 30 de enero y el 3 de febrero de 1989, con la organización de la Academia Colombiana de Ciencias, del Centro Internacional de Física y de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, se reunieron en Bogotá Presidentes de Academias de ciencias y directivos de Consejos de Ciencia y Tecnología de una veintena de países de la América Latina y el Caribe, así como miembros de número de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo y representantes de la Organización de Estados Americanos, del Banco Interamericano de Desarrollo, de la UNESCO y de la Junta del Acuerdo de Cartagena, con el objeto de hacer un balance sobre el estado de la ciencia y sus problemas en América Latina. Un comité editorial presidido por el académico de número José Luis Villaveces está preparando un libro con las memorias de esta reunión, que se constituirá en la ponencia que presentará la América Latina a la III Academia de Ciencias del Tercer Mundo.

**Reunión de Coordinadores de Simposios**

El 13 de junio de 1989, la Academia organizó en Bogotá una reunión de los coordinadores de los Simposios que se desarrollarían durante la III Conferencia de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo. Nueve Coordinadores de otros tantos países ultimaron los detalles organizativos de los Simposios.

**Sesiones de la Academia**

La academia realizó durante el año académico las siguientes sesiones:

**Junta Directiva:** 14, los días agosto 31, octubre 6, noviembre 2, noviembre 28 de 1988; febrero 8, febrero 15, marzo 10., marzo 29, abril 5, junio 10., junio 7, julio 5, julio 17, agosto 2 de 1989.

**Sesiones Ordinarias:** 10, los días septiembre 21, octubre 19, noviembre 16 de 1988; febrero 15, marzo 15, abril 19, mayo 3, mayo 24, junio 21, julio 26 de 1989.

**Sesión Especial,** una el 19 de julio de 1989, para dar posesión al académico correspondiente Víctor Albis.

**Sesiones Solemnes:** 4, el 12 de octubre, para dar posesión al Académico Correspondiente Antonio Cleef, el 30 de noviembre para hacer entrega de los premios de la Academia Colombiana de Ciencias y de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, el 29 de marzo de 1989 en memoria del Académico de Número Guillermo Muñoz Rivas y el 17 de mayo de 1989 para dar posesión al Académico de Número Hernando Dueñas.

**Conferencias Académicas:**

Siguiendo con su política de realizar Conferencias académicas sobre distintos temas, la Academia organizó once de ellas durante el año académico en cuestión, discriminadas así:

“Cardinales Relativos”. Carlo Federici, septiembre 21 de 1988.

“Análisis fitogeográfico de la flora paramuna del macizo Tatamá”, Antoine Cleef, octubre 12 de 1988.

“Revisión sistemática de las especies del género Dictyota (Phaeophyceae) del Atlántico norte”, Reinhard Schnetter, octubre 19 de 1988.

“Nuevos materiales superconductores y sus aplicaciones” Eduardo Posada, noviembre 16 de 1988.

- “El fraude en ciencias”. Presentación crítica de casos”, M. Wasserman, febrero 15 de 1989.
- “Un manuscrito científico del siglo XVIII”, Santiago Díaz-Piedrahíta, marzo 15 de 1989.
- “Deterioro ambiental y desecación de la Sabana de Bogotá en los últimos 50 años”, Alvaro Torres Barreto, abril 19 de 1989.
- “Los dinoflagelados: una nueva herramienta para el control bioestratigráfico de sedimentos del Cretáceo medio y tardío”. Hernando Dueñas. 17 de Mayo de 1989.
- “Fusión fría” Eduardo Posada, José Luis Villaveces. Mayo 24 de 1989.
- “La arqueología de Aguazuque” Gonzalo Correal. Junio 21 de 1989.
- “Análogos en polinomios de algunas conjeturas de la Teoría de los números” Víctor Albis, Julio 19 de 1989.

#### Seminario sobre “Los Caminos hacia la Matemización en las Ciencias Naturales”

Entre el 9 y el 11 de febrero, la Academia organizó un Seminario con el objeto de debatir sobre el tema “Los Caminos hacia la Matemización en las Ciencias Naturales”. Varios especialistas presentaron conferencias, luego de las cuales se desarrollaron intensos debates. Los conferencistas fueron los profesores: Víctor Albis, Guillermo Páramo, Ramón Fayad, Alicia de Mesa, Carlos Vasco y José Luis Villaveces. Las memorias del Seminario están en proceso de publicación.

#### Publicaciones

Como estaba programado, dos números de la Revista salieron durante este año: El No. 63 en septiembre de 1988, y el Número 64 en febrero de 1989, también salió el libro “Memorias del Seminario en conmemoración del centenario de Erwin Schrödinger” en enero de 1989, con un tiraje de 1.000 ejemplares.

#### Asesorías y conceptos

**Saguinus Oedipus.** Fue consultada la Academia sobre la posible repatriación del mono colombiano *Saguinus oedipus oedipus* propuesta por el Dr. Epstein de Oxford, quien tiene una gran colonia en cautiverio. La Academia sugirió hacerlo a la estación “El Coloso” del Inderena en el Sinú.

**Volcán Galeras.** La Academia solicitó a los geólogos académicos un concepto sobre los peligros de la reactivación del volcán Galeras en Pasto, además organizó una reunión con representantes de los más importantes institutos y universidades del país que se ocupan de geología, sismología y vulcanología, para favorecer el intercambio entre ellos y para informar a la comunidad académica sobre los riesgos del volcán.

**Perímetro Urbano en la Ciudad de Bogotá.** Una comisión conformada por los académicos Al-

varo Torres Barreto, Julio Carrizosa Umaña, Josue Quintero y Alvaro González Fletcher ha estado asesorando a la oficina de planeación distrital en asuntos relativos a posibles modificaciones en el perímetro urbano de la ciudad de Bogotá en los márgenes del río homónimo.

**Parque Nacional “Los Farallones de Cali”.** La Academia conceptuó frente a una solicitud de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca sobre un posible realinderamiento del Parque Nacional “Los Farallones de Cali”.

#### Relaciones Internacionales

Además de la intensa actividad desplegada en la organización de la III Conferencia de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, la Academia Colombiana de Ciencias intensificó durante este año en otros sentidos sus relaciones internacionales. Es así como el Sr. Presidente de la Academia viajó a Pekín en septiembre de 1988 para participar en la Reunión general del Consejo Internacional de Uniones Científicas, resultando elegido miembro del Comité Directivo de la ICSU. Esto es un gran honor para la ciencia colombiana y de mucha importancia para la Academia en sus relaciones internacionales.

El Sr. Presidente de la Academia estuvo en Madrid en marzo de 1989, donde se reunió con la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid, fortificando los vínculos entre ella y nuestra academia, que es su filial, e iniciando los primeros contactos para la organización de actividades conjuntas con miras a la celebración del quinto centenario.

#### Status and role of women scientists in the third world.

Dos académicos participaron en la reunión que sobre este tema tuvo lugar en Trieste en octubre de 1988, organizada por la Academia de Ciencias del Tercer Mundo: Alicia Dussan de Reichel e Inés Bernal de Ramírez. La primera de ellas presidió las sesiones consagradas al papel de la mujer en ciencia en Latinoamérica y el Caribe.

#### Programa Internacional Biósfera-Geósfera

Este es un programa auspiciado por ICSU. La Academia participó en la organización de reunión satélite en Bogotá, coordinada por el Académico Julio Carrizosa Umaña. Recibimos visita del Director del Programa, Dr. Roosevelt, el 16 de marzo.

#### Cambio global en el mundo

El académico Julio Carrizosa U., participó como representante oficial de la Academia en la Reunión sobre Cambio Global en el Mundo que tuvo lugar en Bruselas del 13 al 15 de junio. El académico Carrizosa es coordinador del simposio-taller sobre este tema que tendrá lugar en Bogotá, en octu-

bre, inmediatamente después de la Conferencia de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, dirigido por el Dr. Ruswell, de Suecia.

### Tratado Antártico

La Academia asumió su asiento permanente en el Comité para el desarrollo del Tratado Antártico suscrito por Colombia.

### Federación Latinoamericana de Academias de Ciencias

La Academia Colombiana de Ciencias ha seguido con mucho interés el desarrollo de la constitución de la **Federación Latinoamericana de Academias de Ciencias**, iniciativa en cuya gestación participaron varios académicos colombianos. Nuestra Academia, dedicó una sesión especial a la discusión de la propuesta de estatutos, con miras a la fundación oficial de la Federación en octubre de 1989 durante la Tercera Conferencia de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo.

### Conferencia Mundial de Oceanografía en Suecia

El académico José Lozano viajó en representación de la Academia a una Conferencia Mundial de Oceanografía en Estocolmo en noviembre de 1988.

### Estimulo a la investigación

Dentro de sus programas de ayuda a la investigación, la Academia Colombiana de Ciencias apoyó la realización del Seminario Internacional sobre el efecto hidrofóbico realizado en Bogotá a finales de 1988.

Igualmente, dentro de estos programas, apoyó a varios académicos para que pudieran participar en reuniones internacionales de su especialidad, cuando fueron invitados a ellas.

### Premios

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales otorga dos premios al año: el Premio de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, que en 1988 fue otorgado en el campo de la Física y el premio de la Academia Colombiana de Ciencias, que en este se concedió en el campo de la biotecnología. Los ganadores fueron:

**Premio Academia de Ciencias del Tercer Mundo**  
Área: Física.

**Primer puesto:** compartido por **Mauricio Esguerra Bónitto**, "Estudio del mecanismo de conducción en muestras semiconductoras de Ln—Ba—Cu—O (Ln = Yy—La) cerámicos a la transición metal—no metal" y por **Angela María Guzmán**: "Generación de ultravioleta en sistemas atómicos bombeados por una transición de dos fotones".

**Mención Especial:** "Procesamiento óptico digital de texturas en fotografía aérea", Torres Lasprilla. "Estudio de superficies mediante espectroscopia de electrones Auger y espectroscopia de masas cuadrupolar".

**Premio Academia Colombiana de Ciencias.** Área: Biotecnología.

**Primer Premio:** "Clonaje de fragmentos de ADN de plasmodium falciparum y su posible uso en el diagnóstico de la malaria", Fernando Angel, Hernán Acosta, Ana Elizabeth López.

**Mención Especial:** Desierta.

Se convocaron los premios 89:

**Premio Academia de Ciencias del Tercer Mundo** en el área de la química.

**Jurados:** Inés Bernal de Ramírez, Sven Zethelius, Gerardo Pérez.

**Premio Academia Colombiana de Ciencias** en el área de la Etnología.

**Jurados:** Luis Duque Gómez, Gonzalo Correal, Guillermo Páramo.

### Premio Heineken

La Academia Colombiana de Ciencias presentó la candidatura del académico **Gabriel Toro** para el premio Heineken 1989 que concede la Real Academia Holandesa de Ciencias en el campo de la microbiología y la genética molecular.

### Año Nacional de la Ciencia y la Tecnología

La Academia Colombiana de Ciencias tuvo una activa figuración en la planeación y desarrollo de las actividades del Año de la Ciencia y la Tecnología. En primer lugar, a través de la organización de la III Conferencia de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, así como de la vinculación de esta entidad con los programas colombianos.

La Academia también participó activamente en las discusiones sobre el **Proyecto de Ley de Ciencia y Tecnología**. El Presidente de la Academia presentó una formulación alterna después de discutir sus principales apartes en el seno de la Academia. Presidente o Secretario representaron oficialmente a la Academia en discusiones con los parlamentarios ponentes en el seno de la cámara, en la comisión quinta del senado, en la casa del molino, en las asociaciones y en la Cámara de Comercio de Cali.

### Flora de Mutis

Gracias a una gestión directa del Sr. Presidente de la Academia ante el Instituto de Cultura Hispánica éste hizo traslado a la Biblioteca de la Academia de 5 volúmenes de la Flora de Mutis. En esta forma, sólo faltan 2 volúmenes y los que aún no han llegado al país.

**Pasantías Internacionales**

La Academia renovó el convenio con ICETEX para invitar a científicos del Tercer Mundo que deseen venir a trabajar a Colombia por períodos de unos tres a seis meses.

**Nómina de la Academia**

La nómina de la Academia se vio acrecentada durante el período reseñado por el nombramiento de nuevos académicos, así:

**Nuevos Académicos**

Un Académico de Número: **Hernando Dueñas**, Silla No. 19.

Un Académico Correspondiente: **Víctor Albis**, julio 19 de 1988.

Dos elegidos: **Humberto Rodríguez**, **Paulina Muñoz de Hoyos**.

Un Candidato Miembro de Número: **Alvaro Torres Barreto**. Candidatura aceptada para su estudio julio 26 de 1989. Debe decidirse en septiembre de 1989.

Seis Candidatos a Correspondientes: **Sven Erik Isaacson**. Candidaturas enviadas a estudio de la Comisión respectiva en las fechas señaladas, febrero **Oswaldo Goscinski**, marzo **Jorge Sahade**, mayo **Eduardo Lleras**, mayo **Luis Carlos Arboleda**, julio **Plutarco Cala**.

También y desafortunadamente, la Academia sufrió la pérdida de dos de sus miembros de número, los académicos **Kalman Mezey** y **Guillermo Muñoz Rivas**.

**JOSE LUIS VILLAVECES CARDOSO**

Secretario

Agosto 23 de 1989



**Palabras pronunciadas por el Dr. Luis Eduardo Mora Osejo, Presidente de la Academia,  
al instalar la sesión solemne estatutaria realizada el 23 de agosto de 1989**

Se reúne la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en sesión solemne, para celebrar un nuevo aniversario de su meritoria existencia.

Con tal motivo, resulta oportuno recordar que hace ya 56 años mediante la Ley No. 34 de 1933 el Congreso de la República reconoció su carácter de Cuerpo Consultivo del Gobierno, en lo que concierne a la organización y al fomento de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, y de su enseñanza en todos los niveles del sistema educativo. En esta misma Ley, bueno es recordarlo, el Congreso dispuso así mismo que el Gobierno Nacional proporcionara a la Academia una sede propia para sus reuniones y la organización de su Biblioteca, así como los recursos que permitiesen la dotación de sus gabinetes y laboratorios y, de acuerdo con las Gubernaciones, la instalación de los locales destinados a albergar los "Centros Correspondientes" o "Capítulos Regionales que la Academia decidiera establecer en las capitales departamentales o en otras ciudades".

No podemos así mismo olvidar que el haber obtenido del Congreso de la República la expedición de la Ley 34, de manera alguna fue tarea fácil sino el resultado de un largo proceso para cuya culminación exitosa fueron decisivas, las gestiones que adelantara el entonces Embajador de Colombia en Madrid, Dr. José Joaquín Casas, ante la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, con el fin de obtener que nuestra Academia tuviera la categoría de Correspondiente, llevara el mismo nombre y estuviera regida por estatutos similares a los de su homóloga española.

Desde entonces, preocupación fundamental de quienes han presidido la Academia y de todos y cada uno de sus Miembros, ha sido la de fortalecer los vínculos que ligan, desde su origen, a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid, de la cual nuestros Numerarios, en virtud de los Acuerdos de 1933, son Miembros Correspondientes.

De ahí también nuestro deseo unánime que en ocasión de la ya cercana celebración del V Centenario del Descubrimiento de América, las dos Academias de común acuerdo, celebren tan trascendental efemérides, desarrollando un programa conjunto que tenga por propósito central estrechar no solamente sus comunes vínculos, sino el acercamiento de las comunidades científicas de los dos países: ora fortaleciendo los intercambios de Investigadores, ora propiciando su participación en eventos científicos que tengan lugar en uno u otro país; ora,

en fin, ejecutando programas conjuntos de investigación u otras actividades que redunden en el beneficio mutuo de las dos naciones, unidas no solamente por el mismo idioma, sino por un patrimonio cultural común.

No en valde la celebración de este nuevo aniversario, coincide con la apertura de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales hacia el Mundo Científico exterior, y con la intensificación de sus relaciones con organismos internacionales de acuerdo con las exigencias de la hora presente, cuando del grado de desarrollo de la ciencia depende la independencia y soberanía de las naciones, y el incremento inusitado de los medios de comunicación permiten que la información sobre el avance del conocimiento científico, en las diferentes áreas, se expanda sin demora por todo el orbe al punto que no es exagerado afirmar que para cada campo especializado del conocimiento científico, existe una comunidad Internacional que impulsa su desarrollo y cuida permanentemente por la incorporación de nuevos investigadores y, sobre todo, de sus contribuciones al acervo común, así su trabajo científico se realice en las regiones más remotas del globo.

Conciente la Academia Colombiana de Ciencias de que mal podría nuestro país aislarse de este vasto movimiento, ha decidido asumir la tarea de intercomunicar nuestra comunidad científica con las organizaciones internacionales, promotoras de la ciencia en el ámbito mundial. Es así como ahora la Academia forma parte de la Red de Organizaciones Científicas de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo (TAS), y entre sus prospectos inmediatos, figura su incorporación paulatina a los Programas Internacionales de la UNESCO, del Consejo Internacional de las Uniones Científicas (ICSU) y de otras no menos importantes organizaciones Internacionales, cuyos Programas y Proyectos abarcan el planeta y se ejecutan merced al aporte entusiasta de las comunidades científicas de los diferentes países.

Dentro de esta misma línea de acción ha propiciado la participación de sus Miembros en Seminarios, Simposios, Congresos y otros certámenes internacionales, y conjuntamente con el ICETEX, en estos últimos años, ha podido consolidar el Programa de intercambio de Pasantías, entre los países del Tercer Mundo, particularmente de la América Latina y del Caribe. Este último programa tiene por propósito lograr que los científicos de nuestros países puedan utilizar, en la realización de sus trabajos, las instalaciones, equipos y bibliografía de

los Centros científicos de excelencia de la región y simultáneamente, establecer contactos con investigadores de la larga experiencia y brillante trayectoria, en el respectivo campo de investigación.

La celebración, en Bogotá, en el próximo mes de octubre, bajo los auspicios de la Academia Colombiana de Ciencias la Tercera Conferencia General de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, a la cual asistirán alrededor de 200 científicos de 60 países del globo y distinguidas personalidades del mundo de la Ciencia y la cultura, será el acontecimiento que subraye, como el que más, la voluntad de la Academia Colombiana de Ciencias de fortalecerse, abriendo sus puertas hacia el mundo exterior y en la medida que ello se cumpla, lograr una mejor posición para cumplir bajo las circunstancias de la hora presente, las tareas y propósitos que le fijaron sus fundadores, en lo que atañe al fortalecimiento de la ciencia en nuestro medio.

Quisiera así mismo, destacar que dentro del marco de esta política, la Academia a la par que ha

ampliado la nómina de Miembros nacionales ha nombrado nuevos Miembros Correspondientes Extranjeros. Así, en esta misma sesión, se formalizará el ingreso a la Corporación del eminente científico alemán, Profesor Dr. Hans Weber, Profesor Emérito de la Universidad Johannes Gutenberg de Mainz, República Federal de Alemania, como nuevo Miembro Correspondiente.

Sea la oportunidad, de presentar, en nombre de la Academia los debidos agradecimientos, al Sr. Embajador de la República Federal de Alemania, Dr. Jorge Jachim Schalaich, por haber aceptado nuestra invitación de concurrir a esta Reunión, honrarnos con su presencia y recibir el Diploma y el escudo insignia de la Academia que acreditará al Profesor Dr. Hans Weber como miembro correspondiente de nuestra Entidad; distinción que le fue conferida, en reconocimiento a sus insignes méritos y a la fecunda labor científica y didáctica desarrollada en nuestro país, en los campos de la Morfología Vegetal y la Fitogeografía.

## REFORMA ESTATUTARIA

Con el fin de contar con normas estatutarias acordes con la época y de dar mayor dinamismo a la Corporación se planteó una nueva reforma cuyo estudio se inició durante el período académico 1984—1986, tomando como base el proyecto elaborado por los académicos Luis Enrique Gaviria Salazar y Eduardo Caro Caycedo. Tras el análisis por parte de la Junta Directiva, el texto de la reforma fue puesto a consideración de pleno de la Academia el 12 de marzo de 1986. El primer debate se abrió en la sesión ordinaria del 9 de abril, continuándose la discusión en la sesión ordinaria celebrada el 14 de mayo. La versión final fue aprobada en primer debate el 30 de julio de 1986. El segundo debate, correspondiente al período académico 1986—1988 se realizó el 17 de septiembre de 1986, fecha en la cual se acogió el texto vigente.

En cumplimiento de las respectivas normas legales, este texto fue estudiado y aprobado por la Alcaldía Mayor del Distrito Especial de Bogotá, mediante Resolución 0165 de junio 24 de 1987. Los nuevos estatutos entraron en vigencia a partir del mes de julio de dicho año al ser publicada la Resolución en el Diario Oficial. El texto integral de las normas estatutarias acompañado de una reseña histórica de la Academia se publicó ese mismo año a manera de folleto. Para conocimiento de los lectores de la Revista se transcribe a continuación:

### ESTATUTOS DE LA ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

#### CAPITULO I

##### PERSONERIA

Artículo 1o. La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, es una entidad científica, sin ánimo de lucro, con personería jurídica y patrimonio propio. Tiene su domicilio en la ciudad de Bogotá, D.E. y es correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid.

Parágrafo. El Presidente de la República es patrono de la Academia.

#### CAPITULO II

##### FINALIDADES

Artículo 2o. La Academia tiene por objeto la investigación científica y su fomento en los campos de las ciencias exactas, físicas y naturales, a la vez que la cooperación en el mejoramiento de la docencia en estas ramas del conocimiento en los distintos niveles de la enseñanza.

Artículo 3o. La Academia propenderá al establecimiento de academias o centros regionales de investigación científica.

Artículo 4o. La Academia colaborará con las entidades respectivas en la adecuada conservación y defensa del patrimonio científico del país, en especial de los elementos ambientales y recursos naturales. Estas tareas las desarrollará la entidad mediante la vigilancia en el cumplimiento de las disposiciones legales vigentes sobre el particular, publicaciones, conferencias, cursos de extensión, concursos, simposios, congresos y de todas aquellas otras actividades que se juzgue necesario desarrollar o patrocinar para el cabal cumplimiento de estas finalidades científicas y culturales.

Artículo 5o. En virtud de lo dispuesto en el Artículo 1o. de la Ley 34 de 1933 y en el Decreto ejecutivo número 1218 de 1936, la Academia es cuerpo consultivo del gobierno; por lo tanto atenderá las consultas y solicitudes de carácter científico que le hagan los distintos órganos del poder público.

Artículo 6o. La Academia emitirá conceptos solamente cuando así lo determine la corporación. Podrá abstenerse de emitirlos cuando a su juicio no tengan carácter estrictamente científico, dentro de los ramos cuya investigación y divulgación correspondan a la Academia o cuando el estudio respectivo implique gastos de inversión que no sean sufragados por la entidad que hace la consulta o

por otras razones valederas en concepto de la corporación. En caso de negativa, la Academia no está obligada a explicar las razones de su decisión.

Artículo 7o. La Academia podrá crear y reglamentar los premios y distinciones que considere convenientes para el logro de sus fines.

#### CAPITULO III

##### PATRIMONIO

Artículo 8o. Es patrimonio de la Academia:

- 1o. La asignación que se le conceda en los presupuestos de la nación, los departamentos o los municipios.
- 2o. Las sumas u otros bienes provenientes de donaciones o fundaciones, que sean expresamente aceptados por la junta directiva.
- 3o. El producto de la venta de las publicaciones.
- 4o. Los ingresos o beneficios que reciba la entidad por cualquier concepto.
- 5o. Los bienes muebles o inmuebles que adquiera.
- 6o. La Biblioteca "Luis López de Mesa".

Parágrafo. En caso de liquidación, los fondos, bienes, muebles e inmuebles de la Corporación pasarán a ser propiedad de una entidad similar, escogida por la misma Academia en el momento de decidir su liquidación.

#### CAPITULO IV

##### EMBLEMAS Y DISTINTIVOS

Artículo 9o. La Academia tendrá como emblema un escudo de forma española, dividido en tres cuarteles: dos superiores y uno inferior. En el cuartel superior derecho aparecerá una *Mutisia grandiflora* en colores naturales sobre campo plateado; en el cuartel superior izquierdo, un globo terráqueo y un sextante, sobre campo plateado y verde; en el cuartel inferior, sobre campo dorado, dos libros, un tintero, una retorta, un microscopio y un compás. El escudo tendrá una orla en la cual figura el siguiente lema: "PEDES IN TERRA AD SIDERA VISUM"

Parágrafo. Este emblema podrá ser representado esquemáticamente.

Artículo 10. Para uso exclusivo de los académicos la corporación dispondrá de las siguientes medallas: Para los individuos de número, venera pendiente de un cordón verde y dorado que en su anverso llevará el escudo y en el reverso el nombre de la entidad, el número del sillón y el nombre del académico. Para los miembros correspondientes, el escudo pendiente de una barreta mediante una cinta blanca y roja. Existirán insignias y credenciales para uso de todos los académicos.

## CAPITULO V

### DEL PERSONAL DE LA ACADEMIA

Artículo 11. La Academia consta de cuarenta (40) individuos de número, que constituyen esencialmente la corporación. Estará formada además, por miembros honorarios, miembros exnumerarios y miembros correspondientes.

Artículo 12. Para ser candidato a académico numerario se requiere ser ciudadano colombiano, haber sido académico correspondiente durante un lapso no menor de un año, tener su residencia en Bogotá en el momento de la elección, haber demostrado interés por las labores de la corporación y cumplido a cabalidad con todos y cada uno de los deberes y obligaciones que se señalen para los miembros correspondientes y haber hecho en este período contribuciones científicas de significación.

Parágrafo I. En virtud de acuerdos celebrados, los Académicos de número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales son miembros correspondientes de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid.

Parágrafo II. La Academia podrá celebrar acuerdos similares con otras entidades extranjeras análogas.

Artículo 13. Cuando ocurra vacancia de académico de número, por muerte, por renuncia escrita aceptada, o por traslado a otra categoría, la Academia lo declarará así en la sesión ordinaria inmediata o en cualquiera de las siguientes. La vacancia por deceso no podrá ser llenada antes de tres meses, como homenaje al académico fallecido.

Artículo 14. La presentación de candidatos para académico de número deberá hacerse en cada caso por lo menos por cinco (5) miembros honorarios o de número, en sesión ordinaria de la corporación; a esta presentación se acompañará un resumen de la hoja de vida académica y un informe sobre su desempeño como correspondiente. En la siguiente sesión de la Corporación se hará la elección, en votación secreta, por los académicos honorarios y de número presentes en ella.

Artículo 15. Aquellos académicos numerarios que hayan dejado de asistir, sin razón justificada durante un período de tres (3) años a las cuatro quintas partes de las sesiones celebradas por la Academia, podrán ser trasladados, a juicio de la misma y por petición de la Junta Directiva a la categoría de exnumerarios; también podrán ser trasladados a esa categoría a petición propia, pero siempre a juicio de la Academia y con un quórum no menor de diez (10) miembros entre numerarios y honorarios.

Parágrafo. Los académicos exnumerarios conservarán todos los derechos de su categoría anterior, pero se producirá la vacancia del sillón correspondiente.

Artículo 16. Podrán ser declarados miembros honorarios de la Academia, ciudadanos colombianos o extranjeros de excepcionales méritos científicos y elevada jerarquía y los académicos de número que, por la excelencia de sus trabajos o por especiales circunstancias, merezcan ser exaltados a esta categoría.

Parágrafo I. Para la exaltación a la categoría de académico honorario se requiere la asistencia de un mínimo de doce (12) miembros entre numerarios y honorarios y que el candidato obtenga por lo menos las tres cuartas partes de los votos.

Parágrafo II. Los académicos numerarios que sean exaltados a la categoría de honorarios, conservan todos sus derechos.

Artículo 17. Para ser elegido miembro correspondiente es necesario haberse distinguido en el estudio e investigación en cualquiera de las ciencias naturales, de la física, de la química o de las mate-

máticas, a través de publicaciones o de la realización de trabajos de verdadero mérito científico.

Parágrafo. En virtud de convenios vigentes y por acuerdos de intercambio, podrá haber académicos correspondientes extranjeros. También podrán ser designados miembros correspondientes, científicos extranjeros de excepcionales méritos y que hayan demostrado interés en el país y en la Academia.

Artículo 18. La candidatura para miembro correspondiente deberá ser presentada por escrito, en sesión ordinaria, firmada por tres (3) académicos de número. Se acompañará el currículum vitae del candidato, el cual será estudiado por la comisión permanente de candidaturas.

Artículo 19. La presidencia designará en la primera sesión de cada período académico, una comisión permanente integrada por tres (3) miembros de número, la cual estará encargada de estudiar las calidades de los candidatos a miembro correspondiente y de rendir el informe a que se refiere el artículo anterior. Esta comisión podrá ser reelegida.

Artículo 20. La elección de miembros a la categoría de numerarios o correspondientes se hará por mayoría absoluta de votos, pero en ningún caso con menos de ocho (8) favorables.

Artículo 21. La condición de académico es renunciable.

## CAPITULO VI

### DE LAS OBLIGACIONES Y FUNCIONES DE LOS ACADEMICOS

Artículo 22. Es obligación de los miembros de número residentes en Bogotá, colaborar en las tareas de la Academia, asistir a las sesiones y cumplir las comisiones que se les asignen.

Artículo 23. La posesión de los académicos de número se efectuará en sesión pública y solemne, dentro de los seis (6) meses siguientes a su elección. Si este requisito no se cumpliere en el término fijado, el elegido, con razones plenamente justificadas, podrá solicitar una prórroga hasta por tres (3) meses. Si vencido este plazo, la posesión no se realizare, la Academia declarará la vacancia, con base en el informe que sobre el particular rinda la Secretaría de la Corporación. Durante la sesión de posesión el recipiendario pronunciará un discurso de fondo, inédito y preparado especialmente para la ocasión, parte del cual estará dedicado a hacer un comentario sobre los méritos científicos de sus predecesores en el sillón asignado. En este acto el presidente hará entrega del diploma de miembro de número y tomará el juramento de rigor; él o la persona a quien él delegare impondrá al recipiendario la medalla distintiva. Durante la posesión un miembro de número u honorario delegado por la presidencia dará respuesta al nuevo académico.

Artículo 24. Las funciones, derechos y obligaciones de los académicos de número empezarán a regir a partir de la fecha de su posesión.

Artículo 25. Los académicos correspondientes residentes en Bogotá tomarán posesión de sus cargos dentro de los seis (6) meses siguientes a su elección. En el momento de la posesión, el presidente tomará el juramento de rigor y le entregará el diploma respectivo; la persona a quien él designare, impondrá la insignia de la Academia. En este acto el recipiendario leerá un estudio científico preparado especialmente para la ocasión, cuyo texto escrito deberá ser entregado a la Secretaría quince (15) días hábiles antes de la posesión.

Parágrafo. Quienes no residan en Bogotá dispondrán para poseerse hasta de un (1) año a juicio de la Junta Directiva. Para los académicos extranjeros se estudiará cada caso por separado.

Artículo 26. Los académicos correspondientes deberán desempeñar las comisiones que se les asignen; quienes residan en Bogotá deberán asistir a las sesiones. El incumplimiento de estos requisitos y obligaciones puede producir la aplicación del Reglamento, previo concepto elaborado por la comisión de que trata el artículo decimoctavo (18o.) de estos estatutos.

Parágrafo: Los académicos correspondientes no tienen derecho a voto.

Artículo 27. La Academia podrá destituir del cargo de académico a quienes actúen gravemente la dignidad de la corporación, previo concepto de la Junta Directiva.

Artículo 28. Los diplomas de académico a que se refieren los artículos 23 y 25 deberán ser firmados por el presidente y el secretario de la Academia y refrendados con el sello respectivo.

## CAPITULO VII

### DE LAS DIRECTIVAS DE LA ACADEMIA

Artículo 29. La Academia tendrá una Junta Directiva que asesorará al presidente en la dirección de la corporación, aprobará los gastos, podrá autorizar traslados presupuestales hasta por el monto autorizado en los reglamentos y cumplirá con las funciones que le fijan los presentes estatutos y los reglamentos; estará constituida por el presidente, el vicepresidente, el secretario, el tesorero, el director de la revista, y el director de la biblioteca. La Junta Directiva se reunirá por lo menos una vez al mes.

Parágrafo. El secretario, el tesorero y el director de la biblioteca podrán ser académicos correspondientes.

Artículo 30. Los miembros de la Junta Directiva serán elegidos por mayoría absoluta de votos en la sesión ordinaria del mes de julio, para un período de dos (2) años, pudiendo ser reelegidos. La elección se hará individualmente.

Parágrafo. El presidente de la Academia en el período inmediatamente anterior, formará parte de la siguiente Junta Directiva como vocal de la misma con derecho a voz y voto.

Artículo 31. Las personas elegidas para hacer parte de la Junta Directiva tomarán posesión de sus cargos, al iniciar el período para el cual fueron elegidas, en la sesión solemne que la corporación celebrará cada año en la semana del 20 del mes de agosto, aniversario de la fundación del Observatorio Astronómico Nacional de Bogotá.

Artículo 32. Del presidente. El presidente es el representante legal de la corporación y como tal le corresponde ejercer su personería jurídica. Debe, además, presidir las sesiones de la Academia, representarla en los actos públicos, hacer cumplir sus estatutos y reglamentos y ejecutar las demás labores, y asumir las responsabilidades que le confie la corporación.

Artículo 33. La Academia podrá tener un presidente honorario para cuya elección se requerirá la aceptación de por lo menos las dos terceras partes del total de los académicos de número y honorarios. Si alguno o algunos de éstos no pudieren asistir a la sesión en que se ha de verificarse la elección, el voto deberá hacerse por escrito. En la convocatoria deberá comunicarse que se trata de la elección de presidente honorario.

Artículo 34. Del vicepresidente. El vicepresidente, deberá remplazar al presidente en las ausencias temporales o absolutas y en estos casos tendrá las mismas atribuciones que se señalan en el artículo 32.

Artículo 35. Del secretario. Son deberes del secretario: atender la correspondencia, redactar las actas y autorizarlas con su firma, expedir los certificados que de la Academia, coordinar el funcionamiento de las distintas dependencias especializadas y redactar un informe anual sobre las actividades de la corporación.

Artículo 36. Del tesorero. Corresponde al tesorero todo lo que se relacione con las cuentas, ingresos y egresos de la Academia; presentar el informe de ejecución presupuestal en la primera sesión del año calendario; rendir las cuentas a la Contraloría General de la República, según las normas generales sobre el particular, y preparar el proyecto de ejecución presupuestal para ser sometido a la aprobación de la corporación.

Artículo 37. Del director de la revista. Al director de la revista le corresponde la selección de los trabajos destinados a la publicación de las diferentes publicaciones de la Academia. Estará asesorado por un comité editorial designado por la corporación para un período de dos (2) años.

Artículo 38. Del director de la biblioteca. Son funciones del director de la biblioteca, velar por el patrimonio bibliográfico de la Academia, procurar su enriquecimiento y vigilar las tareas del procesamiento, los canjes y demás labores que adelante el personal de la biblioteca.

Artículo 39. La Academia tendrá un revisor fiscal designado por la corporación para un período de dos (2) años.

Artículo 40. La Academia podrá crear los cargos de tipo técnico o administrativo que juzgue necesarios para su funcionamiento y fijar los sueldos correspondientes. Los nombramientos respectivos serán hechos por la Junta Directiva. Para cargos de tipo ejecutivo podrán ser nombrados académicos de número o correspondientes, si así se encuentra oportuno.

## CAPITULO VIII

### DE LAS SESIONES DE LA ACADEMIA

Artículo 41. La Academia celebrará sesiones ordinarias, extraordinarias y solemnes. Las primeras se verificarán mensualmente en los días que fije la corporación. Las sesiones extraordinarias y solemnes se celebrarán por determinación de la Junta Directiva.

Artículo 42. Una de las sesiones solemnes será reglamentaria y deberá celebrarse en la semana del 20 de agosto de cada año, aniversario de la fundación del Observatorio Astronómico de Bogotá. En dicho acto tomará posesión la nueva Junta Directiva en el año inicial de sus funciones y el secretario leerá un informe detallado sobre las principales tareas científicas y culturales desarrolladas por la corporación durante el año académico precedente. En esta ocasión, un académico designado por el presidente leerá un estudio de fondo.

Artículo 43. En reuniones ordinarias el quórum para sesionar será de diez (10) miembros. Cuando deban tomarse decisiones por votación —además de los casos previstos en este estatuto—, deberán estar presentes por lo menos nueve (9) académicos con derecho a voto.

Artículo 44. Está prohibido en cualquiera de las sesiones de la Academia, discutir cuestiones personales, religiosas o de política partidista, que puedan generar en discusiones inconvenientes, en casos de presentarse tal situación, deberá el presidente suspender la discusión y si fuere necesario levantar la sesión. En las sesiones solemnes no habrá lugar a interrumpir el orden fijado por la presidencia y sólo con permiso de éste podrán presentarse proposiciones directamente relacionadas con el objeto de la sesión.

Parágrafo. Todo reclamo o queja relacionado con la marcha de la Academia o contra cualquiera de sus integrantes, deberá presentarse por escrito a la Junta Directiva, debidamente documentado.

## CAPITULO IX

### DE LAS PUBLICACIONES DE LA ACADEMIA

Artículo 45. La Academia tendrá como órgano de publicidad la "REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES", que deberá editarse con la periodicidad que se considere conveniente, pero con un mínimo de una entrega anual. La Academia no se hace responsable de las opiniones de los colaboradores de la Revista.

Artículo 46. Además del órgano de publicidad a que hace relación el artículo anterior, la Academia podrá editar libros u otros trabajos.

## CAPITULO X

### DISPOSICIONES VARIAS

Artículo 47. La Academia entrará cada año en receso desde el 10 de diciembre hasta el 20 de enero siguiente. Los empleados gozarán de vacaciones remuneradas conforme a la ley. Durante el receso, la Junta Directiva atenderá a los asuntos urgentes.

Parágrafo. El año académico se contará desde el 20 de agosto de cada año hasta el 19 de agosto del año siguiente.

Artículo 48. El presente estatuto empezará a regir a partir de la fecha de su aprobación y para reformarlo, adicionarlo o modificarlo, el proyecto que se someta a consideración deberá discutirse en dos debates y en dos períodos académicos. Para su aprobación se requerirá el voto afirmativo de las dos terceras partes de los académicos con derecho a voto presentes en la sesión, cuyo número no podrá ser inferior a quince (15).

### Nuevas Publicaciones

En febrero de 1985 el pleno de la Academia aprobó la creación de tres colecciones destinadas a promover la investigación y permitir la fácil divulgación de estudios en tres áreas de la ciencia.

La primera de estas se denomina "Colección Jorge Alvarez Lleras" y está destinada a la publicación de los resultados de trabajos investigativos en cualquier área de las ciencias exactas, físicas y naturales. La segunda serie se denomina "Colección Julio Carrizosa Valenzuela" está destinada a la publicación de obras de carácter didáctico. La tercera serie llamada "Colección Enrique Pérez Arbeláez" tiene por objeto publicar trabajos sobre historia de la ciencia.

Hasta el momento han aparecido los siguientes títulos:

#### Colección Jorge Alvarez Lleras

No. 1. **Mora-Osejo, Luis Eduardo.** 1987. Estudios morfológicos, autecológicos y sistemáticos en angiospermas. 1/16. 196 pp, 75 figs.

#### Colección Julio Carrizosa Valenzuela

No. 1. **Castillo-Torres, Guillermo,** 1990. Física Cuántica, teoría y aplicaciones. 1/16 (en prensa).

#### Colección Enrique Pérez Arbeláez

No. 1.

No. 2. **Díaz-Piedrahíta, Santiago & Alicia Lourteig.** 1989. Génesis de una flora. 1/16, xii + 362, 35 figs.

No. 3. **Villaveces, José Luis,** . . . 1989. Hacia una historia epistemológica de la Química. 1/16.

### A propósito del número 65 de la Revista.

El Doctor José Cuatrecasas envió a la Academia la siguiente comunicación relativa a la anterior entrega de la Revista:

"Washington D.C., 17 de octubre de 1989. Sr. Dr. Luis Eduardo Mora-Osejo, Presidente de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Sr. Dr. Santiago Díaz-Piedrahíta, Director de la Revista, Bogotá, D.E.

Distinguidos colegas y amigos:

Con gran placer he recibido el No. 65 de la Revista de la Academia, que esa prestigiosa Corporación ha tenido a bien dedicarme al cumplir mis 85 años de vida.

Ello significa una alta distinción que me satisface y me enorgullece, y aunque me parece superior a mis merecimientos lo agradezco íntimamente.

La entrega quedó magnífica por su correcta redacción, escogida ilustración y acertada ordenación editorial, ello aparte de la alta calidad de las contribuciones, todas ellas de gran interés.

Mi satisfacción al contemplar este número sube de punto por tratarse de una publicación de la Academia Colombiana de Ciencias con la que he tenido una continuada conexión desde que llegué a Bogotá por primera vez en 1932, ciertamente en relación con actos

dedicados a la exaltación de la Expedición Mutisiana. Así, ya en 1932 recibí una afectuosa acogida por parte de esa prestigiosa Corporación y de su presidente, entonces el insigne Dr. Alvarez Lleras, que me ofreció magnánimamente las páginas de la Revista por él fundada y dirigida. Con ocasión de regresar a Colombia en 1938 nuestros lazos de asociación científica y amistad se incrementaron, facilitándome la publicación de trabajos en lo sucesivo, durante mi larga estadía en el país que me había acogido generosamente en momentos críticos para mi vida y la de mi familia. Mi interés por la botánica colombiana y por Colombia se había infiltrado en mi ser en forma que ya se haría inseparable de mi persona en el futuro. Mis buenas relaciones con la Academia y con sus miembros no se han interrumpido nunca. Me halaga el ser parte honorífica de la docta institución que ustedes dignamente dirigen y por la distinción extraordinaria que recientemente me han conferido, al editar en mi homenaje una entrega tan sabiamente nutrida de valiosos trabajos de colegas y amigos.

Acepten, Dr. Mora-Osejo, Presidente y Dr. Díaz-Piedrahíta, Director de la Revista, y demás Sres. Miembros de la Academia, mi sincero agradecimiento por el honor recibido, juntamente a mis felicitaciones por la alta calidad científica y editorial del número dedicado. Respetuosamente.

José Cuatrecasas"