

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXIX

JUNIO DE 2005

NÚMERO 111

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DÍAZ-PIEDRAHITA



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Sección editorial [Notes from the Editor]	165	turning words into facts: The case of the Rio de la Plata and his Maritime Front (RPFM)]. <i>Jaime Ricardo Cantera Kintz</i>	255
Botánica [Botany] - Redescubrimiento de <i>Chalybea</i> Naudin e implicaciones en la delimitación genérica de <i>Huilaea</i> Wurdack (Melastomataceae). [Rediscovery of <i>Chalybea</i> Naudin and its implications in the generic limits of <i>Huilaea</i> Wurdack (Melastomataceae). <i>María Eugenia Morales & Favio González</i>	171	Física [Physics] - Efecto del método de síntesis sobre la sinterabilidad de los polvos cerámicos de (Sn,Ti)O ₂ . [Effect of synthesis method on the sintering of (Sn,Ti) ₀₂ ceramic powders]. <i>C. Ararat, J.A. Varela, J.E. Rodríguez-Páez</i>	271
- Una nueva e interesante especie de <i>Sloanea</i> (Elaeocarpaceae) del Pacífico colombiano. [A new and interesting species of <i>Sloanea</i> (Elaeocarpaceae) from the Colombian Pacific area]. <i>Leonardo Palacios-Duque & José Luis Fernández-Alonso</i> ..	179	Química [Chemistry] - Efecto de la posición del ácido aspártico en la solubilidad y en la adsorción sobre hidróxido de aluminio de una serie de péptidos análogos. [Aspartic acid position effect in solubility and adsorption onto aluminium hydroxide in an analogue peptide series]. <i>Mary Trujillo, Luis A. Oviedo, Fanny Guzmán & Julio C. Calvo</i>	283
- Estudio palino-botánico de algunas especies de Pteridophyta de Colombia. [Palinobotanical study of spores of some species of Pteridophyta from Colombia] <i>Nuria Solé de Porta & María Teresa Murillo Pulido</i>	183	- Producción de materiales elásticos por polimerización de α,ω -dienos acíclicos vía metátesis. [Production of elastic materials by polymerization of acyclic α,ω dienes using metathesis]. <i>Fabio Zuluaga, Kenneth B. Wagener & Piotr Matloka</i>	289
Biología Molecular [Molecular Biology] - Presencia y distribución de algunas proteínas citoesqueléticas en el meroplasmodio de un grupo nuevo de algas ameboides marinas del Océano Atlántico. [Presence and distribution of some cytoskeletal proteins in the meroplasmodia of a new amoeboid marine algal group from the Atlantic Ocean]. <i>Ana Sofía Fliegner</i>	219	Zoología [Zoology] - <i>Procambarus</i> (<i>Scapulicambarus</i>) <i>clarkii</i> (Girard, 1852), (Crustacea: Decapoda: Cambaridae). Una langostilla no nativa en Colombia [<i>Procambarus</i> (<i>Scapulicambarus</i>) <i>clarkii</i> (Girard, 1852), (Crustacea: Decapoda: Cambaridae). A crayfish not native to Colombia] <i>Martha R. Campos</i>	295
- ADN fósil: arqueoparasitología en América. [Fossil DNA: paleoparasitology in America]. <i>Felipe Guhl</i>	229	- Crítica a la asignación de la categoría de amenaza de <i>Gastrotheca ruizii</i> (Amphibia: Anura: Hylidae). [Criticism of the assignment of Threat Category for <i>Gastrotheca ruizii</i> (Amphibia: Anura: Hylidae)]. <i>Jonh Jairo Mueses-Cisneros</i>	303
Ciencias de la Tierra [Earth Sciences] - Efectos naturales y antrópicos en la producción de sedimentos de la cuenca del río Magdalena. [Natural and anthropogenic effects in Magdalena Basin sediment yield]. <i>Juan C. Restrepo & Juan D. Restrepo</i>	239	Constitución de la Academia [Members of the Academy]	309
Ecología [Ecology] - Investigación científica para la gestión ambiental integrada de espacios acuáticos compartidos, el desafío es pasar de las palabras a los hechos: El caso del Río de La Plata y su frente marítimo (RPFM). [Scientific research for the integrated environmental management of transboundary aquatic spaces, the challenge of		Publicaciones de la Academia [Publications of the Academy]	311



LUIS EDUARDO MORA-OSEJO
(7-12-1931 – 11-03-2003)

La Academia Colombiana de Ciencias rinde homenaje a la memoria del doctor **Luis Eduardo Mora-Osejo** a través de la presente edición de su Revista, órgano del cual fue director entre 1978 y 1982, justo antes de ocupar la presidencia de la Corporación, cargo que ejerció con gran dedicación por espacio de veinte años consecutivos. Durante su administración, la Institución se transformó notablemente convirtiéndose en una entidad dinámica, moderna y con innegable influencia tanto a nivel nacional como internacional.

El doctor Luis Eduardo Mora Osejo vio la luz en las breñas nariñenses y desde pequeño se sintió atraído por la rica naturaleza de las montañas y de los páramos que rodean a Túquerres y a Pasto; allí captó la riqueza de la flora y la diversidad de tipos de organización que se manifiestan en las plantas tropicales; estas circunstancias definieron su vocación científica y fueron decisivas al momento de escoger su profesión. Concluidos los estudios de bachillerato se desplazó a Bogotá donde inició sus estudios en el campo de las ciencias naturales. En 1954 viajó a Mainz

para complementar su formación científica y obtener el doctorado. La tesis respectiva versó sobre la complejidad estructural de las fases vegetativa y reproductiva de las ciperáceas y sobre interrelaciones tipológicas que se manifiestan en su arquitectura durante las distintas fases del crecimiento, un tema que nunca abandonó y que estudió a profundidad. Otro tópico de su preferencia fue el de la morfología y la sistemática de las haloragáceas y en particular del género *Gunnera*, grupo que revisó para la flora de Colombia y para el ámbito neotropical. Estos estudios le sirvieron de base para proponer la hipótesis de las “*Unidades de Crecimiento y Floración (UCF) de las angiospermas*”. Como investigador dedicó buena parte de su tiempo al estudio de la flora colombiana y a la interpretación de la arquitectura de las plantas tropicales. El resultado de esta labor se refleja en abundantes libros y artículos científicos. Merced a su entrega y a sus ejecutorias alcanzó numerosos premios y distinciones, que nunca alteraron su carácter y personalidad excepcionales.

Al lado de tan importante labor como investigador, el doctor Mora realizó una meritoria tarea en los campos de la docencia y la administración, siempre con la meta de consolidar la identidad institucional de las entidades a su cargo, en su orden, el Departamento de Biología y la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional, la Universidad de Nariño, el Jardín Botánico de Bogotá y la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. En el campo docente orientó su trabajo a la enseñanza de las diversas ramas de la botánica en las aulas del Instituto de Ciencias Naturales, del Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia y de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Nariño. Su brillante carrera docente le fue reconocida con las más altas distinciones que concede la Universidad Nacional de Colombia.

Además de la cátedra y la investigación el doctor Mora se destacó en el campo de la administración educativa mediante el desempeño de cargos tales como los de Rector, Decano, Director de Departamento. Adicionalmente tuvo un importante desempeño en el mundo extrauniversitario; aparte de su prolongada labor en la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, durante dos periodos dirigió el Jardín Botánico de Bogotá; en ambas entidades fortaleció la organización básica imprimiéndoles nueva dinámica. La comunidad científica reconoció en él no sólo su vasta actividad investigativa sino sus esfuerzos por consolidar el papel del investigador dentro de la sociedad y por crear nuevos espacios para la investigación científica.

Una de sus últimas publicaciones, aparecida en forma póstuma bajo el título de “*Morfología, sistemática y evolución de las Angiospermae*”, recoge buena parte de su experiencia. Allí utiliza como referencia los tipos o patrones fundamentales, y con el apoyo de referencias históricas, explica los fundamentos generales de la morfología, la sistemática y la evolución de las plantas superiores y analiza los diferentes órganos para presentar el plan de organización de las plantas superiores. Con base en estos conceptos, en la última parte de la obra se presentan al lector los principales grupos de angiospermas. Este libro no pretende cubrir de manera exhaustiva toda la botánica; lo que se propuso su autor fue presentar, en forma sintética y a través de ejemplos representativos, la casi infinita variedad de formas y de estructuras presentes en el mundo de las plantas poniendo de presente los límites existentes entre los distintos patrones de organización. Este libro se une a una extensa producción bibliográfica que supera los ochenta títulos y en la que se destacan interesantes artículos sobre anatomía comparada y numerosas descripciones de nuevas especies, aparte de las monografías ya mencionadas y de un tomo de la Flora de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada.

La circunstancia de haber sido, en años ahora lejanos, su discípulo y de haber colaborado con él por más de tres décadas, ya en el Departamento de Biología, ya en el Instituto de Ciencias Naturales, en la Junta Directiva del Jardín Botánico de Bogotá o en la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales me convierten en un buen conocedor de su obra y en testigo presencial de sus realizaciones. Por ello puedo asegurar que su vida constituye un claro ejemplo de lo que debe ser la labor del verdadero naturalista. El país carece de suficientes investigadores y muchos jóvenes ven frustrada su vocación y desperdiciada su formación por falta de plazas en las universidades y en los centros de investigación. Se requieren botánicos analíticos que cubran adecuadamente el estudio de la flora colombiana, una de las más variadas y a la vez más frágiles del mundo. La naturaleza colombiana, a pesar de los esfuerzos realizados, es aun mal conocida; resulta urgente estudiarla a cabalidad y concluir el inventario de sus recursos. Lamentablemente estamos destruyendo tales recursos antes de conocerlos, merced al torpe manejo que se le está dando y que indefectiblemente conducirá a su destrucción. Ojalá el ejemplo de vida del doctor Mora sirva de modelo a las nuevas generaciones y de estímulo a las autoridades ambientales para que con oportunidad se corrijan los errores citados y se incremente la investigación de los recursos naturales en bien del país.

Santiago Díaz Piedrahita

NECESIDAD DEL CONOCIMIENTO PARA EL LOGRO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE¹

por

Luis Eduardo Mora-Osejo

Hace pocos años, cuando se acercaba el final del siglo XX y se aproximaba el comienzo de un nuevo siglo y milenio, el deterioro, cada vez más intenso y preocupante, del medio ambiente, condujo a que se iniciara un proceso de concientización paulatina relativo a la necesidad de que la humanidad asumiera prontamente el compromiso de forjar una nueva relación entre las comunidades humanas y el entorno natural que las sustenta. Esto, con el objetivo de reparar los daños causados por la sociedad a los sistemas naturales que soportan las diversas formas de vida de la tierra, incluida la vida humana. El reconocimiento de crear esta nueva relación, sociedad - entorno natural, ha resultado de las discusiones efectuadas en diferentes conferencias y foros internacionales sobre el tema del desarrollo sostenible.

Queda sobreentendido el compromiso de satisfacer las necesidades humanas para asegurar el bienestar general de las sociedades en los respectivos países, pero bajo la condición de no causar deterioros, y menos aún daños irreversibles en el ambiente terrestre, considerado como una totalidad conformada, a la vez, por los «sistemas de soporte de la vida» y, en particular, por la diversidad de los recursos naturales que serán también necesarios para las generaciones futuras. Lo contrario se considera una arbitrariedad que pondría en grave peligro la supervivencia sobre la tierra de la especie humana.

Esto, desde luego, implica para la humanidad afrontar varios desafíos. Por fortuna, ya identificados, como

resultado de las discusiones sostenidas durante varias conferencias internacionales, que sobre estos temas han celebrado las academias, sociedades científicas y uniones científicas, y en las cuales ha participado la Academia Colombiana de Ciencias.

En tales certámenes se ha propuesto, entre otras tareas, que las academias nacionales de ciencias en cada país asuman y concedan la más alta prioridad al compromiso legal de asesorar a los gobiernos en la propuesta y el diseño de programas o proyectos específicos, dirigidos a afrontar, en corto o largo plazo, tales desafíos, desde luego, mediante el concurso de las comunidades científicas locales y regionales, de la participación activa de los habitantes de las respectivas localidades, y si la complejidad de los problemas por resolver así lo exige, con la colaboración de la comunidad científica mundial.

Es claro que tanto al conocimiento científico como al conocimiento tecnológico corresponde papel protagónico para alcanzar la sostenibilidad; sin embargo, no podrá llegarse a ella si tales conocimientos no resultan aplicables para solucionar los respectivos deterioros en los entornos naturales de una determinada localidad, región o país; tampoco se logrará tal sostenibilidad si los gobiernos no han adoptado políticas, estrategias, programas y proyectos económicos y sociales, coherentemente concebidos, necesarios para la aplicación de los conoci-

¹ Por recoger buena parte de su pensamiento, y en recuerdo de su memoria se reproduce este texto pronunciado, el 11 de abril de 2002, por el Dr. Mora durante el Congreso Nacional Ambiental.

mientos y para el diseño de las estrategias eficaces para alcanzar la sostenibilidad deseada.

Volviéndonos a situar en el plano del conocimiento científico, debemos aceptar que gracias a él, se ha alcanzado beneficios tales como: un incremento considerable de la expectativa de vida, un aumento de los recursos y procedimientos para el control de las epidemias, y el tratamiento y cura de enfermedades otrora consideradas incurables y un crecimiento considerable de la producción agrícola que ha permitido resolver, en muchas regiones las necesidades alimenticias de la población en aumento. Sin embargo, no podemos ignorar los daños que ocasionan al medio ambiente las aplicaciones improvisadas, o sin el debido fundamento, de nuevos conocimientos científicos y nuevas tecnologías. Tampoco resulta correcto transferir indiscriminadamente tecnologías desde un país a otro, esto es, sin considerar los impactos negativos sobre el ambiente y sobre la sociedad. Tales transferencias, muchas veces han contribuido a acentuar las polarizaciones sociales y la violencia, en cuanto han promovido la construcción de armas con gran poder destructivo para la vida y el ambiente, situaciones que acaban por traducirse en incremento del deterioro irreversible del ambiente.

Tal deterioro resulta mayor cuando se trata de transferencia de tecnologías y de modelos de producción económica, desde otras latitudes con entornos naturales menos complejos y frágiles, a nuestro medio tropical, tan complejo y frágil, sin antes haberlas sometido a evaluación o de ajustarlas a normas procedentes de políticas de transferencias, inspiradas en la necesidad de tener en cuenta las singularidades de nuestros medios naturales. Desafortunadamente, su desconocimiento conduce al error de suponer que no tienen nada que ver con los impactos de tecnologías importadas.

Por otra parte, en el esfuerzo por alcanzar el desarrollo sostenible, al lado de avances positivos, derivados de las aplicaciones del conocimiento científico y tecnológico, y de los beneficios que de ellos se han derivado para la humanidad, han surgido indirectamente nuevos desafíos por afrontar, por ejemplo, el incremento explosivo de la población, en especial, en los llamados países en desarrollo, donde tal incremento es uno de los muchos factores implicados en las situaciones de predominio del hambre y de la pobreza.

Los aumentos explosivos de la población también han producido grandes depredaciones ambientales y han generado disparidades económicas crecientes. Ante tales problemas y tan preocupantes situaciones, cabe pregun-

tarnos: qué puede hacer la comunidad científica, y en particular las Academias de Ciencias, en lo concerniente al conocimiento para que la sostenibilidad, entendida en la forma expuesta, sea una realidad?

Considero que debe comenzarse por facilitar el acceso de todos los colombianos, sin importar a cual estrato económico pertenezcan, al «conocimiento inteligente», es decir, no solo al conocimiento entendido como simple información, sino al conocimiento entendido como una interpretación explicativa conceptual, debidamente sometida a la prueba experimental de los fenómenos de la realidad, es decir, desde donde se pueda avanzar hacia el conocimiento entendido como explicación; preferentemente interrelacionable con explicaciones de otros fenómenos o comportamientos. Por ejemplo, para la invención de nuevos procedimientos conducentes a mejorar la producción agrícola pero ajustados a la condición de la sostenibilidad. Todo complementado mediante la adopción de políticas estatales dirigidas a facilitar el acceso a la aplicación del conocimiento en beneficio de los asociados.

En síntesis, es necesario intensificar los esfuerzos que fueren necesarios por parte del Estado y de la sociedad civil, en favor de mejorar la calidad de la educación y de ampliar su cobertura. Contribuir, en la medida de sus posibilidades, al logro de este objetivo ha sido en todo tiempo, una de las preocupaciones fundamentales de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Entre las tareas que en tal sentido ha promovido la Academia, cabe destacar, el estímulo, reconocimiento y apoyo dados a quienes han dedicado sus esfuerzos a la creación de nuevos conocimientos sobre la realidad natural, en sus diferentes aspectos, actividad que debe complementarse mediante la incorporación de tales conocimientos y de sus fenómenos característicos, a los programas de formación académica, en todos los niveles del sistema educativo. De modo especial, dichos conocimientos deben orientarse en apoyo de una estrategia pedagógica que los busque contextualizar con nuestra realidad. Debe darse la oportunidad al alumno para que, de frente a la realidad, analice y reflexione sobre la validez de uno u otro conocimiento, entendido como explicación de un fenómeno. Todo, tras el objetivo de obtener el aprendizaje inteligente y creativo del alumno.

En síntesis, se requiere el aprendizaje inteligente, para tener la capacidad de evaluar la fuerza explicativa de los conocimientos ya disponibles en relación con fenómenos característicos de nuestras realidades naturales,

incluidas las explicaciones de ocurrencia de desastres por causas naturales, o como consecuencia de acciones antropogénicas, o en razón de la combinación de las dos posibilidades.

Se trata de transformar al estudiante, de simple receptor pasivo de la información - que el maestro le transmite en clase y que luego debe memorizar y repetir en los exámenes, para cumplir con el requisito formal exigido para aprobar el curso respectivo - en sujeto activo, que frente a los contextos reales, sea capaz de interrelacionar nociones de una o de otra de las disciplinas científicas para captar la causa o causas que originan un determinado fenómeno; por ejemplo, la contaminación de un reservorio de agua dulce o la disminución de los rendimientos de las cosechas y, desde allí, identificar las transformaciones y los procedimientos que deban efectuarse para evitar que ocurran tales fenómenos. En general, se trataría de encontrar los procedimientos de regulación del impacto de las tecnologías empleadas, sobre el respectivo sistema ambiental.

Lo anterior, también implica que el maestro intervenga en todos estos procesos y los aproveche para motivar a sus alumnos y obtener que el aprendizaje del grupo sea realmente efectivo y excitante y promueva la habilidad de pensar analíticamente y el deseo de convertir el aprendizaje en una actividad para toda la vida.

Las aplicaciones del conocimiento, de acuerdo con la metodología expuesta, serán elementos esenciales de la transición hacia la sostenibilidad. Entre otros, por ejemplo, contribuirá a la identificación y utilización de nuevas fuentes de energía, de nuevos y más eficientes métodos de producción de alimentos, los cuales deben contribuir a mejorar la salud humana y a promover el aprovechamiento sostenible de un determinado recurso; en fin, a desarrollar tecnologías ambientalmente benignas de origen endógeno, es decir, propias y surgidas en armonía con el entorno tropical tan complejo y frágil y tan diferente del de las zonas templadas del planeta.

Esto implicará la necesidad de crear nuevos mecanismos de información científica de amplio nivel. Muchas veces ocurre que un grupo, o una sociedad local, o una nación requieren resolver un problema, para el cual existen ya conocimientos creados por grupos, empresas, sociedades en otros lugares de la tierra con condiciones ambientales similares; los mismos, sin causar perjuicio a sus autores o a su país, puedan ser usados en otras regiones donde se necesiten. Esto implicaría la instauración de políticas de cooperación tecnológica internacional auténticas, en sustitución de aquellas políticas unilatera-

les, hasta ahora predominantes, y que tanto perjuicio han ocasionado en los países en desarrollo.

Desde luego, esto requiere que en nuestros países, la sociedad y sus dirigentes se convenzan del papel protagónico que corresponde a la ciencia y así se pueda disponer de cuerpos científicos altamente capacitados, capaces de desempeñarse como interlocutores idóneos con sus pares de cualquier región o país, y además capaces de asesorar independientemente a sus gobiernos sobre las políticas por adoptar, con fundamento en el conocimiento científico disponible y en el que resulte de la investigación científica respectiva.

Las Academias Nacionales de Ciencias de los países en desarrollo, cuanto más posean esta capacidad de consejo y asesoría, se convertirán en instancias asesoras y contribuirán a la adopción de decisiones más sabias y eficaces. Para esto es necesario que los gobiernos superen la tan acendrada inclinación a considerar la ciencia como una actividad con bajo rango de prioridad, cuando no como un lujo que consume considerables sumas de dinero para producir escasos resultados, que solo los países ricos y desarrollados pueden asumir. Además, piensan que la ciencia nada tiene que ver con el desarrollo económico y el bienestar social y menos aún con la sostenibilidad; pues para ello están los créditos externos, así luego la deuda externa supere el 50% del producto interno bruto del respectivo país.

En los días que nos alcanzan las academias de ciencias, bajo la coordinación del Consejo Internacional de la Ciencia, (ICSU) y del Panel Interacadémico (IAP), trabajan de consuno para convencer a los gobiernos y a las sociedades respectivas, sobre la urgencia de construir en cada país una capacidad científica y tecnológica que permita crear los conocimientos para comprender el respectivo entorno, y de paso permita identificar las causas de los deterioros de la dinámica de los fenómenos característicos del respectivo ambiente, el cual debe ser capaz de sustentar la población humana, sin que ello implique el agotamiento de los recursos o genere daños irreparables en los sistemas de soporte de la vida, es decir, para que el desarrollo sostenible, sea cierto y esté acorde con los parámetros requeridos para obtener la sostenibilidad.

De estos conceptos deriva la decisión de las academias de solicitar a los organizadores de la conferencia de Río de Janeiro "Río más 10" así como en la de Johannesburgo, que tendrá lugar en agosto de este año, la necesidad urgente de incorporar en la agenda y como tema central, el de la «la necesidad del conocimiento para el desarrollo sostenible», solicitud que fue aceptada, sobre-

todo, en razón de los numerosos vacíos de conocimientos y de desafíos que no habían sido descubiertos antes de haberse fortalecido la conciencia y, en algunos países, emprendido las acciones para reconstruir la armonía del hombre con la naturaleza, cumpliendo así la condición de la sostenibilidad. En esta forma se pudo captar la necesidad de disponer de conocimientos básicos para aplicados sobre los entornos naturales locales, regionales y nacionales; su difusión y asimilación por parte de las respectivas comunidades conducirá a que éstas se familiaricen con las propiedades del medio que las sustenta y del cual depende su propia supervivencia y la de las nuevas generaciones que habrán de sucederlas. Para conseguir estas metas es necesario que cada día hagamos de la educación una ciencia, de tal manera que entendamos el proceso y conozcamos el camino que conduce al aprendizaje inteligente, y sepamos así crear metodologías y estrategias para una enseñanza promotora de la creatividad.

La investigación fundamental que seamos capaces de realizar en los campos de las ciencias del ambiente y de la tierra, tales como la ecología, la biodiversidad, la climatología, la vulcanología, la sismología y los nuevos campos interdisciplinarios, como el de prevención de desastres, mejorarán nuestras capacidades, ahora limitadas, para predecir o evitar las consecuencias de los desastres naturales y de los cambios ecológicos.

Para preservar el bienestar humano, a largo plazo necesitamos conocer el medio ambiente que nos sirve de apoyo y sustento; es decir, necesitamos de conocimientos que nos orienten sobre las maneras sostenibles de cubrir las necesidades humanas y a la vez nos permitan adoptar sistemas de consumo y producción que contribuyan a mantener la vida sobre la tierra, así como los recursos naturales que van a necesitar las generaciones que nos sucederán.

En resumen podemos señalar: 1.- Tanto al conocimiento científico como al conocimiento tecnológico, corresponde papel protagónico para alcanzar la sostenibilidad. 2.- Corresponde al Estado adoptar políticas y estrategias y de ellas derivar programas y proyectos económicos y sociales concebidos para facilitar la aplicación de los conocimientos y alcanzar la sostenibilidad. 3.- La transferencia de tecnologías solamente deberían realizarse previa consideración de los impactos negativos que ellas pudieran acarrear sobre el ambiente y la sociedad. 4.- La realización efectiva del punto anterior, implica la creación de una conciencia general sobre las singularidades del medio tropical complejo y frágil en que vivimos. 5.- El acelerado incremento de la población en países en de-

sarrollo como el nuestro, ha contribuido a generar situaciones con predominio del hambre y de la pobreza, deprecaciones ambientales y disparidades económicas crecientes. 6.- La compleja situación social descrita en el punto anterior, es quizás el factor negativo más complejo y por consiguiente el que más nos aleja del desarrollo sostenible de nuestra sociedad. 7.- Para que podamos persistir en el propósito de alcanzar el desarrollo sostenible tenemos que ampliar la cobertura y sobre todo la calidad de la educación en todos los niveles. 8.- En lo que respecta a la calidad, el objetivo hacia el cual deberíamos dirigir nuestros esfuerzos es del conocimiento «inteligente» que nos permitirá avanzar hacia los «saberes inteligentes» con el fin de superar su concepción como una simple información y así reemplazarla por la concepción del conocimiento como interpretación explicativa conceptual de los fenómenos de la realidad circundante. 9.- Para lograr lo anterior, se recomienda adoptar la estrategia pedagógica de la contextualización del conocimiento de las realidades locales. Debe darse la oportunidad al alumno para que, frente a la realidad, analice y reflexione sobre el poder explicativo de un conocimiento consolidado. 10.- Lo anterior implica abandonar la práctica de considerar al estudiante como receptor pasivo de la información que el maestro le trasmite en clase, para que luego la repita de memoria en los exámenes y dé cumplimiento a los requisitos formales. 11.- El consenso universal sobre el papel protagónico que corresponde al conocimiento implica que el Estado deje de considerar a la ciencia entre las actividades de más bajo rango de prioridad, o como un lujo que solamente los países desarrollados pueden asumir. 12.- El conocimiento es uno de los factores de mas alta incidencia en el desarrollo económico, en el bienestar social y por ende en la sostenibilidad. Por consiguiente, es urgente que el Estado le conceda facilidades para su ampliación en referencia a nuestras realidades. 13.- La construcción para el país de una capacidad científica y tecnológica nacional, que permita crear los conocimientos para comprender la multitud de entornos y sistemas ambientales, y pueda identificar las causas y modos bajo los cuales se producen los deterioros de la dinámica de los fenómenos característicos del respectivo ambiente o sistema. 14.- Los organizadores de la conferencia mundial «Río mas 10», aceptaron incluir en la Agenda de tal certamen y como tema central el de la necesidad del conocimiento para el desarrollo sostenible, en vista del amplio consenso que sobre este punto existe, sobre todo en aquellos países que ya han emprendido acciones para reconstruir la armonía del hombre con la naturaleza y cumplir así la condición de la sostenibilidad.

REDESCUBRIMIENTO DE *CHALYBEA* NAUDIN E IMPLICACIONES EN LA DELIMITACIÓN GENÉRICA DE *HUILAEA* WURDACK (MELASTOMATACEAE)

por

María Eugenia Morales¹ & Favio González²

Resumen

Morales, M. E. & F. González. Redescubrimiento de *Chalybea* Naudin e implicaciones en la delimitación genérica de *Huilaea* Wurdack (Melastomataceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 171-178. 2005. ISSN 0370-3908.

Se presenta una síntesis de la historia taxonómica de *Chalybea* y se discuten sus relaciones con *Huilaea*, mediante la comparación de los caracteres morfológicos relevantes de estos dos géneros. Como resultado, se amplía la descripción de *C. corymbifera* Naudin y se reduce a la sinonimia de ésta a *Huilaea multiflora* Mendoza & Prieto.

Palabras clave: *Chalybea*, *Huilaea*, Melastomataceae, Miconieae.

Abstract

A synthesis of the taxonomic history of the genus *Chalybea* is presented, along with a discussion of its relationships with *Huilaea* based upon a comparison of the most relevant morphological traits of these genera. As a result, *Chalybea corymbifera* Naudin is re-described and *Huilaea multiflora* Mendoza & Prieto is reduced to the synonymy of *C. corymbifera*.

Key words: *Chalybea*, *Huilaea*, Melastomataceae, Miconieae.

Introducción

La tribu Miconieae DC. (Melastomataceae) comprende cerca de 42 géneros y aproximadamente 2200 espe-

cies. Treinta de estos géneros son neotropicales y seis de ellos (*Allomaieta*, *Alloneuron*, *Catocoryne*, *Chalybea*, *Cyphostyla* y *Kirkbridea*) son endémicos de Colombia. La mayoría de taxones de Miconieae son arbustos, arbolí-

¹ Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia & Escuela de Biología, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. memoralesp@unal.edu.co.

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

tos y árboles, con flores epíginas que usualmente desarrollan frutos en baya dispersados por aves (**Lozano & Ruiz**, 1996; **Renner**, 1993).

Chalybea, género monoespecífico, fue descrito por **Naudin** (1850) con base en una colección efectuada en cercanías de Pamplona (Colombia, Norte de Santander) por los botánicos *N. Funck & L. J. Schlim* en 1846. Posteriormente, dos colecciones procedentes de la zona (*Killip & Smith 17180* y *Stein et al. 3610*, efectuadas en 1927 y 1986, respectivamente) fueron atribuidas a este taxón por **Wurdack** (1988) y por **Judd & Skee** (1991). De acuerdo con **Wurdack** (1988), *Chalybea* está estrechamente relacionado con *Huilaea*, género descrito por este autor en 1957. En la actualidad se han descrito ocho especies de *Huilaea*, concentradas principalmente en Colombia, con una especie (*H. ecuadorensis* Wurd.) en la Provincia de Morona-Santiago, Ecuador. En nuestro país, las especies de *Huilaea* se encuentran distribuidas en la Sierra Nevada de Santa Marta (Magdalena) y en los Andes de Santander, Boyacá, Cauca y Huila.

A lo largo de la historia taxonómica de estos dos géneros se manifiestan problemas en la delimitación de los mismos. **Cogniaux** (1891) subordinó *Chalybea* a la sinonimia de *Pachyanthus*, con base en caracteres tales como la presencia de 3-7 nervios en la hoja, inflorescencias en panículas terminales, paucifloras, flores blancas a púrpuras, hexámeras (excepcionalmente pentámeras), con cáliz tomentoso-escamoso, dos veces más de estambres que de pétalos, anteras linear-oblongas u ovoides, uniporadas, y ovario tetra- o pentalocular. Sin embargo, con base en el estudio del material típico y de nuevas colecciones, **Wurdack** (1988) retomó la propuesta de **Naudin** (1850) al mantener a *Chalybea* como género diferente de *Pachyanthus*, contrario a la propuesta de **Cogniaux** (1891).

El examen morfológico realizado por **Wurdack** (1988) para comparar *Chalybea*, *Huilaea* y *Pachyanthus*, muestra que los dos primeros taxones son afines por la presencia de acarodomacios, inflorescencias axilares con 3(-5) flores cada una, flores hexámeras, anteras bíporas con un pequeño apéndice dorsal-basal y ovario 4-6-locular (Tabla 1). *Chalybea* y *Huilaea* difieren de *Pachyanthus* porque en este último se presentan inflorescencias terminales y anteras uniporadas sin apéndice dorsal-basal, y rara vez se encuentran acarodomacios. Además, la distribución de *Pachyanthus* se restringe a Las Antillas y Centro América (**Naudin**, 1850; **Lozano & Ruiz**, 1996; **Uribe**, 1966, 1969, 1977; **Wurdack**, 1957, 1976, 1988, 1990).

En un análisis filogenético de los géneros de la tribu Miconieae con inflorescencia terminal, **Judd & Skee**

(1991) incluyeron a *Pachyanthus*. Según dichos autores, *P. corymbiferus* (única especie extra-antillana en la circunscripción de *Pachyanthus sensu Cogniaux*) corresponde a *Chalybea* y debe retomar su *status* como *C. corymbifera*, debido a que posee inflorescencias axilares, con anteras bíporas y acompañadas de un apéndice diminuto en posición basal-dorsal.

Como lo sugieren **Cogniaux** (1981) y **Judd & Skee** (1991), la relación entre *Chalybea* y *Huilaea* dentro de Miconieae se debe a la presencia de inflorescencias con pedúnculos largos y flores hexámeras. Además, los trabajos de **Cogniaux** (1891), **Judd** (1989) y **Judd & Skee** (1991) sugieren que estos dos géneros son afines, a juzgar por la posición axilar de las inflorescencias. **Judd & Skee** (1991) reconocen como caracteres diferenciales entre estos géneros el tipo de indumento, la forma de los pétalos, la longitud de los lóbulos del cáliz, la superficie de las semillas y la presencia de drusas.

Una evidencia adicional a favor de una estrecha relación entre *Chalybea* y *Huilaea* proviene de los posibles vectores de polen en estos géneros. **Snow & Snow** (1980) señalan que *Huilaea macrocarpa* es polinizada por colibríes, a juzgar por la presencia de flores rojas, grandes y péndulas, cáliz leñoso, alta producción de néctar, bajo contenido de azúcar, y probablemente periodos de floración prolongados. **Renner** (1989) mencionó que la mayoría de Melastomataceae son polinizadas por insectos, exceptuando a *Brachyotum* y *Chalybea* que son polinizadas por colibríes; la misma autora (1993) incorpora esta característica a favor de una estrecha relación entre dichos géneros.

En la descripción de una nueva especie de *Huilaea* (*H. multiflora*), realizada por **Mendoza & Prieto** (2003), llama la atención que los ejemplares citados en el protólogo proceden de la misma localidad de *Chalybea* (municipio de Cucutilla, Norte de Santander). Los caracteres diagnósticos de *H. multiflora* son las hojas cartáceas con 7 nervios, las inflorescencias con (20-)30-39 flores cada una, y las flores de 1.8-2.1 cm de largo y con pétalos blancos. Al realizar un estudio comparativo entre *Chalybea corymbifera*, *H. multiflora* y las demás especies de *Huilaea*, no se encuentran caracteres morfológicos diferenciales entre las dos primeras (Tabla 1). Lo anterior se corrobora por la distribución simpátrica de estos dos taxones. Por lo tanto, se procede a sinonimizar *H. multiflora* bajo *Chalybea corymbifera*, y se amplía la descripción de esta última especie con base en el estudio del material típico y de colecciones adicionales, así como de observaciones de campo efectuadas como parte del presente trabajo.

Tabla 1. Comparación de los caracteres diagnósticos de *Chalybea corymbifera*, *Huilaea multiflora* y *Huilaea s.s.*

	<i>Chalybea corymbifera</i>	<i>Huilaea multiflora</i>	<i>Huilaea s.s.</i>
Indumento general	Tricomas dendroides	Tricomas dendroides	Glabrescentes o con tricomas dendroides
Contorno de las ramas	Teretes a subcuadradas	Subcuadradas	Subcuadradas a teretes
Contorno del pecíolo	Terete, acanalado ventralmente	Semicilíndrico, acanalado	Levemente peltado a ampliamente acanalado
Longitud del pecíolo (cm)	2.5-5.0	2.5-4.0	(0.5-1.0)1.5-2.5(-4.1)
Forma de la hoja	Obovada a elíptica	Obovada	Ovada, oblonga o anchamente elíptica
Dimensiones de la hoja (cm)	13.5-21 x 9.5-14.7	11.7-16.5 x 8.4-13.5	(4-7)-8-16(-20) x (3.0-3.6)-6.5-9.5
Base de la lámina	Aguda a obtusa	Obtusa	Redondeada, obtusa a levemente cordada
Ápice de la lámina	Acuminado a mucronado	Cuspidado	Redondo, atenuado, acuminado a mucronado
Margen de la lámina	Dentada	Denticulada	Denticulada a denticulado-mucronado
Haz foliar	Frecuentemente glabra, a veces con tricomas dendroides aislados	Glabra	Glabrescente
Envés foliar	Tomentoso, con tricomas dendroides pardos	Tricomas levemente dendroides, ferruginoso	Densamente tomentoso a afelpado, ferruginoso a crema
Número de nervios longitudinales	7	7	5-7
Acarodomacios	Angostamente tubulares, oblicuos en el ápice y la base	Laminares	Tubulares
Ubicación de acarodomacios	Axilas de las venas primarias y secundarias	Axilas de las venas secundarias	Axilas de las venas secundarias
Posición de la inflorescencia	Axilar	Axilar	Axilar
Longitud de la inflorescencia (cm)	20-37.5	22-38	12.5-25(-35)
Ramificaciones de la inflorescencia	3	3 (?)	1
Número de flores por inflorescencia	22-31	(20-) 30-39	3-5-9
Contorno del pedúnculo	Subcuadrado a terete	Subrectangular	Terete a subcuadrado
Longitud del pedúnculo (cm)	18-30	16-31	3.3-8.3
Número de sépalos y pétalos	6	6	6
Longitud de la flor (mm)	13-20	18-21	45-55
Longitud del pedicelo (mm)	6-12	6.0-7.5	8-22
Hipanto	Campanulado, 7-10 x 8-10 mm, glabrescente	Campanulado, 8-10 x 7-8.5, 12-19.7 x 8.7-13.5 mm, glabrescente	Urceolado, largo turbinado, (-13) 16.4-25 x (-11) 13.5-19.2 mm, glabrescente
Dientes del hipanto (lóbulos del cáliz)	Agudos a mucronados, 1.0-2.5 mm	Agudos 1.2-2.5 mm	Agudos a tuberculados, 2-3 mm
Pétalos	Espatulados, 12-14 x 5.0-7.0 mm, carnosos	Espatulados, 11.5-12.5 x 6.2-6.4 mm, carnosos	Espatulados, oblongo-espulado, cocleiformes a angostamente obovados, 26-44 x 10-22 mm, carnosos
Color de los pétalos	Blanquecinos a amarillentos con el ápice rosado en la cara externa	Blanquecinos	Rosados a rojos, internamente blanquecinos
Ápice de los pétalos	Revoluto	Revoluto	Redondeado
Estambres	12, blancos	12, blancos	12, crema
Filamentos	Angostamente triangulares, 6-7 mm	Laminares, 6.6-7.0 mm	Laminares, 11.5-19.0 mm
Anteras	Ovadas a oblongas, 3-4 x 1.0-1.5 mm	Oblongas, 3.1-3.2 x 3.4-3.8 mm	Anchamente ovadas a oblongas, 7.0-10 mm
Número de poros en la antera	2	2	2

Continuación Tabla 1.

	<i>Chalybea corymbifera</i>	<i>Huilaea multiflora</i>	<i>Huilaea s.s.</i>
Conectivo	Con una pequeña protuberancia dorsal -basal, redonda o ligeramente aplanada, o lateralmente ensanchada, con dos proyecciones tuberculadas	Con una pequeña protuberancia dorsal	Dorsal y basalmente tuberculado a cocleiforme
Número de carpelos	4-6	4-6	6
Estilo	Columnar, redondeado, blanco, 10-12 mm	Columnar, blanco, 12 mm	Cilíndrico a filiforme, blanco, 2.2-3.2 mm.
Estigma	Agudo, con papilas pequeñas	No expandido	Expandido a capitado
Frutos	Globosos, angostos en el ápice a elipsoides, 1.8 x 2.2 x 1.2-1.4 cm, amarillo claro, con lenticelas blancas, indumento tomentoso, tricomas dendroides, pardos	Elipsoides, 2.0-2.4 cm, amarillo claro	Urceolado, bacciforme, 2.3-4.1 x 1.65-2.9 cm, verde oliva, indumento ferrugíneo, con lenticelas blancas
Semillas	Obcónicas	Triangulares – aplanadas	Piramidales a obpiramidales
Distribución en Colombia	Norte de Santander	Norte de Santander	Boyacá, Santander, Huila, Cauca y Sierra Nevada de Santa Marta
Rango altitudinal (msnm)	2270	2300-2800	2600-3050
Posibles polinizadores	Colibríes	Colibríes	Colibríes
Referencias	Fototipos (BR, F, P). <i>Morales & Sánchez 1741, 1742 (COL)</i> .	Mendoza & Prieto (2003) . <i>Mendoza et al.</i> 14525 (Holótipo FMB).	Uribe (1966, 1969, 1977) , Wurdack (1957, 1976, 1988, 1990) . Material tipo (COL).

Chalybea corymbifera Naudin, Ann. Sci. Nat., Bot. ser. 3 16(2): 99-100.1850. **Tipo**. “Nouvelle Grenada, Prov. Pamplona, La Baja, ad alt. 10000 ft”, oct 1846, *Funck & Schlim 1312* (Holótipo P [00408912], isótipos BR [882924 y 882925]).

- *Pachyanthus corymbiferus* (Naudin) Cogn. Monogr. Phan. 7: 951.1891.
- *Huilaea multiflora* Mendoza & Prieto. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 27(102): 39-43.2003. **Tipo**. Colombia, Norte de Santander, Cucutilla, vereda Carrizal, sector de Sisavita, quebrada Quelpa, 2300 m, 7°26'20"N 72°50'27"W, 21 mar 2002, *Mendoza et al.* 14525 (Holótipo FMB), **syn. nov.**

Árboles de 10-15 m de altura. Ramas de contorno redondo a subcuadrado, nudos engrosados, entrenudos hasta de 4 cm largo, cubiertos por lenticelas elongadas, pardas, e indumento dendroide pardo. Pecíolo acanalado ventralmente, 2.5-4 cm de largo, con estrías longitudinales e indumento denso, dendroide, pardo. Lámina obovada a elíptica, 13.5-21.0 cm de largo, 9.5-14.7 cm de ancho, con 7 venas longitudinales, base aguda a obtusa, ápice acuminado a mucronado, el mucrón con indumento escumiforme, margen dentada, dientes muy cortos; haz verde lustrosa, glabrescente, a veces con tricomas dendroides aislados, envés tomentoso, con tricomas dendroides, pardos, venas terciarias perpendiculares a las

venas primaria y secundarias, la mitad basal y las de la media distal ascendentes; acarodomacios basilaminares, ubicados por el envés en las axilas de la vena primaria y las venas secundarias, angostamente tubulares, oblicuos en el ápice y en la base, cubiertos por tomento pardo. Inflorescencias axilares, con un pedúnculo de contorno subcuadrado a redondo, 18-30 cm de largo, con lenticelas elongadas e indumento pardo; flores por inflorescencia 22-31; órdenes de ramificación tres por inflorescencia, el último formando 3 dicasios, con abundante indumento de tricomas dendroides, pardos; pedicelos 6-12 mm de largo; flores 1.3-2.0 cm de largo; sépalos 6, reducidos a dientes agudos a mucronados, 1.0-2.5 mm de largo, lignificados, con la margen oscura; pétalos 6, espatulados, 12-14 mm de largo, 5-7 mm de ancho, carnosos, blanquecinos a amarillentos, ápice revoluta, margen rojiza a vino-tinto; estambres 12, 7-12 mm de largo, blancos, isomorfos; filamentos concavo-convexos, angostamente triangulares, 6-7 mm de largo, anteras bíporas ovadas a oblongas, 3-4 mm de largo, 1.0-1.5 mm de ancho, conectivo con una pequeña protuberancia dorsal-basal, redondeada o ligeramente aplanada, o lateralmente ensanchada terminando en dos proyecciones tuberculadas, 0.5-1.0 mm de largo; hipanto campanulado, 7-10 mm de largo, 8-10 mm de diámetro, glabrescente; ovario 4(-6)-carpelar, 4(-6)-locular; estilo columnar, blanco, 1.0-1.2 cm de largo; estigma agudo, papiloso. Frutos en bayas globosas y angostas en su ápice a elipsoides, 1.8 x 2.2 cm de largo, 1.2-1.4 cm de



Figura 1. a-c. *Chalybea corymbifera* Naudin (Func & Schlim 1312). a. Holótipo (P); b-c. Isótipos (BR); d. *Huilaea multiflora* Mendoza & Prieto, Holótipo (Mendoza et al. 14525, FMB).

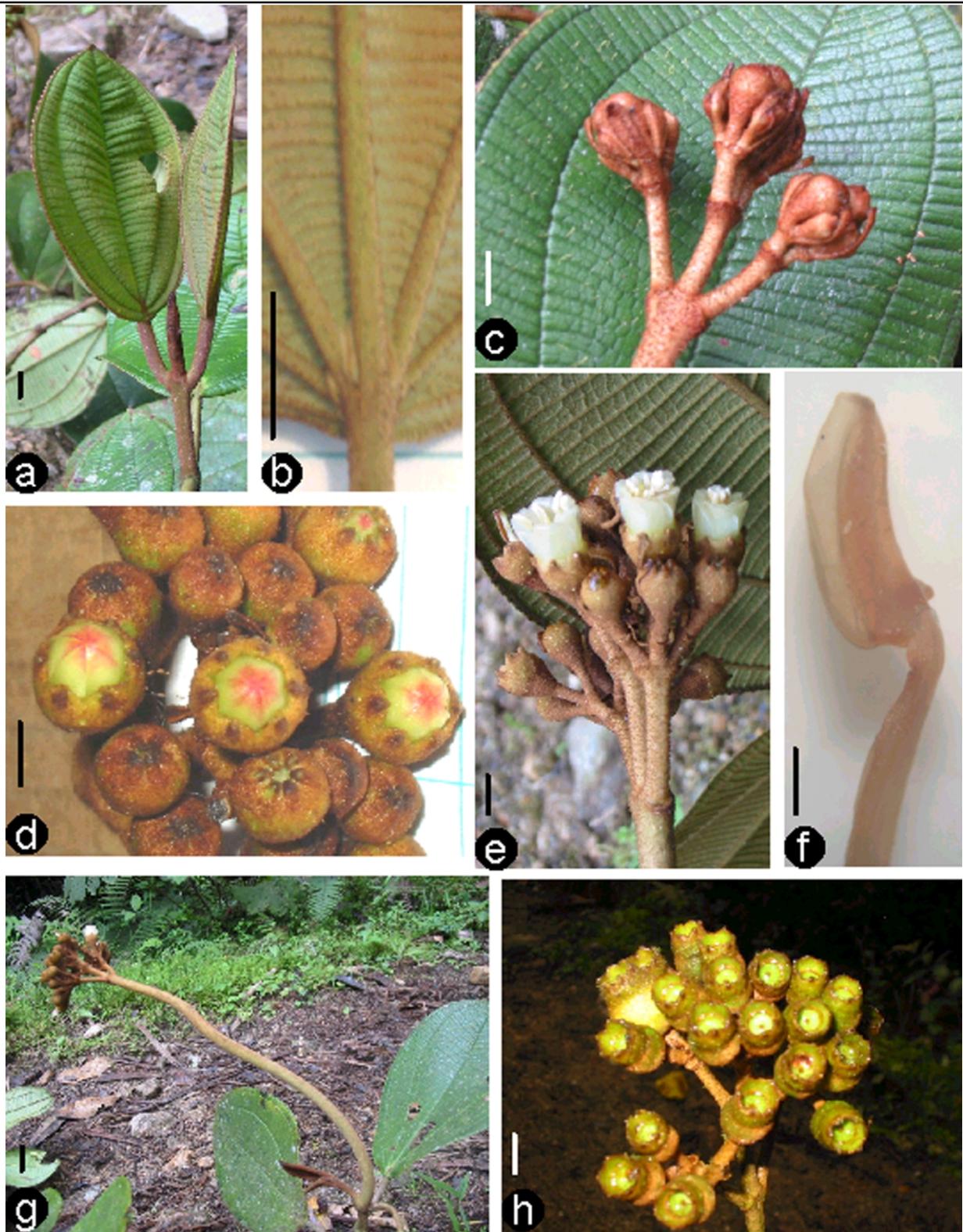


Figura 2. *Chalybea corymbifera* Naudin (Morales & Sánchez 1741, 1742, COL). **a.** Hojas; **b.** Acarodomas en la base de las venas foliares primarias y secundarias; **c.** Inflorescencia juvenil; **d.** Flores en pre-antesis, vista frontal; **e.** Inflorescencia; **f.** Detalle de las anteras y del apéndice; **g.** Inflorescencia madura; **h.** Infrutescencia. Escalas: 1 cm en **a-e, g, h**; 1 mm en **f**.

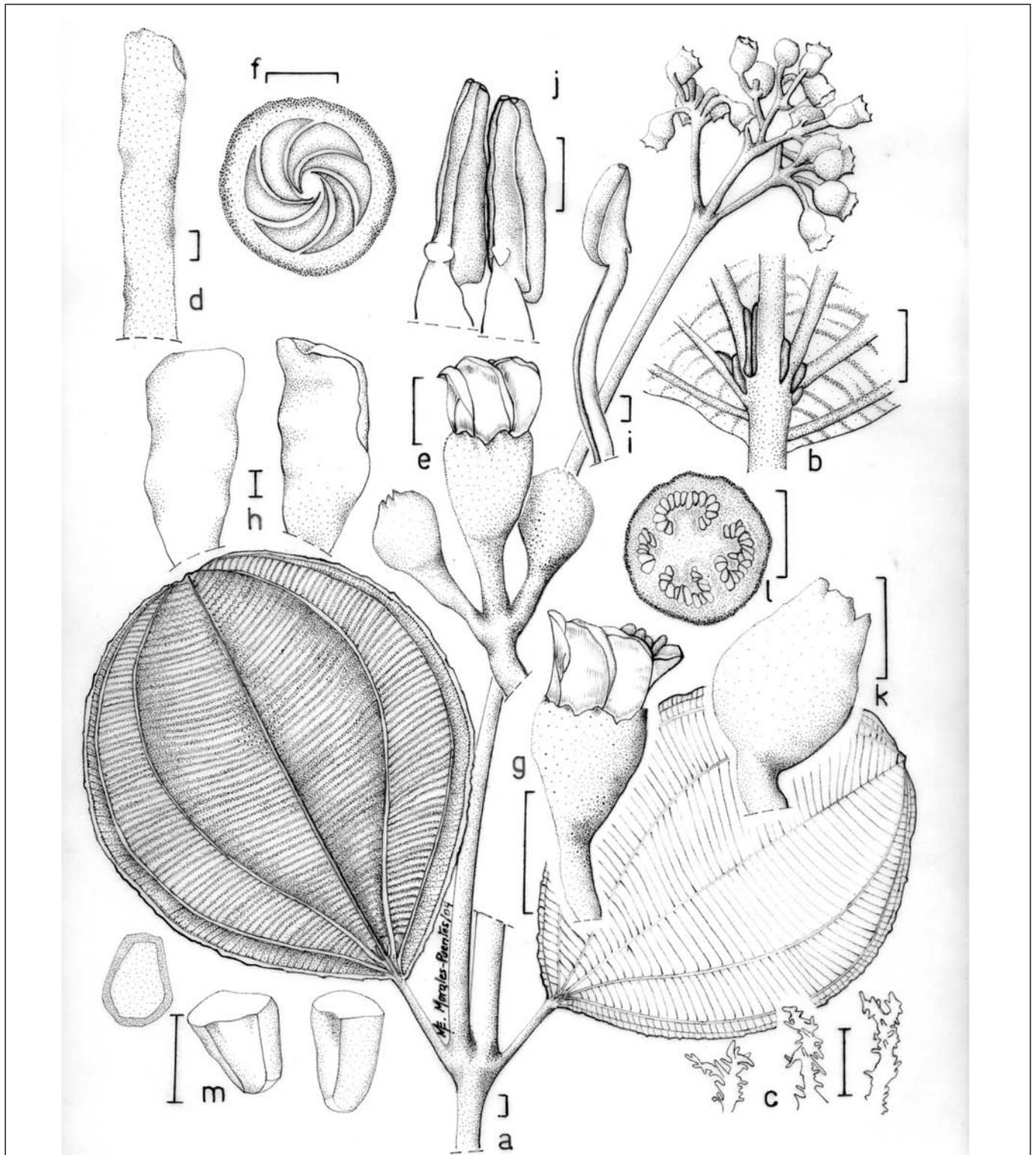


Figura 3. *Chalybea corymbifera* Naudin (Morales & Sánchez 1741, COL). **a.** Rama florífera; **b.** Acarodermatofitos en la base del envés foliar; **c.** Detalle de los tricomas; **d.** Bráctea floral; **e.** Diciasio; **f.** Sección transversal del botón floral; **g.** Flor; **h.** Pétalos; **i.** Estambre; **j.** Anteras; **k.** Fruto; **l.** Sección transversal del fruto; **m.** Semillas. Escalas: 1 cm en **a-b, e-g, k-l**; 1 mm en **c-d, h-j, m**.

diámetro, base redondeada, con 6 dientes en el ápice correspondientes a los sépalos persistentes, amarillo claro, con lenticelas blancas redondas a elipsoides, indumento tomentoso de tricomas dendroides, pardos; semillas numerosas, obcónicas, 1.0-1.1 x 0.3-0.4 x 0.5-0.6 mm, amarillentas a ámbar, lustrosas, con bordes achatados y pardos, recubiertas de mucílago blanquecino.

Material examinado: COLOMBIA. Norte de Santander. Municipio de Cucutilla, vereda Sisavita, camino al Páramo del Romeral, quebrada Quelpa, 2170 m, 12 jul 2004, *M. E. Morales & R. Sánchez 1741* fl fr (COL, FLAS, HECASA, MO, NY, UPTC, para ser distribuidos); 15 m abajo del puente en borde de quebrada, *Morales & Sánchez 1742* fl fr (COL, UPTC, para ser distribuidos).

En el holótipo de *Chalybea corymbifera*, llama la atención la disposición reflexa de los pétalos en el dibujo anexo al ejemplar (Fig. 1 a). Dicha condición no se observó en ninguno de los ejemplares tanto en el campo los ejemplares de herbario; además los pétalos reflejos no son mencionados en ninguna de las descripciones de este taxón. Por lo tanto, esto puede ser un artefacto en el dibujo, a fin de mostrar la morfología de los estambres.

Agradecimientos

A R. Sánchez, del Herbario HECASA y a los profesores F. y V. Araque por su colaboración durante la salida de campo. Al personal de los herbarios del Muséum National d'Histoire Naturelle (P), Jardin Botanique National de Belgique (BR) y Field Museum of Natural History (F), por haber facilitado los fototipos de *Chalybea corymbifera*; al herbario del Instituto Alexander von Humboldt (FMB) por el préstamo del holótipo de *Huilaea multiflora*. Al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" COLCIENCIAS, por el apoyo al primer autor, a través de la Beca de Doctorados Nacionales otorgado bajo el número 43/2003.

Bibliografía

Cognieux, A. 1891. Melastomataceae. Monogr. Phan. 7: 951-954.
 Judd, W.S. 1989. Taxonomic studies in the Miconieae (Melastomataceae) III. Cladistic analysis of axillary-flowered taxa. Ann. Missouri Bot. Gard. 76 (2): 476-495.

Judd, W.S. & J.D. Skee. 1991. Taxonomic studies in the Miconieae (Melastomataceae). IV. Generic realignments among terminal-flowered taxa. Bull. Florida State Mus., Biol. Sci. 36 (2): 25-84.
 Lozano-Contreras, G. & N. Ruiz-R. 1996. El género *Huilaea* Wurdack (Melastomataceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. 20 (77): 237-242.
 Mendoza-C., H. & A. Prieto-C. 2003. Una especie nueva de *Huilaea* Wurdack (Melastomataceae) de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 27 (102): 39-43.
 Naudin, C.V. 1850. *Chalybea*. Melastomacearum monographicae descriptionis. Ann. Sci. Nat. Bot., Ser. 3, 16 (2): 99-100.
 Penneys, D.S., M.W. Whitten, N.H. Williams & W.S. Judd. 2004. *Huilaea* and the *Blakeeae* (Melastomataceae): phylogenetic relationships reconsidered. Abstract Botany 2004. Alpine diversity: adapted to the peaks. July 31- August 5. Salt Lake City, Utah. USA. <http://www.botanyconference.org/engine/search/index.php>
 Renner, S.S. 1989. A survey of reproductive biology in neotropical Melastomataceae and Memecylaceae. Ann. Missouri Bot. Gard. 76 (2): 496-518.
 Renner, S.S. 1993. Phylogeny and classification of the Melastomataceae and Memecylaceae. Nord. J. Bot. 13 (5): 519-540.
 Snow, D.W. & B.K. Snow. 1980. Relationships between hummingbirds and flowers in the Andes of Colombia. Bull. Br. Mus. Nat. Hist. (Zool.) 38 (2): 105-139.
 Uribe-Urbe, L. 1966. Sertula Florae Colombiae, IX. Dos Melastomataceae nuevas de Colombia. Caldasia 9 (44): 295-301.
 Uribe-Urbe, L. 1969. Sertula Florae Colombiae, XI. Caldasia 10 (48): 287-298.
 Uribe-Urbe, L. 1977. Sertula Florae Colombiae, XII. Melastomataceae: Blakeeae & *Monolena*. Caldasia 11 (51): 81-91.
 Uribe-Urbe, L. 1977. Sertula Florae Colombiae, XIV. Melastomataceae. Caldasia 12 (56): 13-18.
 Wurdack, J.J. 1957. Certamen Melastomataceis - IV. Brittonia 9 (20): 101-109.
 Wurdack, J.J. 1976. Endemic Melastomataceae of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. Brittonia 28 (1): 138-143.
 Wurdack, J.J. 1988. Certamen Melastomataceis - XXXVIII. Phytologia 64 (4): 293-301.
 Wurdack, J.J. 1990. Certamen Melastomataceis - XXXIX. Phytologia 69 (5): 316-327.

Recibido el 15 de diciembre de 2004

Aceptado para su publicación el 9 de febrero de 2005

UNA NUEVA E INTERESANTE ESPECIE DE *SLOANEA* (ELAEOCARPACEAE) DEL PACÍFICO COLOMBIANO

por

Leonardo Palacios-Duque* & José Luis Fernández-Alonso**

Resumen

Palacios-Duque, L. & J. L. Fernández-Alonso: Una nueva e interesante especie de *Sloanea* (Elaeocarpaceae) del Pacífico colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 179-182. 2005. ISSN 0370-3908.

Como parte de los trabajos que actualmente se adelantan en el género *Sloanea* L. (Elaeocarpaceae), se describe e ilustra *Sloanea calva* Palacios-Duque & Fern. Alonso, nueva especie y uno de los árboles de mayor porte del departamento del Chocó y se comentan sus afinidades taxonómicas.

Palabras clave. Elaeocarpaceae, *Sloanea*, Taxonomía, Chocó, Colombia.

Abstract

As part of the works that actually are underway about the genera *Sloanea* L. (Elaeocarpaceae), *Sloanea calva* Palacios-Duque & Fernández-Alonso, a new species and one of the tallest three of the Chocó department, is described and illustrated, and its taxonomic affinities are discussed.

Key words. Elaeocarpaceae, *Sloanea*, Taxonomy, Choco, Colombia.

Introducción

La familia Elaeocarpaceae cuenta con nueve géneros y mas de 500 especies de zonas tropicales y subtropicales del mundo. De estos géneros, el único que alcanza el

neotrópico es *Sloanea* L. con unas 140 especies, de las cuales aproximadamente la mitad crecen en las américas (Mabberley, 1997). El género incluye árboles de gran porte y algunos arbustos, caracterizados por presentar frecuentemente raíces tabulares conspicuas, hojas alternas u

* Laboratorio de Botánica y Ecología, Universidad Tecnológica del Chocó "Diego Luis Córdoba", Apartado aéreo 292, Quibdó, Chocó, Colombia. E-mail: lepduque@hotmail.com

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

opuestas, enteras o dentadas, pecíolos con dos pulvinulos (por lo general, el distal mas conspicuo), inflorescencias racemosas o cimosas, generalmente laterales, flores apétalas y frutos armados con espinas de variado tamaño y consistencia según las especies, raramente inermes (D. A. Smith & Steyermark, 1998; D. A. Smith, 2001).

En la revisión de E. C. Smith (1954), para la flora de Colombia se registran doce especies, dos de las cuales, se citan años mas tarde para el departamento del Chocó (Forero & Gentry, 1989). Como resultado de las recientes recolecciones efectuadas en la zona central del departamento del Chocó y del estudio iniciado con las muestras depositadas en los herbarios CHOCO, COL y JAUM; se identificaron tres nuevas especies, una de ellas recientemente descrita (Palacios-Duque, 2004) y otra cuya descripción se incluye a continuación.

Sloanea calva Palacios-Duque & Fern. Alonso *sp. nov.* (Figura 1).

Tipo: COLOMBIA. Chocó: Municipio de Quibdó, carretera Quibdó-Yuto, en el Km 6, bosque pluvial tropical, altamente intervenido, 4 Jun 2002 (fl, fr), L. Palacios-Duque & F. García-Cossio 195 (Holótipo CHOCO, isótipos CHOCO, COL, HUA, JAUM, en proceso de distribución).



Figura 1. *Sloanea calva* Palacios-Duque & Fern. Alonso. Detalle del Holótipo (Palacios-Duque & F. García 195, CHOCO).

Species subgenus *Quadrisepala* C. E. Smith et sectio *Corymbo-racemi* C. E. Smith adscribenda, affinis *Sloanea berteriana* Choisy, *S. grossa* C. E. Smith et *S. laurifolia* (Benth.) Benth., sed differt capsula 4.0–5.8 cm longa, 1.7–3.0 cm lata, ellipsoidea, extus granulata, glabrescente, 3–5 valvis, valvis 9–11 mm crassis; seminis 1.2–3.3 cm longis x 7–11 mm latis.

Árbol de 15–40 (52) m de alto y hasta de 150 cm DAP; raíces tabulares bien desarrolladas de unos 5 m de alto (*Palacios-D, L. 326*); corteza grisácea-café, o algo rosada; ramitas de 2–4 mm de diámetro, pubérulas, con lenticelas esparcidas; yemas apicales cónicas, seríceas, con indumento corto y acostado. Hojas alternas (menos frecuente opuestas), esparcidas sobre las ramitas, menos frecuente agrupadas al final; estípulas prontamente caducas, triangulares, 4–6 mm de longitud, 2–3 mm de ancho, densamente pubescentes; pecíolos 1.7–5.6 cm de longitud, 1–2 mm de diámetro, cilíndricos, con indumento marrón, corto e intrincado, siendo subglabros en la madurez, lenticelados, pocas estrias transversales; pulvinulos dos, muy conspicuos, el proximal de 3–5 mm de longitud, 2–3 mm de diámetro, el distal de 5–10 mm de longitud, 2–3.5 mm de diámetro, del mismo color que el resto de pecíolo; laminas ovadas o anchamente ovadas, menos frecuentemente obovadas y elípticas, (8)10–25(34) cm de longitud, 5.5–14 cm de ancho, enteras; ápice acuminado, base redondeada-obtusa, margen entero levemente ondulado, haz y envés glabros; venación típicamente broquidodroma, 11–16 pares de nervios secundarios, prominentes en el envés, ascendentes en un ángulo de 42°–68°, nervios terciarios prominentes en el envés, paralelos entre ellos y perpendiculares a los secundarios, nervios cuaternarios poligonal-reticulados. Inflorescencias racemosas, racimos básicos de seis a ocho flores; eje primario 4.5–6.5 cm de longitud, pubescente, 2–4 mm de diámetro en la base; pedicelos (0.5)1.2–2.5 cm de longitud, 0.5–1.0 mm de diámetro, pubescente; brácteas tres por pedicelo, dos a los lados y una abajo, estrechamente triangulares-lineares, de 1.5–4.0 mm de longitud, bractéolas ausentes. Flores: sépalos cuatro, blanco-verdosos, ovados, de 3–5 mm de longitud, 3–5 mm en la base, finamente pubescentes, reflexos pasada la antesis; estambres 45–50, blanco-amarillentos, de 2.5–3.1 mm de longitud, filamentos y anteras densamente pubescentes, filamentos de 1.5–2.0 mm de longitud, anteras lineares, de 1.0–1.1 mm de longitud, dehiscentes por dos poros laterales, conectivo prolongándose desde la base hasta el ápice de la antera; receptáculo anaranjado (en vivo), finamente pubescente, mucho mas ancho que el ápice del pedicelo; ovario ovoide, de 2.0–2.5 mm de longitud, 2 mm de diámetro, verde claro (en vivo) blanco cuando seco, densamente pubescente;

estilo de 1.5–2.0 mm de longitud, dividido en cuatro o cinco partes en el ápice, pubescente en la base. Infrutescencias de uno a tres frutos, desarrollándose principalmente sobre las ramitas jóvenes, pedicelo fructífero de 1.5–2.2 cm de longitud, 2.0–2.5(3) mm de diámetro. Cápsulas verde claro (en vivo), café-amarillento cuando secas, inermes, finamente granuladas, con pubescencia marrón muy fina, elíptico-obovadas, de (3.0)4– 5.8 cm de longitud, 1.7–3.0 cm de diámetro, finamente pubescente, sépalos no persistentes, receptáculo mediocrementemente visible; valvas tres a cinco, leñosas, de 8–15 mm de grueso; con una semilla en el interior, elipsoidal, de 1.2–3.3 cm de longitud, 7–11 mm de diámetro, sin arilo.

Etimología. El epíteto específico, hace referencia a los frutos que pierden la pubescencia en la madurez, tornándose glabros.

Hábitat y distribución. Hasta donde se conoce, crece en bosques muy húmedos y pluviales de la región pacífica y central del Chocó, desde los 0–135 m, tanto en bosques primarios como secundarios. El árbol tipo, fue encontrado como un árbol residual, creciendo con *Issertia pittieri* Standl, *Sloanea garcia-cossioi* Palacios–Duque; *Gutteria cuatrecasii* D. Sanc., *Sterculia* sp., *Miconia* sp., *Clidemia* sp. En bosques primarios de algunas zonas de la costa pacífica, como el Cabo Corrientes, *S. calva* es uno de los árboles más altos junto con *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., los cuales cuentan con algunos individuos de más 50 m de altura en la región (G. Galeano, com. pers.).

Nombres vernáculos y usos. En la Costa Pacífica (Municipio de Nuquí), se conoce como “Pulgo” (registrado en varias recolecciones de la región) y en el corregimiento de Salero, municipio de la Unión Panamericana, se conoce como “Táparo” de acuerdo al pliego (*Mosquera & Asprilla 167*), siendo este último, comúnmente utilizado para designar otras especies del género, como *S. guianensis* (Aubl.) Benth., *S. medusula* Pittier y *S. tuerckheimii* Donn. Smith

Observaciones. *S. calva* por el tipo de inflorescencia y la morfología floral, se ubica sin lugar a dudas en el subgénero *Quadrisejala*, sección *Corymbo-racemii* (C. E. Smith, 1954). Dentro de esta sección, *S. calva* estaría estrechamente relacionada con *S. berteriana* Choisy (de las Antillas); *S. grossa* C. E. Smith (de Aragua, Venezuela) y *S. laurifolia* (Benth.) Benth. (de los bosques temporalmente inundados de la Amazonía de Brasil y Venezuela); de todas ellas difiere por presentar la corteza café-rosada, cápsulas con más de 4.0 cm de longitud, elípticas o menos frecuente obovadas; con tres a cinco valvas muy gruesas (7–11 mm de grosor) y semillas elipsoidales, 1.2–3.3 cm de longitud, sin arilo.

Otros especímenes examinados: COLOMBIA. **Choco.** Mpio. de Nuquí, Corregim. de Arusí, 5° 34' N, 77° 30' O, 27 abr 1995, fr., G. Galeano 5839 (COL 406423); ibidem, 18 sept 2002, fr., G. Galeano & al. 7070 (COL-496665); Mpio. de Bahía Solano, Parque Nacional Natural Ensenada de Utría, NO de la ensenada, por la quebrada la Chunga, 6° 20' N; 77° 20' W; 0–100 m, 8 Jun 1990, fr, F. García-C & E. D. Agualimpia 432 (CHOCO-8383); Mpio de la Unión Panamericana, 5° 18' 950" N; 76° 36' 742" W, Quebrada la Candelaria, 135 m, 19 Nov 1998 (estéril), *Mosquera & Asprilla 167* (CHOCO); Mpio. de Quibdó, Km. 6 vía Quibdó a Yuto, 4 jun 2003 (fl., fr.), L. Palacios-Duque 326 (CHOCO, COL, HUA, JAUM); ibidem, 4 oct 2003, (fl), L. Palacios-Duque 328 (CHOCO, COL, MO); Mpio. de Nuquí, Corregimiento de Arusí, El Amargal, feb 1993, fr., M. Pardo 27 (COL- 476979, 477187); ibidem, Correg. de Arusí, en parcela permanente, fr., 13 dic. 1995, D. Tubergia 419 (COL 476945, 476946); ibidem, 0–30 m, 10 mar 1998, D. Tubergia 597 (COL-Carpot. 456452);

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia y al al Herbario Nacional Colombiano del Instituto de Ciencias Naturales por las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo; a Gloria Galeano G. (COL) por facilitar la revisión de las recientes colecciones de Nuquí, depositadas en el Herbario Nacional Colombiano y a Davil Neill (QCNE), por su apoyo con el envío de literatura crítica sobre el género *Sloanea*. El primer autor expresa también su agradecimiento a E. Duque (madre) y a su padre L. Palacios (científicamente fallecido), a J. Asprilla, a J. Rengifo del laboratorio de Zoología de la U.T.CH y a Alex M. Jiménez por la excelente fotografía del espécimen tipo que se incluye en este trabajo.

Bibliografía citada

- Forero, E. & A. Gentry.** 1989. Lista anotada de las plantas del Departamento del Chocó, Colombia. Biblioteca. José Jerónimo Triana 10. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Mabberley, D. J.** 2000. The Plant Book, 2ª. ed. Cambridge Univ. Press.
- Palacios-Duque, L.** 2004. Una nueva especie de *Sloanea* (Elaeocarpaceae) del Chocó, Colombia. *Hickenia* 3 (49): 201–204.
- Smith, C. E.** 1954. The New World Species of *Sloanea* (Elaeocarpaceae). *Contr. Gray Herb.* 175: 1–114.
- Smith, D. A.** 2001. Elaeocarpaceae. Pp. 816–820, in: W. D. Stevens, C. Ulloa – Ulloa, A. Pool & O. M. Montiel (eds.). 2003. Flora

de Nicaragua. Volumen 85, Tomo I. Missouri Botanical Garden Press. St. Louis.

_____. & **J. Steyermark**. 2001. Elaeocarpaceae. Pp. 712–730, in: P. E. Berry, B. C. Holst, & K. Yatskievych (eds.) Flora of the Venezuelan Guayana Vol. 4. Missouri Bot. Garden Press.

Recibido el 15 de diciembre de 2004

Aceptado para su publicación el 9 de febrero de 2005

ESTUDIO PALINO-BOTÁNICO DE ALGUNAS ESPECIES DE PTERIDOPHYTA DE COLOMBIA

por

Nuria Solé de Porta* & María Teresa Murillo-Pulido**

Resumen

Solé de Porta, N. & M.T. Murillo-Pulido. Estudio palino-botánico de algunas especies de Pteridophyta de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 183-218. 2005. ISSN 0370-3908.

Se describen las esporas de 68 especies actuales de Pteridophyta, existentes en Colombia, pertenecientes a 12 géneros que corresponden a las familias Lycopodiaceae, Schizaeaceae, Cyatheaceae, Pteridaceae y Parkeriaceae. Se dan también las características principales de la planta, datos de climatología, altura en que se desarrolla, localidad en que se ha recolectado y nombre del recolector. Se complementa con algunos dibujos de las plantas y fotografías de las esporas en diferentes posiciones.

Palabras clave: Pteridophyta, Lycopodiaceae, Schizaeaceae, Cyatheaceae, Pteridaceae y Parkeriaceae, Colombia.

Abstract

The following describes the morphology of the Spores of 68 recent Pteridophyta ferns, living in the Colombian territory and belonging to 12 genera of the Lycopodiaceae, Schizeaceae, Cyatheaceae, Pteridaceae and Parkeriaceae families. It also features the main characteristics of the ferns, data related to climatic conditions, altitud at which the plants grow and the locality where they were collected and collector name. All these data are produced together with drawings of the plants and different photographs of the spores taken from various perspectives.

Key words: Pteridophyta, Lycopodiaceae, Schizaeaceae, Cyatheaceae, Pteridaceae and Parkeriaceae, Colombia.

* Facultad de Geología. Universidad de Barcelona, Barcelona, España E-mail: n.soledeporta@wanadoo.es

** Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado aéreo 7495, Bogotá, D.C., Colombia E-mail: mariateresamurillo@yahoo.com.mx - mtmurillo@unal.edu.co

Introducción

El estudio de las esporas de Pteridophyta es una herramienta importante para la determinación de las plantas (vegetales) así como para reconstruir tanto el pasado de este grupo como el de sus ambientes.

En América se han elaborado muchos trabajos que tratan de la descripción de las esporas, entre ellos los correspondientes a: Argentina (**Morbelli**); Bolivia (**Graf** (1985)); Norteamérica (**Gastony & Tryon**, 1976). En Colombia el estudio de estas estructuras comenzó con los trabajos (**Murillo & Bless**, 1974;1978) en los que se describen 236 especies comprendidas en 87 géneros.

En este trabajo se reúnen los datos botánicos y palinológicos de algunos pteridofitos existentes en Colombia y se da una más amplia visión sobre cada especie para la paleopalínología; es importante poder comparar la morfología de las esporas de plantas actuales para relacionarlas con las especies fósiles y a la vez conocer su hábitat para poder interpretar las asociaciones y medios en que se desarrollaron las plantas productoras de las esporas en épocas pasadas.

Se describen la morfología de las esporas y las plantas de algunas especies de las familias Lycopodiaceae (30 especies), Schizaeaceae (10 especies), Cyatheaceae (24 especies), Pteridaceae (2 especies), Parkeriaceae (2 especies), existentes en Colombia, y de las cuales se han citado géneros y especies morfológicas de esporas fósiles, pertenecientes o posiblemente pertenecientes a ellas. Se añade un esquema de la planta, sus características más importantes y el medio en el cual se desarrolla.

A la familia Lycopodiaceae se han relacionado algunos géneros de esporas fósiles a partir del Cretácico Inferior, también citados en Colombia.

A la familia Schizaeaceae se le asignan bastantes géneros de esporas fósiles, muy interesantes desde el punto de vista cronoestratigráfico. Así el género morfológico *Cicatricosisporites*, con distribución mundial y con numerosas especies, se conoce desde el Jurásico Superior. La especie *Cicatricosisporites dorogensis*, relacionada con *Mohria* o *Anemia*, es característica y está presente en Colombia desde el Eoceno Medio hasta el Mioceno. Otros géneros como *Klukisporites*, *Appendicisporites*, etc., también considerados de esta familia han sido encontrados en sedimentos de este país.

Algunos géneros fósiles de esporas están relacionados con la actual familia Cyatheaceae, como por ejemplo *Cyathidites*, frecuente en el Jurásico Superior y Cretácico

a escala mundial y citado en Colombia a partir del Cretácico Inferior. También se han descrito restos fósiles de la planta en el Terciario.

A la familia Pteridaceae se le asignan varios géneros fósiles, como *Polypodiaceoisporites*, frecuente en el Terciario. La forma *Magnastriatites grandiosus* se ha relacionado con el género actual *Ceratopteris* de la familia Parkeriaceae y que aparece en Colombia en el Oligoceno.

Esperamos que el presente trabajo sirva de ayuda para la comparación con esporas fósiles y sus medios de desarrollo.

Para la preparación de las esporas se ha utilizado la técnica de la acetólisis según **Erdtman** (1969).

La terminología utilizada para la determinación de las esporas se basa especialmente en la propuesta por **Punt et al.** (1994) y **Tryon & Lugardon** (1991).

En la descripción de las esporas se ha indicado su variabilidad morfológica y también la amplitud de variación del tamaño.

LYCOPODIACEAE

HUPERZIA

H. brevifolia (Grev. et Hook.) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 71. 1985.

Tipo: Perú, Ruíz & Pavón s.n. (Isotipo G).

Planta monomórfica, terrestre de tallos gruesos, hojas en verticilos alternos más anchas que largas, coloreadas, suborbicular-cordiformes, margen entero.

En Colombia ampliamente distribuida entre 3300-4100 m; Cundinamarca hasta Nariño, Boyacá y Risaralda. En sitios húmedos.

Material: Colombia. Colección I.C.N., A.M. Cleef No.1936, COL 232253, Lámina 1, fig. 1 y 1 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Con comisuras iguales al radio de la espora y rectas. Margo formando pliegue apertural próximo a 1 μ m, psilado, ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la proximal. Diámetro de las foveolas 1.5 μ m y separación entre ellas variable entre 3 y

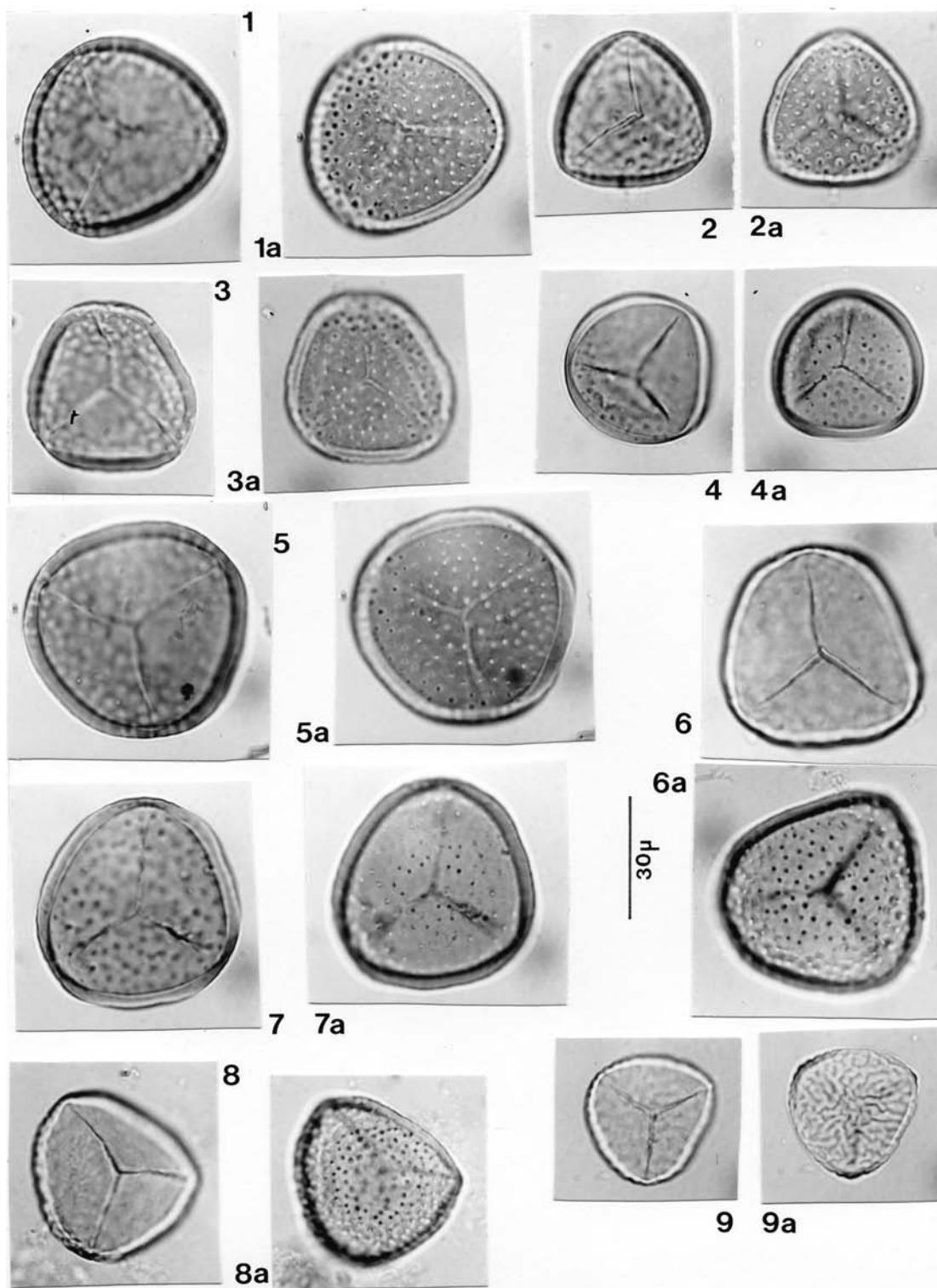


Lámina 1. LYCOPODIACEAE-HUPERZIA.-*Huperzia brevifolia*: (1) cara proximal, (1a) cara distal; *Huperzia brongniartii*: (2) cara proximal, (2a) cara distal; *Huperzia callitrichifolia*: (3) cara proximal, (3a) cara distal; *Huperzia capellae*: (4) cara proximal, (4a) cara distal; *Huperzia crassa*: (5) cara proximal, (5a) cara distal; *Huperzia cruenta*: (6) cara proximal, (6a) cara distal; *Huperzia diana*: (7) cara proximal, (7a) cara distal; *Huperzia dichaeoides*: (8) cara proximal, (8a) cara distal; *Huperzia dichotoma*: (9) cara proximal, (9a) cara distal.

4 μm , con distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial variable entre 475 a 50 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal de 3 μm y en los vértices 2 μm .

H. brongniartii (Spring.) Trevisan, Atti. Soc. Ital. Sci. Nat. **17**: 248. 1874.

Lectotipo: (Escogido por Spring en 1842), Bolivia, Yungas. D'Orbigny 227, (Holotipo P, isotipo BR)

Plantas monomórficas, hojas de margen fimbriado, dentado o ciliado, lanceoladas, con márgenes revolutos, uniformes, esporangios 1.5-2.5 mm de diámetro.

Se ha encontrado en Antioquia, Cauca y Putumayo, entre 1900-4500 m. En barranco o peña húmeda, cubiertos de musgo.

Material: Colombia. Colección I.C.N., C. Barbosa No. 8636, COL 365681. Lámina 1, fig. 2 y 2 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa a ligeramente circular.

Laesura: Se extiende hasta el ecuador de la espora, con comisura recta a ligeramente ondulada. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1 μm , recto y claramente saliente.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , con separación variable entre 1.5 a 3 μm , y con distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial variable entre 35 y 43 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal 3 μm , y en los vértices 2 μm .

H. callitrichifolia (Mett.) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 71. 1985.

Tipo: Colombia, Bogotá, Triana s.n. (Holotipo, ex Herb. Mettenius B.)

Planta dimórfica, epífita, péndula; con hojas pequeñas orbiculares, oblongas a anchamente ovadas; esporofilos iguales o más largos que los trofófilos; estos de ca 1 mm de diámetro.

Se ha coleccionado en Antioquia, Boyacá, Cauca, Risaralda y Tolima, entre 1280-3400 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., G. Lozano N° 3943, COL 358842. Lámina 1, fig. 3 y 3 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa a ligeramente circular.

Laesura: Se extiende hasta el ecuador de la espora, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1 μm , psilado, saliente, y recto a ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , con separación variable entre 1.5 a 4.5 μm , y con distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Diámetro máximo ecuatorial variable entre 37 a 45 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal de 3.5 μm , en los vértices 1.5 μm aproximadamente.

H. capellae (Herter) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 71: 1985.

Tipo: Ecuador, Prov. Napo, E del volcán Cayambe, entre Río Boquerón y Río Arturo, Drew E. 314 (Lectotipo US, Isotipo MSC).

Terrestre, monomórfica, erecta; hojas verdes, herbáceas algo brillantes, las hojas de las divisiones basales en verticilos de 5-6, con margen entero o esclerosado, esporangios de ca 2 mm anchos.

Crece en las tres cordilleras; Antioquia, Caldas, Cundinamarca y Tolima de 3390-4200 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., A.M. Cleef No. 8413, COL 164638. Lámina 1, fig. 4 y 4 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1.5 μm , psilado, recto a ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la proximal. Diámetro de las foveolas 1.5 μm , separación entre ellas de 1 a 6 μm , con distribución muy irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Diámetro máximo ecuatorial entre 37 y 42 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal 3.5 μm , y en los vértices 2 μm .

H. crassa (Humb. et Bompl. ex Willd.) Rothm., Feddes Repert. Spec. Nov. Regni Veg. **54**: 60: 1944.

Tipo: Ecuador, Humboldt & Bonpland 2263 (Holotipo BM, Isotipo P)

Planta terrestre monomórfica, erecta; hojas en verticilos irregulares, linear-lanceoladas, imbricadas con tintes rojizos, rugosas por el envés; esporangios 1.5-2 mm. de ancho.

Se halla desde Santander y Caldas hasta Nariño y en la Sierra Nevada de Santa Marta; de 3300-4700 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., A.M. Cleef No. 5839, COL 305739. Lámina 1, fig. 5 y 5 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta el ecuador, con comisura ligeramente curvada. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1 μm , psilado, saliente, recto a ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , separación entre ellas de 2 a 7 μm , con distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 43 y 56 μm . Grosor de la sclerine en el área interr radial 3 μm y en los vértices 2 μm .

H. cruenta (Spring) Rothm., Feddes Repert. Spec. Nov. Regni Veg. **54**: 59. 1944.

Tipo: Purdie, Nueva Granada (Lectotipo K, seleccionado Øllg. 1989)

Plantas erectas, monomórficas con hojas lanceoladas, tallos erectos; margen de las hojas esclerosado por células gruesas. Crece en lugares pantanosos, en vertientes húmedas, en bosque, páramo y subpáramo.

En Antioquia, Arauca, Boyacá, Cundinamarca, Caldas y Cauca entre 3000-4100 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., A.M. Cleef No. 9260., COL 164741 Lámina 1, fig. 6 y 6 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa a ligeramente circular.

Laesura: Se extiende hasta muy próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1.5 μm , psilado, recto a ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , separación entre ellas de 3 a 5.5 μm , con distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 40 a 54 μm . Grosor de la sclerine en el área interr radial entre 4 a 5 μm , y en los vértices 2 μm .

H. dianae (Herter) B. Øllg., Opera Bot. **92**: 169. 1987.

Tipo: Earl. L. Core 388, Colombia, Antioquia (Holotipo US 2203759)

Planta erecta, terrestre, monomórfica, hojas elípticas, ovado-lanceoladas o triangulares, de margen entero. Crece en zonas pantanosas o en terrenos rocosos, drenados.

Se ha coleccionado en Colombia, en el páramo de Frontino, entre 3400-4000 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Jose Santa No. 1178, COL 298936. Lámina 1, fig. 7 y 7 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta muy próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de 1 μm , psilado, saliente y ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilado por la proximal. Diámetro de las foveolas de 1 μm , separación entre ellas de 2 a 4 μm , con distribución muy irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 48 a 55 μm . Grosor de la sclerine en el área interr radial de 3 μm y en los vértices 2 μm .

H. dichaeoides (Maxon) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 72. 1985.

Tipo: Guatemala, Alta Verapaz, Cook & Griggs 251 (Holotipo US 408034)

Planta epífita, péndula, dimórfica, hojas imbricadas, uniformes en el tamaño y forma, elípticas, oblongas u obovadas, esporangios 0.7 – 1 mm de ancho.

Se ha encontrado en los departamentos de Antioquia, Chocó, Valle y en la Isla Gorgona, desde el Nivel del mar hasta 1900 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., W. Devia et al. No. 3988, COL 392451. Lámina 1, fig. 8 y 8 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta el ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de 1 μm , psilado, saliente, recto a ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , separación entre ellas de 2 a 3 μm , distribuidas en series irregulares paralelas al ecuador. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial variable entre 37 a 48 μm . Grosor de la sclerine en el área interrredial 3 μm , en los vértices 2 μm .

H. dichotoma (Jacq.) Trevisan, Atti. Soc. Ital. Sci. Nat. **17**: 248. 1874.

Tipo: Jacq., Hort. Bot. Vind. **3**: t. 45. 1776. (Lectotipo seleccionado por Proctor, 1977)

Plantas epifitas, monomórficas, hojas dispuestas en 5 o 6 verticilos alternos, linear-subuladas, herbáceas, con márgenes enteros, esporangios 1-1.5 mm de ancho.

Se ha encontrado en regiones bajas de Antioquia y Chocó, a menos de 700 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., E. Forero No. 3792, COL 197855. Lámina 1, fig. 9 y 9 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 2 μm , psilado, saliente, recto a ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie finamente foveolada por la cara distal dando pequeños surcos irregulares, y superficie psilada por la cara proximal. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 30 a 36 μm . Grosor de la sclerine en el área interrredial 3 μm y en los vértices 1.5 μm .

H. eversa (Poir.) B. Øllg., in: Harling & Andersson (eds.) Fl. Ecuador **33**: 28. 1988.

Tipo: Ecuador, Tungurahua. Nee D.D. s.n. (Holotipo B-Willd-19419)

Planta terrestre, erecta, monomórfica, hojas uniformes, linear, lanceoladas, dispuestas en 5 o 6 verticilos alternos, con márgenes ciliados o denticulados, esporangios 1-1.5 mm de diámetro.

Crece en la región andina desde Norte de Santander hasta Nariño y Putumayo y en la Sierra Nevada de Santa Marta, de 1900-4500 m. En lugares pantanosos o peñascos muy húmedos

Material: Colombia. Colección I.C.N. Luis Alfredo Camargo et al. No. 7868, COL 234343. Lámina 2, fig. 1 y 1 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta el ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1.5 μm , psilado, saliente y recto.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , con separación entre ellas de 2 a 6 μm y distribuidas en líneas irregulares paralelas. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 40 a 48 μm . Grosor de la sclerine en el área interrredial 4 μm y en los vértices 2.5 μm .

H. firma (Mett.) Holub, Folia Geobot. Phytotax **20**: 72. 1985.

Tipo: Colombia, Bogotá, La Peña, Lindig 1521 (Holotipo P, Isotipo B, K)

Planta terrestre erecta, monomórfica, hojas uniformes, linear a subuladas, coriáceas, márgenes denticulados, 14-20 seriadas. Esporangios 1.5-2 mm de diámetro. En barrancos húmedos.

Crece en el centro y sur de la región andina de Colombia, entre 2000-3900 m.

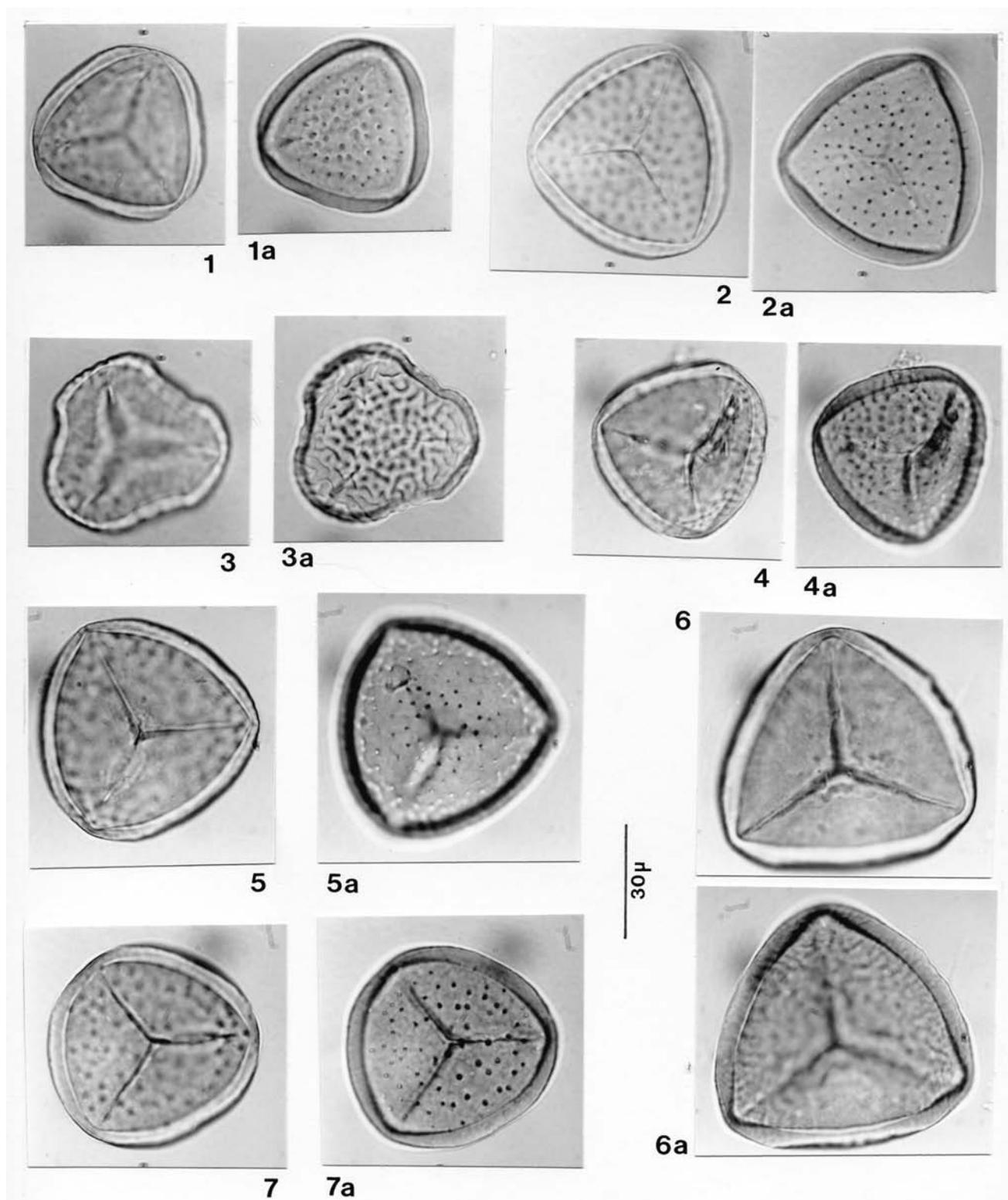


Lámina 2. *Huperzia eversa*: (1) cara proximal, (1a) cara distal; *Huperzia firma*: (2) cara proximal, (2a) cara distal; *Huperzia funiformis*: (3) cara proximal, (3a) cara distal. *Huperzia hippuridea*: (4) cara proximal, (4a) cara distal; *Huperzia lignosa*: (5) cara proximal, (5a) cara distal; *Huperzia molongensis*: (6) cara proximal, (6a) cara distal; *Huperzia ocanana*: (7) cara proximal, (7a) cara distal.

Material: Colombia. Colección I.C.N., A.M. Cleef & P.A. Florschütz No. 5971, COL 165150. Lámina 2, fig. 2 y 2 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende aproximadamente hasta 4 μm del ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de 1 μm , psilado, saliente y recto.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de 1 μm , separación entre ellas de 1.5 a 6 μm , con distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 51 a 62 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal de 5 μm y en los vértices 2 μm .

H. funiformis (Cham. ex Spring) Trevis., Atti. Soc. Ital. Sci. Nat. **17**: 248. 1874.

Tipo: Guadeloupe, L'Herminier s.n. (Lectotipo P seleccionado por Spring 1849)

Plantas epifitas, robustas, péndulas, hojas en verticilos alternos, linear-subuladas, herbáceas, con márgenes enteros, esporangios de 1-1.5 mm de diámetro.

Se ha encontrado en Cauca y Valle del Cauca, entre 50-100 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., J. Santa et al. No. 1048, COL 299962. Lámina 2, fig. 3 y 3 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular, con lados ligeramente convexos y vértices redondeados, próxima a poligonal.

Laesura: Se extiende próxima al ecuador, con comisura ligeramente ondulada. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1 μm , psilado, saliente y ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Foveolas poco marcadas, de aproximadamente 1 μm . No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 40 a 51 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal de 3 μm y en los vértices 2 μm .

H. hippuridea (H. Christ) Holub, Folia Geobot. Phytotax **20**: 73. 1985.

Tipo: Costa Rica, Pittier 10619 (Holotipo P).

Planta terrestre, erecta, monomórfica, hojas en verticilos alternos apretadas al tallo, linear-subuladas, base decurrente, márgenes revolutos, enteros, esporangio 1.5-2 mm de diámetro.

Se encuentra ampliamente distribuida en la cordillera Oriental, de Norte de Santander hasta Meta, en la Serranía de Perijá y en la Guajira, entre 400-3500 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Joseph A. Ewan No. 16295, COL 307394. Lámina 2, fig. 4 y 4 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de 1.5 μm , psilado, saliente y recto.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , separación entre ellas de 1.5 a 3 μm , distribuidas en series irregulares paralelas al ecuador. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 42 y 49 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal de 3 μm y en los vértices 2 μm .

H. lignosa (Herter) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 74. 1985.

Sintipo: Colombia: Santander, Pamplona. Linden 1235 (BM, K, P)

Planta terrestre monomórfica de tallos gruesos, hojas pequeñas y coriáceas.

Crece en zonas drenadas y en vertientes secas; registrada solo para Colombia en Boyacá y en los dos Santanderes, entre 3000 y 3900 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Jose Santa & Margarita Escobar No. 1096, COL 298985. Lámina 2, fig. 5 y 5 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de 1 μm , psilado, claramente saliente y recto.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , separación entre ellas de 2.6 μm y distribución muy irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 53 a 59 μm . Grosor de la sclerine en el área interr radial de 4 μm , y en los vértices 3 μm .

H. molongensis (Herter) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 75. 1985.

Tipo "Molong" Pearce s.n. (Holotipo K)

Planta epífita, péndula, dimórfica; hojas lanceoladas a lanceolado-ovadas, 10-18 mm de largo, planas o con márgenes muy ligeramente revolutos, hojas fértiles 3-8-mm largas, carinadas.

Ha sido coleccionada en las cordilleras Central y Occidental, en Cauca, Tolima y Valle del Cauca, entre 3000-3500 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Jose Santa & Linda de Escobar No. 852, COL 267186. Lámina 2, fig. 6 y 6 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta el ecuador, con comisura recta con pequeñas ondulaciones. Margo formando pliegue apertural de 2 μm , psilado, saliente y recto y con pequeñas ondulaciones.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Las foveolas muy poco marcadas. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 64 a 70 μm . Grosor de la sclerine en el área interr radial de 6 μm y en los vértices 3 μm .

H. ocanana (Herter) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 75. 1985.

Tipo: Colombia: Ocaña, Schlim 472; (Lectotipo P, Isolectotipo B selecc. por Øllg. 1989)

Planta terrestre monórfica; hojas lanceoladas. Crece en subpáramos en áreas secas o terreno bien drenado.

En Antioquia, Cesar, Cundinamarca, Magdalena, y Valle, entre 3000-4100 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., A.M. Cleef No. 7436, COL 165148. Lámina 2, fig. 7 y 7 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural entre 1.5 a 2 μm , psilado, saliente y recto.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , separación entre ellas de 1.5 a 8 μm y distribución muy irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 48 a 62 μm . Grosor de la sclerine en el área interr radial de 4 μm y en los vértices 3 μm .

H. pearcei (Baker) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 75-1985.

Tipo: Bolivia, Sta. Cruz. Pearce s.n., (Holotipo: K; Isotipo BONN-Nessel 116)

Planta terrestre monórfica, hojas lanceoladas, erectas o recurvadas, herbáceas a subcoriáceas, márgenes denticulados. Se encuentra en páramo abierto.

En Colombia solo se tienen registros del departamento de Magdalena, en la Sierra Nevada de Santa Marta, entre 2300-2400 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., M.B. Foster No. 1390, COL 67013. Lámina 3, fig. 1 y 1 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de 1.5 μm , psilado, saliente y recto con pequeñas ondulaciones.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , separación entre ellas entre 1.5 a 5 μm y distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 57 a 64 μm . Grosor aproximado de la sclerine en el área interr radial entre 4 a 5 μm y vértices entre 2 a 3 μm .

H. subulata (Poiret) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 77. 1985.

Tipo: Chile. (Lectotipo designado por Øllg. 1988)

Planta péndula, epífita, dimórfica, hojas lanceoladas a linear-lanceoladas 1.3-2 mm anchas, hojas fértiles ovadas o subcordadas, mucronadas, esporangio 1.2-1.5 mm de diámetro.

Se ha encontrado epífita sobre *Brunellia* e *Hypolepis* o en barrancos húmedos musgosos. En la región andina desde Antioquia hasta Nariño, entre 2850-3700 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Jose Santa & Saulo Hoyos No. 719, COL 267262. Lámina 3, fig. 2 y 2 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta el ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1.5 μm hasta 3 μm en su punto de unión, psilado, saliente y recto.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de aproximadamente 1.5 μm , separación entre ellas de 3 a 7 μm y distribuidas en líneas irregulares, paralelas al ecuador. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 45 a 64 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal entre 3 a 4 μm y en los vértices entre 2 a 3 μm , relacionado con el tamaño de la espora.

H. reflexa (Lam.) Trevis., Atti. Soc. Ital. Sci. Nat. **17**: 248. 1874. (Ilustración 1)

Tipo: Martinica, J. Martín s.n. (Holotipo P-Lam. 442)

Planta terrestre, erecta, hojas linear-subuladas, en verticilos irregulares, reflexas, 4-8 mm largas, herbáceas a subcoriáceas, con márgenes denticulados o con cilios cortos; bases de las hojas decurrentes. Esporangios 1-1.5 mm de diámetro.

Se encuentra de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá hasta Putumayo y entre 900-3600 m. En zonas húmedas.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Gustavo Osorio No. 118, COL 248708. Lámina 3, fig. 3 y 3 a.

Espora: Trilete.

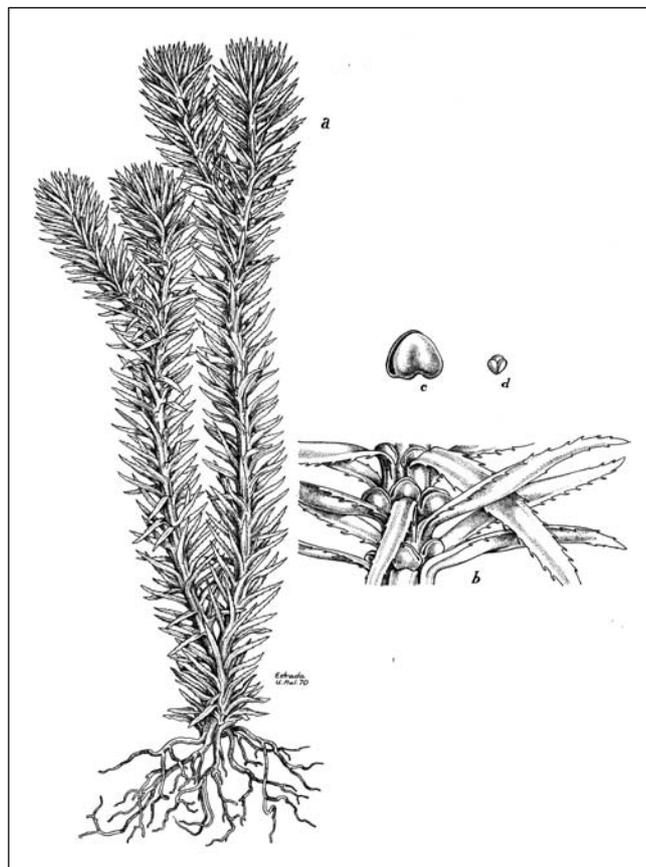


Ilustración 1. *Huperzia reflexa* (Lam.) Trevis. a. Habito de la planta; b. Fragmento fértil; c. Esporangio; d. Espora.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1 μm , psilado, saliente y recto.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de aproximadamente 1.5 μm , separación entre ellas entre 3 a 5 μm y distribución en líneas irregulares paralelas al ecuador. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 40 a 46 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal aproximadamente de 3 μm y en los vértices 2 μm .

H. riobambensis (Nessel) Øllg., Opera Bot. **92**: 169. 1987.

Tipo: Ecuador, Riobamba. Sodiro s.n.

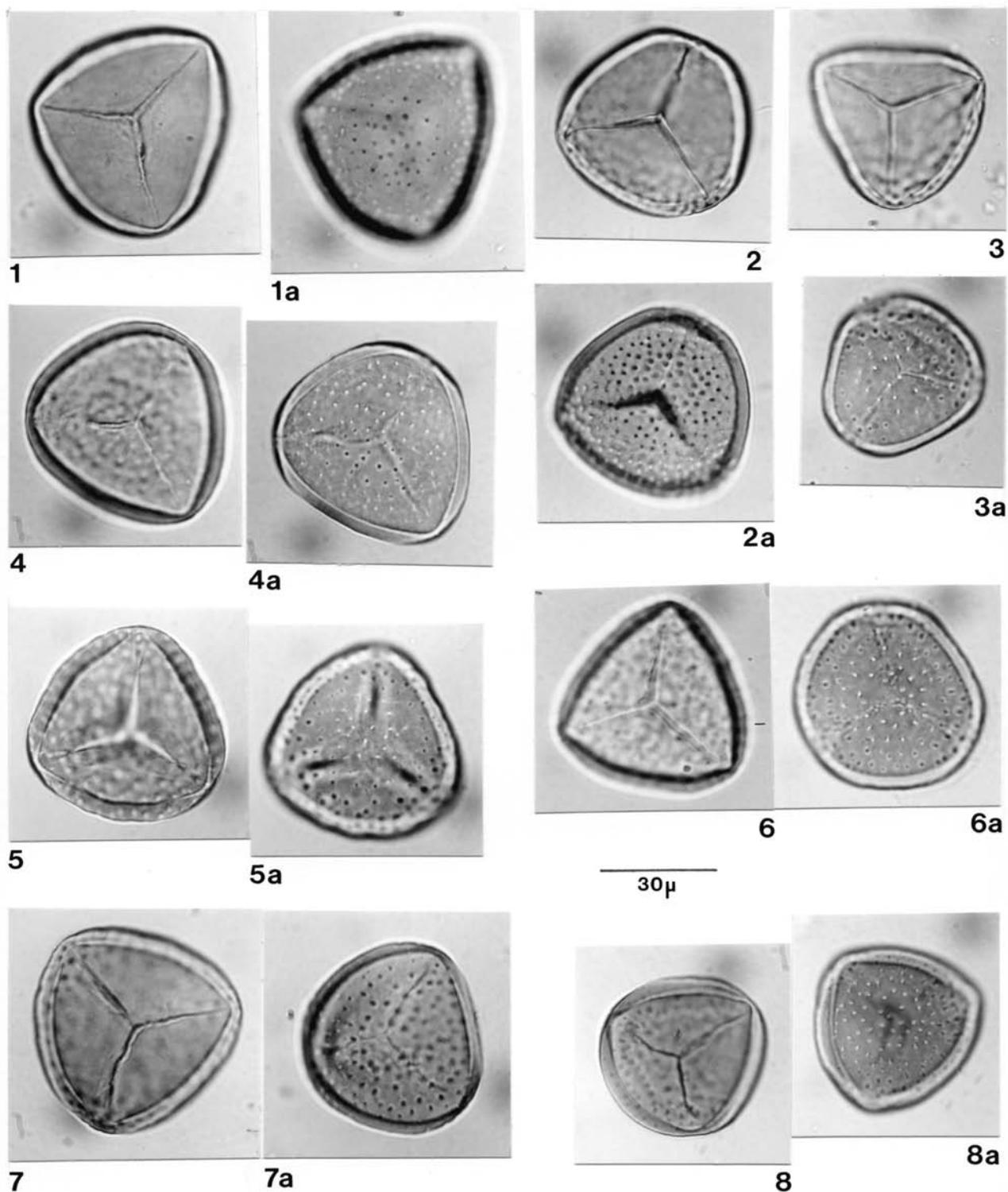


Lámina 3. *Huperzia pearcei*: (1) cara proximal, (1a) cara distal; *Huperzia subulata*: (2) cara proximal, (2a) cara distal; *Huperzia reflexa*: (3) cara proximal, (3a) cara distal; *Huperzia riobambensis*: (4) cara proximal, (4a) cara distal; *Huperzia rosenstockiana*: (5) cara proximal, (5a) cara distal; *Huperzia transilla*: (6) cara proximal, (6a) cara distal; *Huperzia ulixis*: (7) cara proximal, (7a) cara distal; *Huperzia urbanii*: (8) cara proximal, (8a) cara distal.

Planta terrestre monomórfica, hojas reflexas, lanceoladas.

Crece en zonas húmedas, en terreno drenado y asociado con musgos. Registrada solo para Colombia desde el Norte de Santander hasta Cundinamarca y Nariño, entre 2100-3800 m.

Material Colombia. Colección I.C.N., C.E. Acosta Arteaga No. 827, COL 176634. Lámina 3, fig. 4 y 4 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1.5 μm , psilado, saliente, recto a algo undulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de 1 μm , separación entre ellas entre 2 a 5 μm y distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 42 a 50 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal aproximadamente 3 μm y en los vértices 2 μm .

H. rosenstockiana (Herter) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20** : 76. 1985.

Tipo: Ecuador, Tungurahua, Rimbach 130 (Isotipos S, UC, US)

Planta monomórfica, péndula; hojas en verticilos alternos, lanceoladas o angostamente oblongas de 10-15 mm largas y 2-4 mm anchas; las de la mitad mas pequeñas y agrupadas; márgenes esclerificados por células gruesas, especialmente en el ápice.

Se encuentra en el sur de Colombia, en Cauca y Nariño, en lugares húmedos y sombreados entre 3000 -3600 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., B.R. Ramirez-P. No. 3655, COL 339340. Lámina 3, fig. 5 y 5 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa.

Laesura: Se extiende hasta el ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1.5 μm , psilado, saliente, recto a ligeramente ondulado. Es frecuente que la abertura se encuentre abierta y el pliegue apertural de un margo de hasta 3 μm de ancho en ambos lados.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , separación entre ellas entre 2 a 5 μm y distribuidas en líneas irregulares. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 42 a 50 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal de aproximadamente 4 μm y en los vértices 2 μm .

H. transilla (Baker) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 77. 1985.

Tipo: Ecuador, Volcán de Cayambe “al nivel de las nieves perpetuas”, Sodiro s.n. (Holotipo K, Isotipos BP, NY, UC)

Planta terrestre monomórfica, robusta; hojas en verticilos alternos, anchamente ovadas, 10-11 mm largas y 6-8 mm, verdes en ocasiones teñidas de rojo; márgenes enteros o ligeramente crenulados. En lugares húmedos y cubiertos.

Se ha encontrado en Cauca y Chocó entre 3500-4000 m.

Material Colombia. Colección I.C.N., J.H. Torres et al. No. 1854, COL 267895. Lámina 3, fig. 6 y 6 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa a casi circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 2 μm , psilado, saliente y recto a ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de aproximadamente 1.5 μm , separación entre ellas de 1.5 a 5 μm y con distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas Máximo diámetro ecuatorial entre 48 a 52 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal entre 3 a 4 μm y vértices de 2 μm .

H. ulixis (Herter) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 77. 1985.

Tipo: Colombia, Cauca, J. Cuatrecasas 19085 (Holotipo US, Isotipos F, GH)

Planta terrestre monomórfica. Crece en suelos encharcados y áreas muy pobres en vegetación; en páramos y subpáramos.

Conocida solo para Colombia al sur de la region andina, en Cauca y Narino entre 3100-3700 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., J. Cuatrecasas No. 19085, COL 78069. Lámina 3, fig. 7 y 7 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa a subcircular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1 μm , psilado, saliente y recto a ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , separación entre ellas de 2 a 6 μm y distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 48 a 51 μm . Grosor de la sclerine en el área interr radial de 3 μm y vértices 1.5 μm .

H. urbanii (Herter) Holub, Folia Geobot. Phytotax. **20**: 77. 1985.

Tipo: Ecuador, Tungurahua, Spruce 5429 (Isotipos A, C, E, G, GH, NY, OXF).

Planta terrestre monomórfica; hojas 20 a 32 seriadas en verticilos alternos, linear subuladas, 3.5-5 mm. largas, coriáceas; márgenes denticulados a subenteros. En lugares húmedos y sombreados.

Se ha encontrado en Nariño entre 3000-3600 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Jose Santa & L.F. Buitrago No. 934, COL 299981. Lámina 3, fig. 8 y 8 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa, a veces próxima a circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, con comisura recta. Margo formando pliegue apertural de aproximadamente 1.5 μm , psilado, saliente y recto a ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con superficie foveolada por la cara distal y psilada por la cara proximal. Diámetro de las foveolas de 1.5 μm , separación entre ellas de 2 a 6 μm y distribución en líneas irregulares. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 40 a 53 μm . Grosor de la sclerine en el área interr radial entre 3 a 4.5 μm y en los vértices 2 μm .

LYCOPODIELLA

L. glaucescens (C. Presl) B. Øllg., Opera Bot. **92**: 176. 1987.

Tipo: Perú, in montanis ad Huanocco, Haenke s.n. (Holotipo PRC)

Planta terrestre, vastagos erectos, muy ramificados, con ramas largas, pendulas; esporofilos lanceolado-ovados, de bases coalescentes, dentado ciliados; esporangios 0.7 mm. de ancho. Crece en áreas pendientes y húmedas.

En Colombia esta especie se ha encontrado en Antioquia, Boyacá, Cauca y Putumayo, entre 1900-3000 m.

Material Colombia. Colección I.C.N., C. Acevedo et al. No. 8602, COL 365680. Lámina 4, fig. 1 y 1 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Triangular con lados convexos.

Laesura: Se extiende aproximadamente 2/3 del radio, formando un surco o depresión recta.

Sclerine: Exosporio con superficie rugulada. Por la cara proximal las rugulas son menos prominentes. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial variable entre 29 a 37 μm . Grosor de la sclerine en el área interr radial entre 3 a 6 μm y en los vértices 3 μm .

L. lehmannii (Hieron.) B. Øllg., Opera Bot. **92**: 176. 1987.

Sintipo: Colombia: Cauca, Andes de Popayán, Lehmann 6972 (B, BONN-Nessel 390, G, K)

Sobre roca húmeda o en lugares húmedos.

Hasta el momento solo se ha coleccionado en Colombia en el departamento del Cauca 1850 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., José Santa No. 994, COL 299015. Lámina 4, fig. 2 y 2 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Triangular – convexa a subcircular.

Laesura: Se extiende aproximadamente 2/3 del radio, formando un surco o depresión recta.

Sclerine: Exosporio con superficie rugulada. Por la cara proximal las rugulas son menos prominentes. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial variable entre 29 a 34 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal 3 μm y en los vértices 2 μm .

L. pendulina (Hook.) B. Øllg., Opera Bot. **92**: 176. 1987.

Tipo: Perú, Casapi, Matthews 1776 (Holotipo K).

Terrestre, vástagos erectos, escasamente ramificados, con pocas ramitas cortas y pendulas; esporofilos lanceolado-ovados, dentado-erosos, esporangios ca 1 mm de anchos. Creciendo en áreas húmedas sombreadas o expuestas al sol.

Se ha encontrado en Boyacá, Cauca y Nariño, entre 2100-3600 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., M.T. Murillo, J. Uribe & M.A. Harker No. 2260, COL 326720. Lámina 4, fig. 3 y 3 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Triangular – convexa a próximo circular.

Laesura: Se extiende aproximadamente 2/3 del radio formando un surco o depresión recta sobre el exosporio ligeramente engrosado en esta zona.

Sclerine: Exosporio con superficie granulada por la cara proximal a ligeramente rugulada por la cara distal. En algunas esporas se ha observado restos muy delgados de perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial variable entre 39 a 46 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal entre 5 a 6 μm y en los vértices de 2.5 a 3 μm .

L. riofrioi (Sodirot) B. Øllg., Opera Bot. **92**: 176. 1987.

Tipo: Ecuador, en selvas occidentales entre Pichincha y Guala, Sodirot s.n. (Holotipo SI 21230).

Terrestre; hojas lanceoladas a ovado-lanceoladas, aplanadas, imbricadas, los márgenes ciliado-fimbriados; esporofilos deltados, eroso-laciniados, las bases coalescentes; esporangios 0.7-1 mm anchos. En bosque o derrumbes húmedos asociados con musgo.

Hasta el momento se conoce de Cauca, Huila, Meta y Valle, entre 1850-2350 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Elbert Little No. 9359, COL 63394. Lámina 4, fig. 4 y 4 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Triangular – convexa.

Laesura: Se extiende aproximadamente 2/3 del radio, formando un surco o depresión recta.

Sclerine: Exosporio con superficie rugulada; por la cara proximal las rugulas son muy poco pronunciadas. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial variable entre 34 a 45 μm . Grosor de la sclerine en el área interradianal entre 5 a 6 μm y en los vértices de 2 a 3 μm .

LYCOPODIUM

L. thyoides Humb. et Bonpl. ex Willd., Sp. Pl. **5**: 18. 1810. (Ilustración 2)

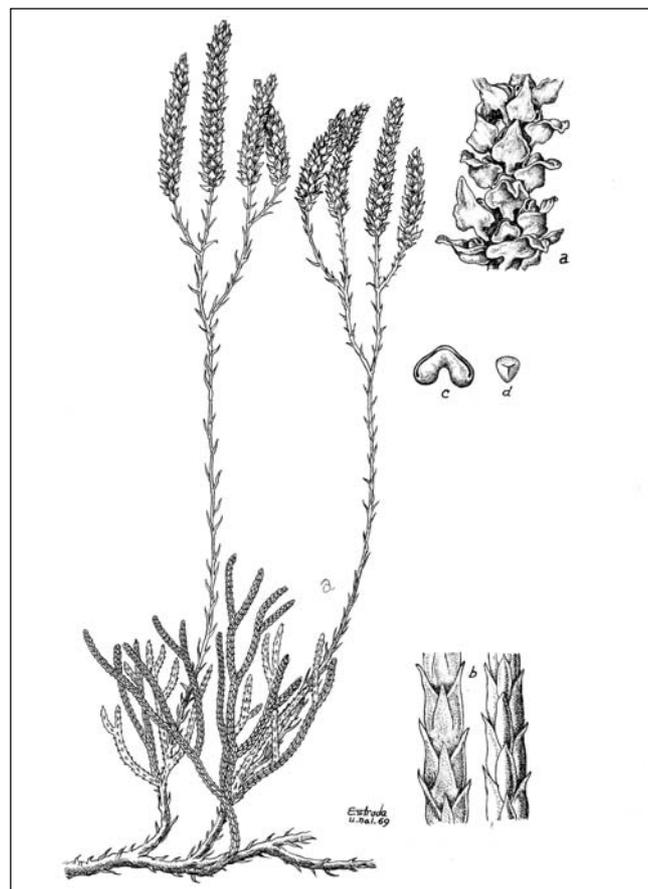


Ilustración 2. *Lycopodium thyoides* Humb. et Bonpl. ex Willd. a. Habito de la planta y fragmento fértil; b. Fragmento estéril; c. Esporangio; d. Espora.

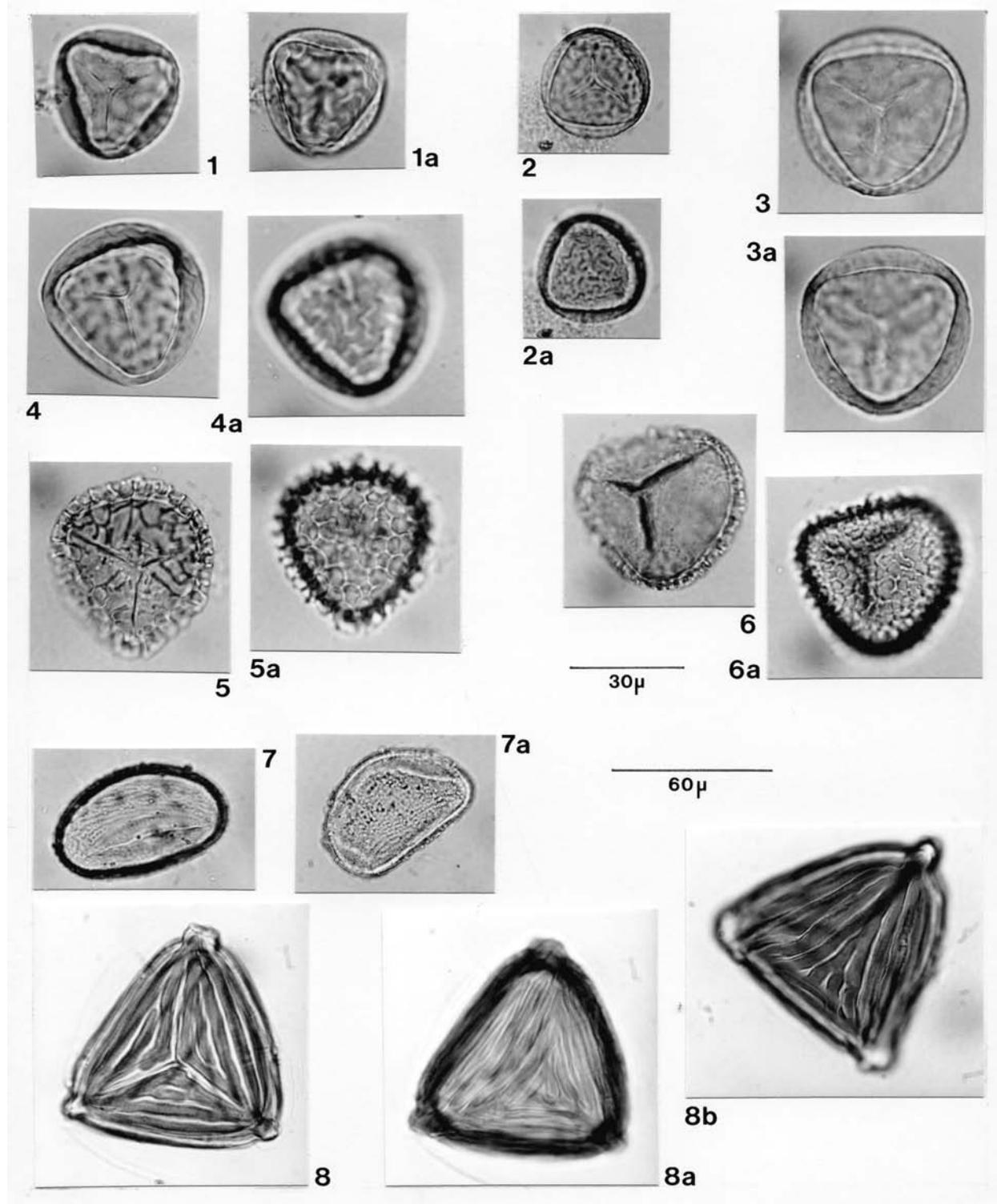


Lámina 4. LYCOPODIELLA.- *Lycopodiella glaucescens*: (1) cara proximal, (1a) cara distal; *Lycopodiella lehmannii*: (2) cara proximal, (2a) cara distal, *Lycopodiella pendulina*: (3) cara proximal, (3a) cara distal; *Lycopodiella riofrioi*: (4) cara proximal, (4a) cara distal; LYCOPODIUM.- *Lycopodium thyoides*: (5) cara proximal, (5a) cara distal; *Lycopodium magellanicum*: (6) cara proximal, (6a) cara distal; SHIZAEACEAE-ACTINOSTACHYS.- *Actinostachys subtrijuga*: (7) se observa la abertura y las estrias del exosporio, (7a) se observan los gránulos del perisporio; ANEMIA.- *Anemia clinata*: (8) cara proximal, (8a) y (8b) cara distal.

Tipo: Venezuela, Caracas, Humboldt s.n. (Holotipo B-Willd 19352)

Rizoma por lo común epigeo, ramitas dorsiventrales anisofilas, aplanadas; hojas en cuatro series, trimorfas; estrobilos sobre pedunculos ramificados; esporofilos subpeltados; esporangios con paredes laterales sinuadas, lisas. En barrancos expuestos al sol.

Es una especie muy común en Colombia, se encuentra en Cundinamarca, Sierra Nevada de Santa Marta y serranía de Perijá, entre 1700-4300 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., José Santa & L. de Escobar No. 638, COL 267362. Lámina 4, fig. 5 y 5 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Triangular – convexa a próximo circular.

Laesura: Se extiende aproximadamente la longitud del radio, recta y rodeada de un pequeño margo de cerca 1 μm de grosor, saliente y psilado.

Sclerine: Exosporio con superficie reticulada. Por la cara distal el retículo es irregular. En la cara proximal el retículo se interrumpe hacia el centro. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial variable entre 35 a 51 μm . Grosor de la sclerine entre 4 a 6 μm .

L. magellanicum (P. Beauv.) Sw., Syn. Fil. **180:** 1806.

Tipo: Chile. Commerson s.n. (G. Herb. Delessert)

Rizoma regularmente subterráneo; ramitas teretes, isofilas; hojas aciculares, acuminadas; estrobilos sésiles, simples, algunas veces en pedúnculos bifurcados; esporofilos peltados. En zonas húmedas descubiertas.

Se encuentra en la region andina en las cordilleras Oriental y Occidental y en la Sierra Nevada de Santa Marta, entre 2900-4100 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Jose Santa & L.F. Buitrago No. 941, COL 300051. Lámina 4, fig. 6 y 6 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Triangular – convexa a próximo circular.

Laesura: Aproximadamente la longitud del radio, recta, y rodeada de un pequeño margo con pliegue apertural de aproximadamente 1.5 a 2 μm , psilado, saliente y ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio con la superficie de la cara distal dando un retículo muy irregular y la cara proximal es ligeramente reticulado-granulada. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial variable entre 40 a 45 μm . Grosor de la sclerine entre 3 a 5 μm .

SCHIZAEACEAE

ACTINOSTACHYS

A. subtrijuga (Mart.) C. Presl. Suppl. Tent. Pterid. **73:** 1846. (1845)

Tipo: Brasil, Amazonas, "in regionibus fluvio Japura", Martius s.n.

Frondas estériles y fértiles iguales; esporangioforos pseudo-digitados; esporangios con anillo apical completo y abertura longitudinal. Sobre afloramientos de arenisca.

Se ha encontrado en Guainia y Vaupes, entre 120-180 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., R. Liesner et al. No. 9102, COL 344293. Lámina 4, fig. 7 y 7 a.

Espora: Monolete.

Vista ecuatorial: Plano – convexa.

Laesura: Próxima a 3/4 del largo de la espora.

Sclerine: Exosporio con finas estrías algo paralelas a la abertura. Perisporio delgado, con gránulos pequeños de máximo 1 μm de alto.

Medidas: Máxima longitud, con perisporio incluido, entre 60 a 74 μm aproximadamente. Altura de la espora aproximadamente entre 35 a 45 μm .

ANEMIA

A. clinata Mickel, Amer. Fern. J. **56:** 58. 1966.

Tipo: Perú, Killip & Smith 25194 (Holotipo US, Isotipos F, NY)

Planta rupicola; tricomas del rizoma pardo-rojizo; Lámina ovada, bipinnada a bipinnado-pinnatifida, anadroma; pinnas fértiles inclinadas, raras veces horizontales, salen por abajo de las pinnas basales estériles y son mas cortas. Se encuentra en lugares escarpados, asociada con *Adiantum*, *Adiantopsis* y *Blechnum occidentale*.

Se ha coleccionado en Boyacá y Meta, entre 380-800 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., J.C. Murillo No. 2653, COL 493122. Lámina 4, fig. 8, 8 a. y 8b.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora y ligeramente ondulada.

Sclerine: Exosporio estriado, con ángulos engrosados en el punto de unión de las estrías dando un saliente y con pequeños gránulos por toda la superficie. La cara proximal con estrías paralelas a los lados, con tendencia a unirse en los vértices. Cara distal con estrías que se unen desde los ángulos hacia el centro formando un pequeño triángulo en el centro de la cara. Perisporio muy delgado, no siempre visible.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 85 a 104 μm . Grosor de la sclerine aproximadamente de 6 μm . Ancho de las estrías de aproximadamente 6 μm , con pequeñas variaciones a lo largo de la estría; espacio entre las estrías entre 2 a 3 μm .

A. ferruginea H.B.K., Nov. Gen. Sp. 1: 32. 1815.

Tipo: Venezuela, Cumana “Prope Guardia de San Agustín”, Humboldt & Bonpland s.n. (Holotipo probablemente en Herbario de Humboldt)

Rizoma horizontal con pelos rojizo marrón; Lámina esteril bipinnada a bipinnado-pinnatisecta, coriacea; Láminas fértiles mas largas que las estériles; espigas mas largas que los peciolos. Sobre piedras de arenisca o suelos muy secos.

En Caldas, Cauca, Cundinamarca, Guajira, Huila, Magdalena, Nariño, Santander, Tolima y Valle, entre 200-1500 m

Material: Colombia. Colección I.C.N., C.E. Acosta Arteaga 877, COL 146669. Lámina 5, fig. 1, 1a. y 1b.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora.

Sclerine: Exosporio estriado, con ángulos engrosados en el punto de unión de las estrías, dando un saliente. En la cara proximal las estrías van de paralelas a oblicuas respecto al ecuador, en número de 5 a 6 en cada zona interradianal. En la cara distal las estrías se unen dando los ángulos hacia el centro de la cara una pequeña quilla y las estrías formando un pequeño triángulo. El ancho de las estrías es variable y cubiertas con pequeños gránulos de aproximadamente 1 μm . Perisporio muy delgado, no siempre visible.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial encontrado, entre 103 a 146 μm , pero la mayoría entre 140 a 145 μm . Grosor de la sclerine aproximadamente entre 9 a 10 μm . Ancho de las estrías entre 5 - 9 μm , separadas por espacios de 1 a 2 μm de ancho. Estrías con gránulos pequeños de aproximadamente 1 μm , por toda la superficie.

A. oblongifolia (Cav.) Sw., Syn. Fil. 156. 1806.

Tipo: Panamá, Nee s.n. (Holotipo MA)

Planta terrestre, tricomas del rizoma anaranjados; Lámina estéril pinnada, 6-10 pares de pinnas, oblongas, de márgenes enteros o denticulados; pinnas fértiles mucho mas largas que las estériles, éstas arrossetadas. En sabanas con arbustos, en lomas lateríticas y suelos arcillosos.

Se encuentra en Boyacá, Cauca, Casanare, Guajira, Huila, Magdalena, Meta y Tolima, entre 100-1700 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., S.G. Smith et al. 1563, COL 40805. Lámina 5, fig. 2 y 2 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora.

Sclerine: Exosporio estriado, con engrosamientos en el punto de unión de las estrías, dando un pequeño saliente, de tamaño variable según los ejemplares. En la cara proximal las estrías van paralelas al ecuador. En la cara distal, las estrías se unen dando los ángulos hacia el centro de la cara y formando un pequeño triángulo en el centro. El ancho de las estrías variable. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial encontrado, entre 67 a 96 μm , pero la mayoría de ejemplares entre 80 a 90 μm . Grosor de la sclerine aproximadamente 5 μm . Ancho de las estrías entre 4 a 5 μm . Espacios entre las estrías de aproximadamente 2 a 3 μm . No se ha observado granulaciones en la superficie de las estrías, solo pequeñas granulaciones en los espacios entre ellas.

A. villosa Willd., Sp. Pl. ed. 4, 5 : 92. 1810.

Tipo: “American meridionale”; Humboldt & Bonpland s.n. (Holotipo B, fotos GH, US)

Planta terrestre; rizoma con tricomas ferrugineos; Lámina estéril pinnado-pinnatifida, cartacea a subcoriacea, linear-oblonga; Láminas fértiles más cortas iguales o mas largas que las estériles. En tierra roja con poca capa vegetal y en talud arcilloso.

Se ha encontrado en Antioquia, Boyacá, Cauca, Cesar, Cundinamarca, Chocó, Magdalena y Valle, entre 1350-2550 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., W. Hagemann 411, COL 426664. Lámina 5, fig. 3, 3 a. y 3b.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora.

Sclerine: Exosporio estriado, con ángulos engrosados en el punto de unión de las estrías, dando un saliente. Cara proximal con estrías paralelas al ecuador y con tendencia a unirse hacia el vértice. En la cara distal las estrías se unen desde los ángulos hacia el centro de la cara, formando un pequeño triángulo. Las estrías con bordes ligeramente ondulados y de ancho variable, en algunos casos con protuberancias de aproximadamente 9 μm de grosor total. En algunos ejemplares se ha observado una débil granulación en la superficie.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial encontrado, entre 112 a 160 μm , pero la mayoría de ejemplares entre 117 a 130 μm . Grosor de la sclerine de aproximadamente 5 μm . Ancho de las estrías aproximadamente entre 5 a 7 μm , con espacios entre ellas de 2 a 3 μm .

A. pastinacaria Moritz ex Prantl, Unters. Morph. Gefässkrypt. 2: 110. 1881.

Tipo: Nueva Granada, Moritz 26 (Lectotipo B designado por Lellinger 1985)

Planta terrestre; tricomas del rizoma anaranjados, Lámina 1 pinnada, las frondas basales no arrosadas; márgenes de las pinnas crenulados o no conspicuamente dentados; las frondas fértiles más largas que las estériles. En lugares sombreados suelos arenosos.

En Casanare, Magdalena, Meta y Tolima, entre 300-880 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., H. Smith No. 1113-A, Lámina 5, fig. 4, 4 a., 4b. y 4c.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa a globosa.

Laesura: Casi la misma longitud del radio de la espora y ligeramente ondulada.

Sclerine: Exosporio estriado con báculos en la superficie y ángulos ligeramente engrosados en el punto de

unión de las estrías. Cara proximal con estrías muy irregulares y cercanamente paralelas al ecuador. En la cara distal, las estrías irregulares se unen formando un pequeño triángulo irregular hacia el centro de la cara. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial encontrado, entre 59 a 105 μm , sin incluir las báculos. Grosor de la sclerine aproximadamente 4 μm . Ancho de las estrías entre 3 a 4 μm , y espacios entre ellas muy variables, debido a su irregularidad. Altura de las báculos variable entre 6 a 14 μm .

A. phyllitidis (L.) Sw., Syn. Fil. 155. 1806.

Lectotipo: Plumier, Traite Foug. Amer. T. 156. 1705. (designado por Proctor 1985)

Planta terrestre; tricomas del rizoma anaranjados; Lámina deltada u oblonga, 1 pinnada; pinnas 4-7 pares, lanceoladas con los márgenes serrulados; pinnas fértiles erectas más largas que las estériles. En bosques sobre suelo arenoso a lo largo de corrientes de agua.

Se ha encontrado en Antioquia, Boyacá, Cauca, Caldas, Cesar, Cundinamarca, Guajira, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Santander y Valle, entre 400-2500 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., C.E. Acosta-Arteaga No. 905, COL 152415. Lámina 5, fig. 5, 5 a, 5 b. y 5 c.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Se extiende próxima al radio de la espora y rodeada por un margo de aproximadamente 2 μm .

Sclerine: Exosporio formando estrías de grosor irregular recubiertas de báculos. Cara proximal con 3 estrías paralelas al ecuador. En la cara distal las estrías se unen desde los ángulos formando un triángulo en el centro. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial encontrado entre 45 a 62 μm sin incluir las báculos. Grosor de la sclerine de aproximadamente 3 μm sin incluir las báculos. Ancho de las estrías variable entre 2 a 3 μm , con separación muy variable entre ellas. Altura de las báculos varía entre 2 a 10 μm .

LYGODIUM

L. radiatum Prantl, Unters. Morph. Gefässkrypt. 2: 66. 1881. (Ilustración 3)

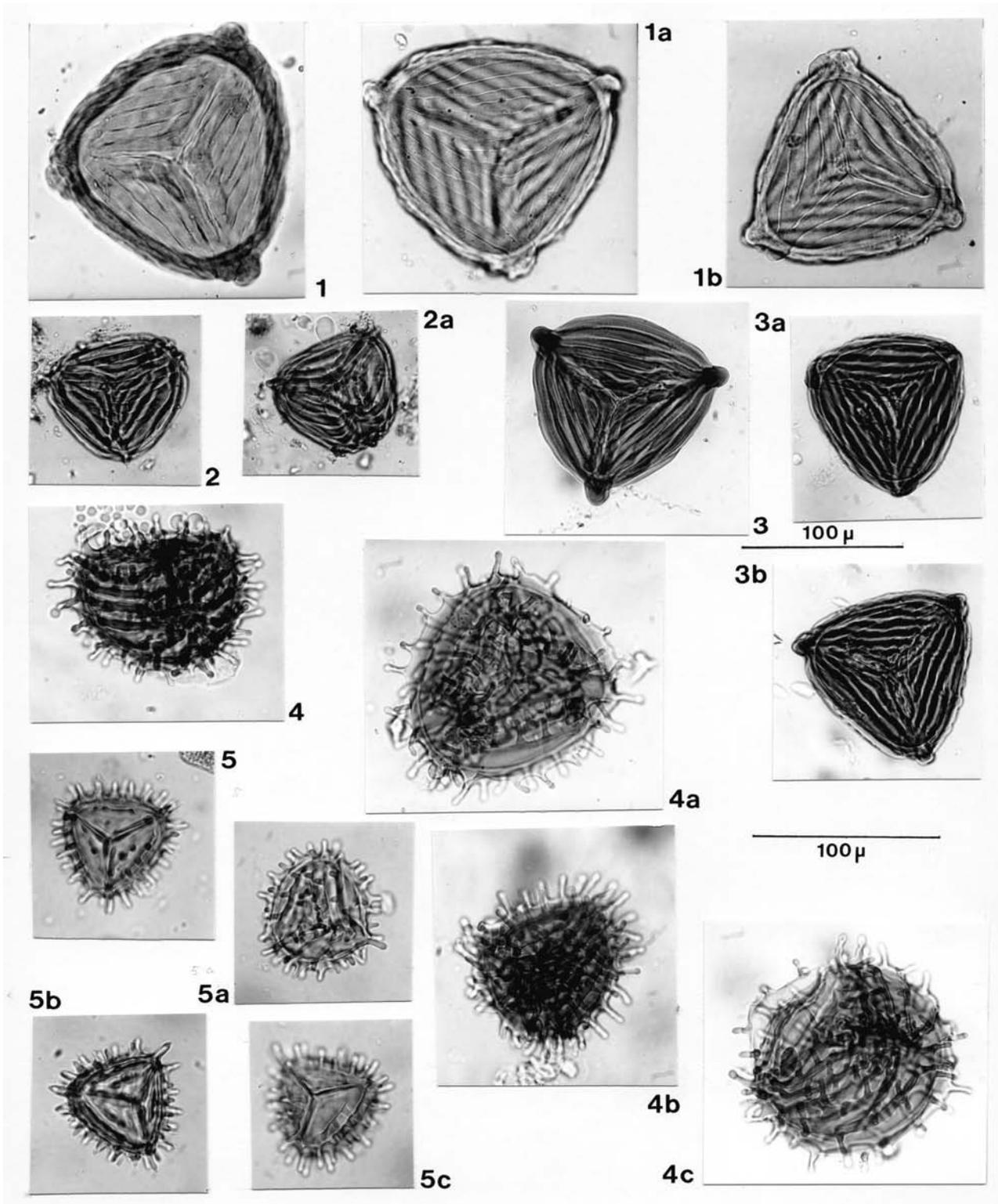


Lámina 5. *Anemia ferruginea*: (1) cara proximal, (1a) cara distal, (1b) cara proximal; *Anemia oblongifolia*. (2) cara proximal, (2a) cara distal; *Anemia villosa*: (3) cara proximal, (3a) cara distal, (3b) cara proximal; *Anemia pastinacaria*: (4) y (4a) cara proximal, (4b) cara distal, (4c) vista lateral; *Anemia phyllitidis*: (5) cara proximal, (5a) cara distal, (5b) y (5c) cara proximal.

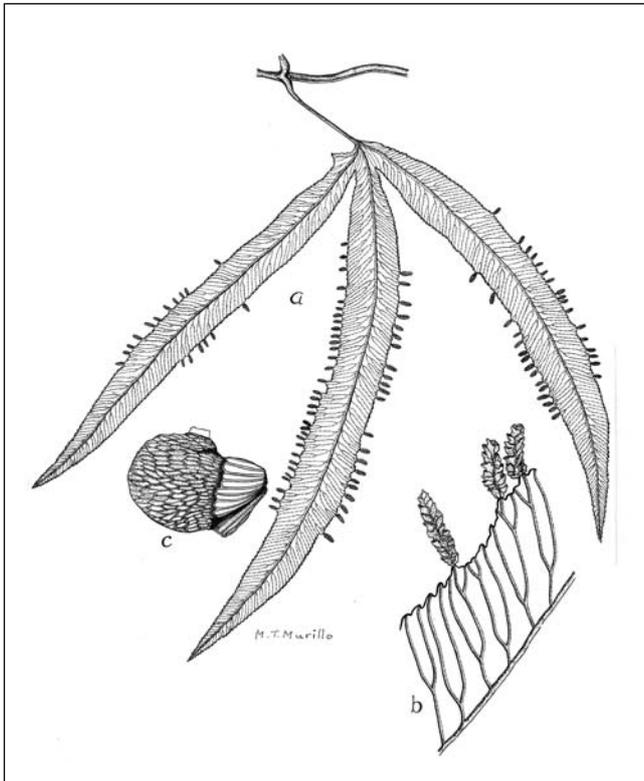


Ilustración 3. *Lygodium radiatum* Prantl. **a.** Pinna; **b.** Fragmento con partes fértiles; **c.** Esporangio.

Sintipo: Colombia, Schott 77 (MO)

Planta terrestre, rizoma reptante con tricomas negruzcos; hojas 2-3 pinnadas, trepadoras; pinnulas 3-4 lobadas; nervadura libre. En bosques húmedos tropicales.

Se ha coleccionado en Antioquia, Chocó, Santander y Tolima, entre 50-670 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Jorge Brand No. 679, COL 386126. Lámina 6, fig. 1 y 1 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Se extiende próxima al radio de la espora, rodeada por un margo de 2 a 3 μm de grosor.

Sclerine: Exosporio liso. Perisporio con gránulos o tubérculos muy irregulares en su distribución, tamaño entre 3 a 8 μm de alto.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo de 102 a 145 μm . Grosor de la sclerine, sin incluir los tubérculos entre 8 y 9.5 μm .

SCHIZAEA

S. sprucei Hooker, Ic. Pl. 11: t. 1016. 1867. (Ilustración 4)

Tipo: Venezuela “Ad flum. Guainia v. rio Negro supra ostium fluminis Casiquiari”, Spruce 3752.

Frondas estériles y fértiles iguales; estipite mas corto o igual a la Lámina, veloso; esporangioforos pectinado-pinnados; esporangios con anillo apical completo y abertura longitudinal. En sabanas abiertas de arenisca.

Se ha encontrado en Amazonas y alrededores del río Caquetá.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Claude Sastre No. 5049.COL 211127. Lámina 6, fig. 2 y 2 a.

Espora: Monolete.

Vista ecuatorial: Cóncavo – convexa.



Ilustración 4. *Schizaea sprucei* Hooker. **a.** Hábito de la planta; **b.** Ápice fértil.

Laesura: Aproximadamente entre 3/4 a igual el largo de la espora.

Sclerine: Exosporio de aproximadamente 2 μm . Perisporio delgado, con gránulos de 1 a 2 μm de alto, la mayoría pequeños y densamente repartidos por toda la superficie.

Medidas: Máxima longitud con perisporio incluido, entre 59 y 68 μm . Altura de la espora entre 32 y 45 μm .

S. stricta Lellinger, Mem. New York Bot. Gard. **18** (2): 1-11. 1969.

Tipo: British Guiana, Appun 12398.

Frondas estériles y fértiles diferentes; estipite más o menos de igual longitud que la Lámina y ésta linear; esporangioforos en los ápices de las frondas; esporangios con anillo apical completo y abertura longitudinal. A orillas de raudal, en suelo arenoso.

Se ha encontrado en Amazonas, Guainía y Vaupés, entre 115-250 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., L.E. Mora APA-160, COL 217276. Lámina 6, fig. 3 y 3 a.

Espora: Monolete.

Vista ecuatorial: Plano – convexa.

Laesura: Entre 3/4 y próxima al largo de la espora.

Sclerine: Exosporio entre 2 y 3 μm . Perisporio delgado aproximadamente 2 μm con gránulos pequeños de máximo 1 μm .

Medidas: Máxima longitud con perisporio incluido entre 50 y 65 μm . Altura de la espora entre 31 y 42 μm .

CYATHEACEAE

ALSOPHILA

A. cuspidata (Kunze) Conant, J. Arnold Arbor. **64**: 371. 1983. (Ilustración 5)

Tipo: Perú, Poeppig 2286 (B)

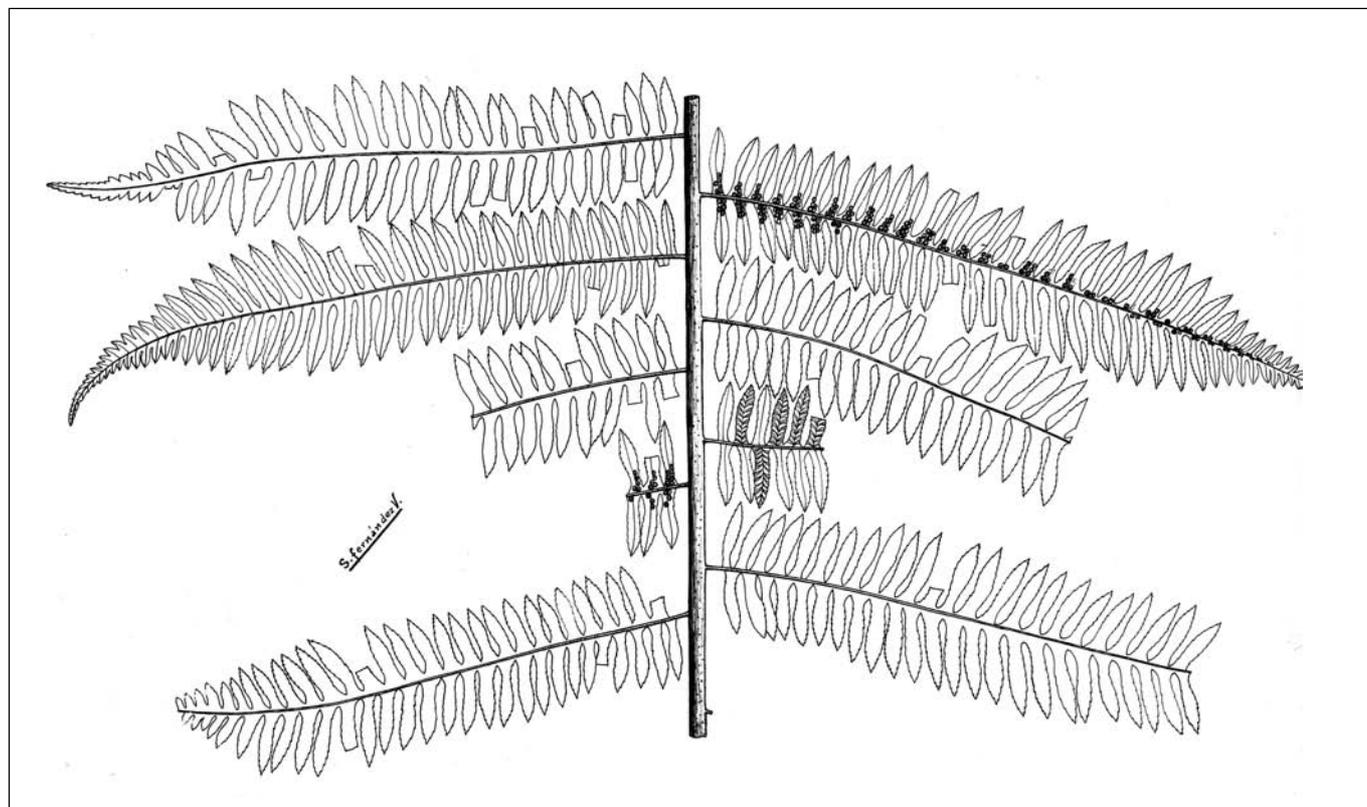


Ilustración 5. *Alsophila cuspidata* (Kunze) Conant. a. Fragmento de pinna.

Planta arborescente de 5-10 m; peciolo espinoso; Lámina bipinnado-pinnatifida, imparipinnada, con alas verdes angostas entre las pinnulas distales sésiles. Escamas del peciolo con una o varias setas, indusio con tricomas estrellados. Bosque lluvioso, cerca a corriente de agua, suelo arenoso.

Se ha encontrado en Antioquia, Cauca, Chocó, Meta, Norte de Santander, Putumayo, Santander y Valle, entre 50-1165 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., J. Cuatrecasas No. 12978b, COL 35856. Lámina 6, fig. 4 y 4 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – cóncava con vértices acusados.

Laesura: Próxima a la longitud del radio, con comisura recta. Margo variable entre 2 a 4 μm en su parte más ancha.

Sclerine: Exosporio psilado. Perisporio granulado, crestas de la superficie de la espora cortas pequeñas y delgadas.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo entre 42 y 59 μm . Grosor de la sclerine entre 2 a 4 μm .

A. erinacea (H. Karst.) Conant., J. Arnold Arbor. **64**: 371. 1983.

Tipo: Venezuela, Karsten s.n. (B).

Planta arborescente; peciolo espinoso, con escamas, éstas con una seta apical; Lámina bipinnado-pinnatifida, imparipinnada; sin alas verdes entre las pinnulas distales. Crece en bosque y lugares soleados.

Se encuentra en Antioquia, Boyacá, Cundinamarca, Nariño y Putumayo, entre 1200-1300 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., C.E. Acosta Arteaga No. 965, COL 167836. Lámina 6, fig. 5 y 5 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa a cóncava, con vértices acusados.

Laesura: Se extiende próxima a la longitud del radio. Margo de aproximadamente 1.5 μm , recto a ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio psilado. Perisporio de aproximadamente 1 μm de grosor, granulado con crestas estrechas y delgadas.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo, sin el perisporio entre 40 a 56 μm . Grosor de la sclerine sin perisporio, aproximadamente 4 μm .

CNEMIDARIA

C. chocoensis Stolze, Fieldiana Bot. **37**: 59. 1974.

Tipo: Colombia, Chocó, San José del Palmar. Lellinger & De la Sota 763 (Holotipo US, Isotipo COL, fotos F, GH).

Arborescente, peciolo sin espinas; Lámina pinnado-pinnatifida; raquis no alado; pinnas sésiles; costa y costulas con escamas de color marrón brillante; venas 2-3-furcadas; soro inframedial, indusio amarillo-marrón pálido, lobado. En bosque húmedo.

Se ha coleccionado en Cauca, Chocó y Nariño, entre 1500-2200 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., P. Franco et al. No. 1516, COL 330762. Lámina 6, fig. 6, 6 a., 6 b., y 6 c.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa a algo circular.

Laesura: Se extiende hasta muy próximo al ecuador. Margo entre 1 a 3 μm , psilado y recto.

Sclerine: Exosporio con una perforación situada en cada área interrredial ecuatorial, con un diámetro que oscila entre 8 y 11 μm . Exosporio psilado en la cara proximal y en la cara distal con perforaciones de tamaño y distribución irregular. En algunos ejemplares se ha observado un perisporio delgado.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo sin perisporio, entre 37 a 45 μm . Grosor de la sclerine sin perisporio, de aproximadamente 8 μm en el área interrredial y de 2 μm en los vértices.

C. ewanii (Alston) Tryon, Contr. Gray Herb. **200**: 52. 1970.

Tipo: Colombia, Putumayo, entre Mocoa y Urcusique, Ewan 16729 (Holotipo BM, Isotipos GH, NO, US).

Arborescente; frondas de 2.5 m largas y 0.5 m anchas; peciolo ligeramente muricado con escamas ovado-lanceoladas; Lámina pinnada, pinnas sésiles truncadas en la base; pinna apical semejante a las laterales, todas crenadas en el margen; venas simples a 1-furcadas; soros inframediales, indusio semicircular. Entre matorrales y en selva primitiva.

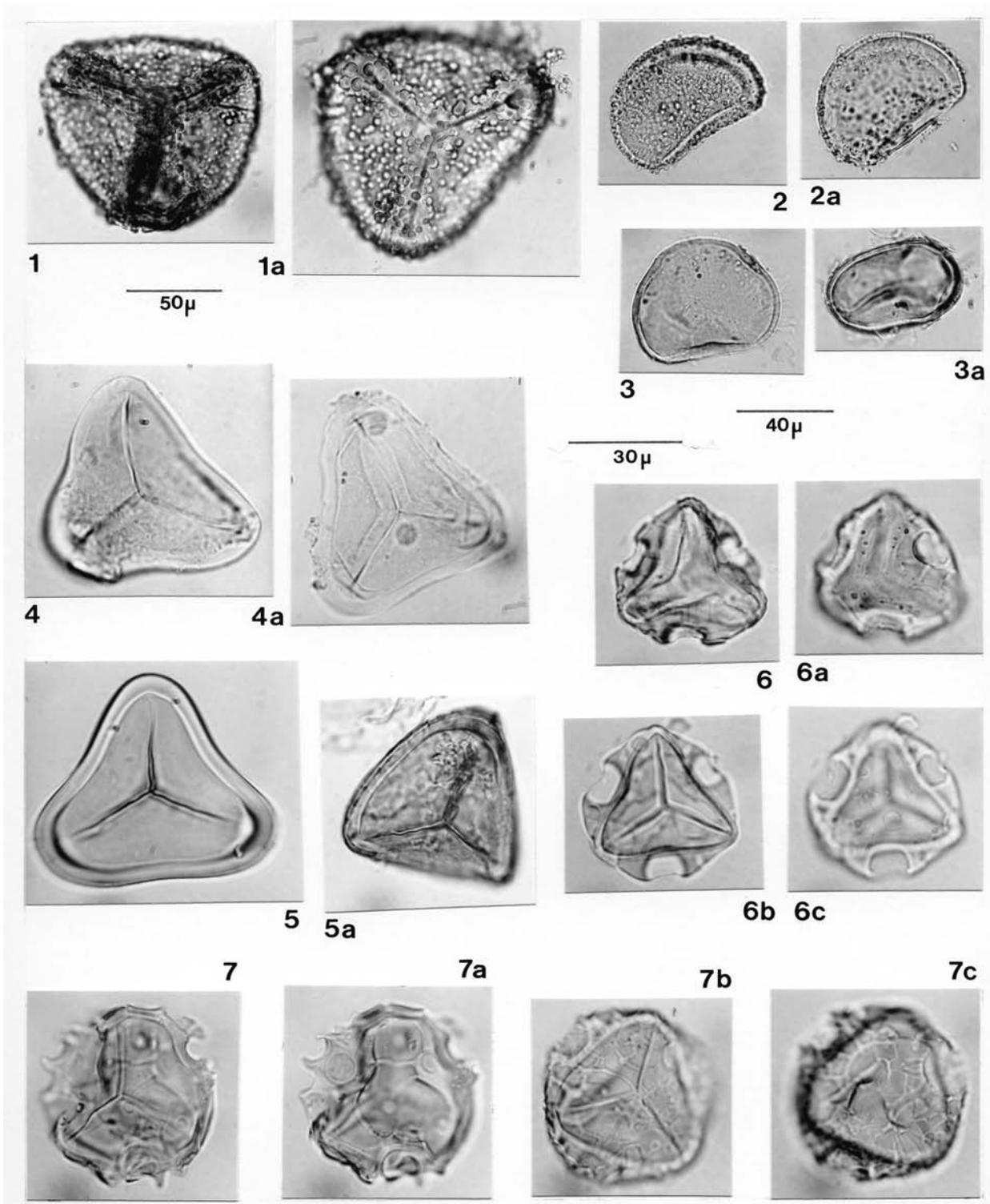


Lámina 6. LYGODIUM.- *Lygodium radiatum*: (1) cara proximal, (1a) distribución de los gránulos. SCHIZAEA.- *Schizaea sprucei*: (2) y (2a): *Schizaea stricta*: (3) y (3a); CYATHEACEAE.-ALSOPHILA.- *Alsophila cuspidata*: (4) y (4a) cara proximal con restos del perisporio; *Alsophila erinacea*: (5) cara proximal, (5a) cara proximal con restos del perisporio. CNEMIDARIA.- *Cnemidaria chocoensis*: (6) cara proximal, (6a) cara distal, (6b) cara proximal, (6c) cara distal; *Cnemidaria ewanii*: (7) cara proximal, (7a) cara distal, (7b) cara proximal con perisporio, (7c) cara distal con perisporio.

Se halla en Caquetá, Chocó y Putumayo, entre 400-1050 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., E.P. Killip No. 35454, COL 18125. Lámina 6, fig. 7, 7 a., 7 b., y 7 c.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – cóncava a circular.

Laesura: Se extiende hasta muy próxima al ecuador. Margo delgado psilado, entre 1 a 2 μm .

Sclerine: Exosporio con una perforación situada en cada área interradianal ecuatorial, con un diámetro entre 5 a 7 μm . Exosporio psilado con perforaciones de tamaño y distribución irregular en ambas caras. El perisporio presenta un retículo irregular.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial sin perisporio, de 32 a 45 μm . Grosor de la sclerine sin perisporio, de 4 a 5 μm en el área interradianal y de 2 μm en los vértices.

C. quitensis (Domin) Tryon, Contr. Gray Herb. **200**: 52. 1970.

Tipo: Ecuador, Andes quitensis, Sodiro s.n. (Holotipo K)

Frondas de 3 m largas y 1 m anchas; peciolo espinoso con escamas bicoloras de márgenes blancuzcos; Lámina con pinna apical igual o casi igual a las laterales; Lámina pinnado pinnatisecta, pinnas sésiles, venas 1-3-furcadas; soro inframedial, indusio semicircular, subentero a lobado. En bosques primario y secundario intervenidos.

Se encuentra en Chocó, Nariño, Norte de Santander, Risaralda y Valle, entre 550- 1600 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., L.E. Mora No. 3975, COL 146570. Lámina 7, fig. 1 y 1 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – cóncava a circular.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador, rodeada por un margo de aproximadamente 3 μm de ancho.

Sclerine: Exosporio con numerosas perforaciones en ambas caras de la espora, especialmente en la distal, con tamaño y distribución irregular. No se ha observado perisporio.

Medidas: Diámetro ecuatorial entre 42 y 48 μm . Grosor de la sclerine de aproximadamente 9 μm en el área interradianal y de 2 μm en los vértices.

C. spectabilis var. **columbiensis** Stolze, Fieldiana Bot. **37**: 63. 1974.

Tipo: Colombia, Valle, Killip 5039 (Holotipo US, Isotipo GH, NY)

Frondas de 1.7 m.; peciolo espinoso con pocas escamas bicoloras lanceoladas en la base; Lámina pinnado pinnatisecta, venas simples 3-furcadas; raquis no alado, pinnas sésiles, 34-42 cm largas x 5-7 cm anchas; segmentos imbricados, con senos cartilaginosos; soros mediales, indusio circular. Común en barrancos.

Se ha encontrado en Chocó, entre 70-1100 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., E. Forero et al. No. 5921, COL 200468. Lámina 7, fig. 2 y 2 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular cóncava.

Laesura: Se extiende hasta próxima al ecuador. Margo psilado aproximadamente de 2 μm .

Sclerine: Exosporio con perforaciones en las caras proximal y distal, de tamaño y distribución irregular. Se observan restos de perisporio en algunas esporas.

Medidas: Diámetro ecuatorial entre 32 a 38 μm . Grosor de la sclerine aproximadamente de 4 μm en el área interradianal y 2 μm en los vértices.

C. uleana var. **abitaguensis** (Domin) Stolze, Fieldiana Bot. **37**: 51-52. 1974.

Tipo: Ecuador, Monte Abitagua, Spruce 5364 (Holotipo K, Isotipo GH, NY, foto F).

Arborescente; frondas de 2 m, peciolo ligeramente muricado; escamas bicoloras con márgenes blancuzcos; Lámina pinnado-pinnatifida con una pinna apical igual o semejante a las restantes, venas 1-3-furcadas; raquis sin escamas liso; soro medial a supramedial, receptáculo elevado, indusio semicircular. En bosques cerca de corrientes de agua.

Se ha encontrado en Antioquia, Huila y Putumayo entre 1800 y 2800 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., L.E. Mora No. 6154, COL 193539. Lámina 7, fig. 3 y 3 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular cóncava.

Laesura: Las comisuras se extienden hasta 3/4 del radio. Margo psilado de aproximadamente 3 μm .

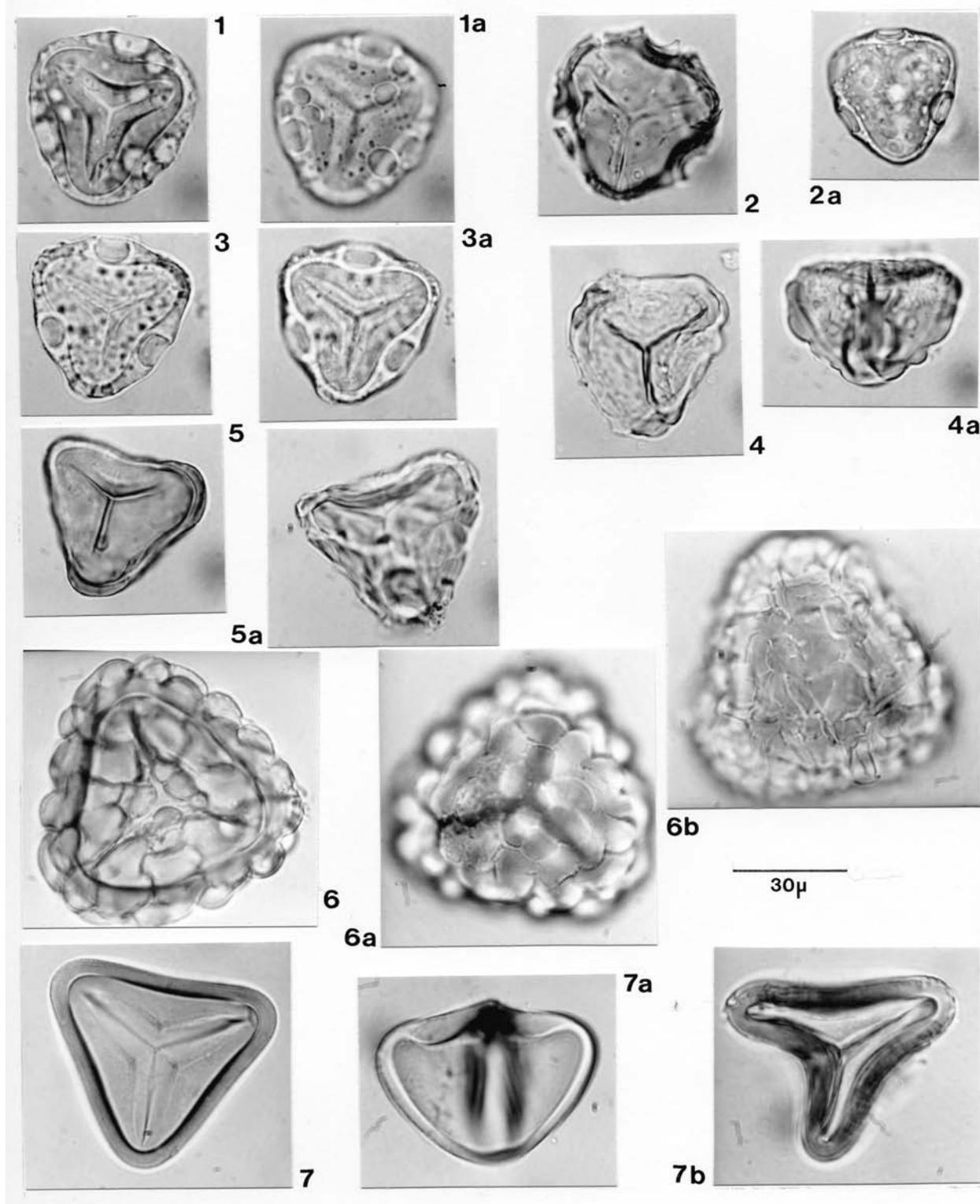


Lámina 7. *Cnemidaria quitensis*: (1) cara proximal, (1a) cara distal; *Cnemidaria spectabilis* var. *columbiensis*: (2) cara proximal, (2a) cara distal; *Cnemidaria uleana* var. *abituaguensis* (3) cara proximal, (3a) cara distal, CYATHEA.- *Cyathea alstonii*: (4) cara proximal, (4a) vista lateral; *Cyathea andina*: (5) cara proximal, (5a) cara proximal con perisporio; *Cyathea aterrima*: (6) cara proximal, (6a) cara distal, (6b) con perisporio; *Cyathea bradei*: (7) cara proximal, (7a) vista lateral, (7b) cara proximal.

Sclerine: Exosporio con perforaciones por toda la superficie de la espora, se destaca una perforación en cada área interradianal ecuatorial, con un diámetro aproximado de 8 μm . Las restantes perforaciones con tamaño y distribución irregular. No se han observado restos de perisporio.

Medidas: Diámetro ecuatorial entre 34 a 43 μm . Grosor de la sclerine aproximadamente de 8 μm en el área interradianal y 3 μm en los vértices.

CYATHEA

C. alstonii Tryon, Contr. Gray Herb. 206: 52. 1974.

Tipo: Colombia, Meta, Sierra de la Macarena, Pico Renjifo, Idrobo & Jaramillo 2157 (Holotipo BM, foto GH).

Arborescente, peciolo con escamas bicoloras, marginadas; Lámina 1-pinnada-pinnatifida; pinnas sésiles, envés glabro o con pocas escamas buladas; soros inframediales, indusio cyatheoide con margen dentado-ciliado.

Especie endémica de Colombia. Se ha coleccionado en el Meta, serranía de la Macarena, entre 1300-1900 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., J.M. Idrobo & R.E. Schulthes No. 1130, COL 69079. Lámina 7, fig. 4 y 4 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – cóncava.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora.

Sclerine: Exosporio formando verrugas entre 2 y 6 μm de ancho, de tamaño y distribución irregular. Se ha observado restos de perisporio delgado con pequeños gránulos.

Medidas: Diámetro ecuatorial entre 36 a 48 μm . Grosor de la sclerine entre 2 y 6 μm , debido a las verrugas.

C. andina (Karst.) Domin, Pterid. 263. 1929. (Ilustración 6)

Tipo: Colombia, Santa Marta, Karsten s.n. (Holotipo B)

Arborescente; peciolo suavemente muricado a esparcidamente aculeado; escamas pardas, oscuras y concoloras; Láminas bipinnado-pinnatifidas a bipinnado-pinnatisectas; glabras o ligeramente escamosas o pubescentes por el envés; soros mediales o supramediales; indusio hemitelioide.

Se ha encontrado en la región andina de Norte de Santander a Putumayo y en Magdalena entre 100 - 600.

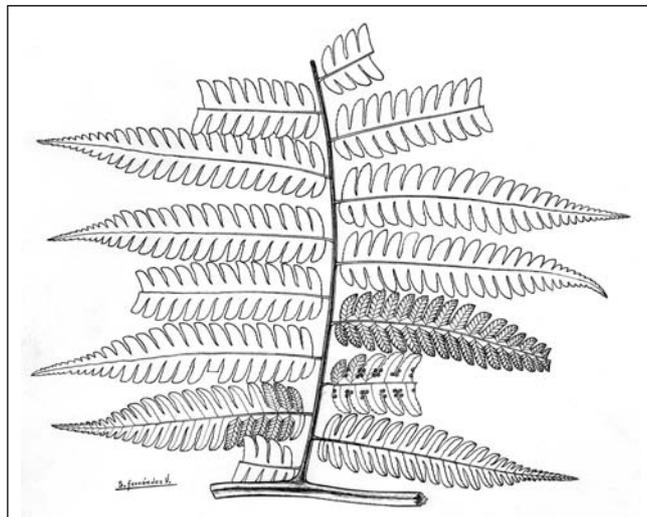


Ilustración 6. *Cyathea andina* (Karst.) Domin. a. Fragmento de pinna.

Material: Colombia. Colección I.C.N., W.R. Philipson, J. Idrobo & A. Fernández No. 1540, COL 40253. Lámina 7, fig. 5 y 5 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular – convexa con vértices acusados.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora. Margo ligeramente ondulado de aproximadamente 1 μm .

Sclerine: Exosporio suavemente ondulado con indicios de verrugas. Perisporio de aproximadamente 1 μm de grosor, formando surcos irregulares mas o menos reticulados.

Medidas: Diámetro ecuatorial entre 38 a 50 μm . Grosor de la sclerine entre 1 y 2 μm en los lados de la espora y 3 μm en los vértices, sin incluir perisporio.

C. aterrima (Hook.) Domin, Pteridophyta 262. 1929.

Tipo: Perú, Tarapoto, San Martín, Spruce 4713 (Holotipo K, Isotipos P, US)

Arborescente; peciolo muricado con escamas y pelos, especialmente en la base; Lámina pinnada a bipinnado-pinnatifida; venas libres; soros con parafisos igual de largos a los esporangios, sin indusio.

Se ha encontrado en Caquetá, Chocó, Guaviare y Meta, entre los 300-1100 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., P. Franco et al. No. 3781, COL 392972. Lámina 7, fig 6, 6 a., y 6 b.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular.

Laesura: Se extiende hasta $3/4$ del radio de la espora. Margo muy delgado, inferior a $1 \mu\text{m}$.

Sclerine: Exosporio con grandes verrugas, de tamaño y forma irregular. A gran aumento se ven muy pequeñas perforaciones en la superficie. Solo se ha observado algún resto de perisporio.

Medidas: Diámetro ecuatorial entre 59 a $74 \mu\text{m}$. Grosor de la sclerine entre 10 y $12 \mu\text{m}$.

C. bradei Windisch, *Bradea* 1: 372. 1973.

Tipo: Colombia, Vaupés, base del cerro Mitú, Schultes, Raffauf & Soejarto 24229 (Holotipo GH).

Arborescente; peciolo escamoso y con espinas; Lámina bipinnado-pinnatifida; pinnas con ápices reducidos muy gradualmente; las venas regularmente areoladas a lo largo de la costa; parafisos más cortos que los esporangios; indusio hemitelioide. En suelo arenoso.

Especie amazónica de los departamentos de Amazonas, Caquetá, Vaupés y Vichada, a menos de 300 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Felix di Giovanni s.n., COL 71756. Lámina 7, fig. 7, 7 a. y 7 b.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Triangular con lados ligeramente cóncavos.

Laesura: Se extiende hasta $3/4$ del radio de la espora. Margo de aproximadamente $5 \mu\text{m}$ de ancho.

Sclerine: Exosporio con muy pequeñas perforaciones en su superficie. Perisporio con gránulos.

Medidas: Diámetro ecuatorial entre 45 a $57 \mu\text{m}$. Grosor de la sclerine sin perisporio, aproximadamente entre 4 a $5 \mu\text{m}$.

C. caracasana (Kloszch) Domin, *Pteridophyta* 262. 1929. (Ilustración 7)

Tipo: Venezuela, Caracas, Moritz 117 (Isotipo GH, P)

Arborescente; esta especie es muy variable en sus caracteres: escuamulas del peciolo, forma de las pinnulas, la pubescencia, las escamas, el indusio; por esta razón, Tryon (1974) definió 5 variedades; otros han preferido

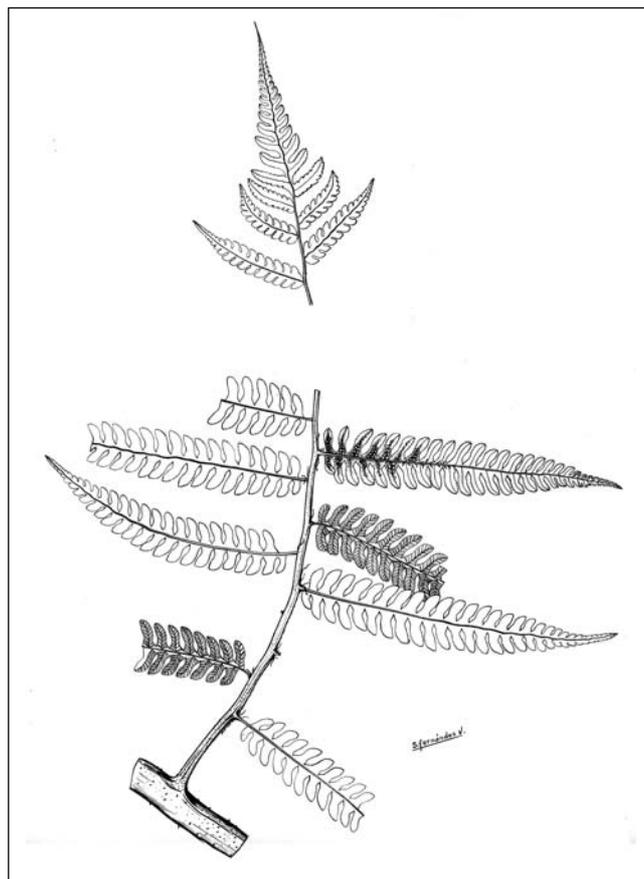


Ilustración 7. *Cyathea caracasana* (Kl.) Domin. Fragmento de pinna.

aceptarlas como especies; de todas maneras, cada una tiene un tipo diferente: *C. caracasana* var. *boliviensis* (Rosent.) Tryon, de Bolivia; *C. caracasana* var. *meridensis* (Karst.) Tryon, de Venezuela; *C. caracasana* var. *caracasana* de Venezuela; *C. caracasana* var. *chimboracensis* (Hook.) Tryon, de Ecuador y *C. caracasana* var. *maxonii* (Maxon) Tryon.

Se ha encontrado en Antioquia, Caldas, Cauca, Cundinamarca, Magdalena, Nariño, Putumayo y Santander, entre 1200 y 4200 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., David S. Barrington No. 521, COL 144835. Lámina 8, fig. 1 y 1 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Las comisuras se extienden hasta $3/4$ del radio. Margo de aproximadamente $1.5 \mu\text{m}$, ligeramente ondulado.

Sclerine: Exosporio muy suavemente verrugado con restos de perisporio. Parece que los esporangios estudiados no estaban completamente desarrollados o maduros y por esto sus esporas presentan las características muy poco marcadas como se puede observar en las fotografías.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo de 30 a 35 μm . Grosor de la esclerine de aproximadamente 2 μm .

C. cyatheoides (Desv.) K.U. Kramer, The Pteridophytes of Suriname 39. 1978.

Tipo: "Habitat in Cajenna" (Holotipo Herb. A.N. Desvaux P, foto GH)

Arborescente; peciolo pubescente, aculeado con escamas basales; Lámina bipinnado-pinnatifida reducida en el ápice, glabra por el envés, venas libres; soros mediales, parafisos más cortos que los esporangios, indusio hemitelioide, membranáceo y bilobado.

Esta especie se ha encontrado en Amazonas y Vaupés, en alturas inferiores a 300 m.

Material: Guyana. Colección I.C.N., T. McDowell No. 3146, COL 363802. Lámina 8, fig. 2, 2 a. y 2b.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Las comisuras se extienden hasta 3/4 de la espora, rodeadas por un grueso margo.

Sclerine: Exosporio aparentemente psilado. Perisporio delgado de aproximadamente 1 μm , formando pequeños pliegues circulares con muy diminutos gránulos.

Medidas Diámetro ecuatorial máximo entre 40 y 53 μm . Grosor de la sclerine aproximadamente entre 2 y 3 μm .

C. decorata (Maxon) Tryon, Contr. Gray Herb. 206: 47. 1976.

Tipo: Colombia, Valle, río Yurumangui, J. Cuatrecasas 15737 (Isotipo US; Paratipo US)

Arborescente; peciolo escamoso, escamas de peciolo marginadas con una seta apical; Láminas pinnado-pinnatifidas a pinnado-pinnatisectas, raquis pubescente, pinnulas ampliamente lobadas a pinnatifidas; peciolo no alado, indusio hemitelioide.

Se ha encontrado solo en Cauca y Chocó, entre 30 y 100 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., David S. Barrington No. 504, COL 146524. Lámina 8, fig. 3 y 3 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora. Presenta un pliegue apertural o margo ligeramente ondulado, de aproximadamente 1 μm .

Sclerine: Exosporio ligeramente verrugado. Perisporio de aproximadamente 1 μm formando un retículo irregular.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo entre 35 y 62 μm . Grosor de la sclerine de aproximadamente 3 μm , sin perisporio.

C. ebenina Karst., Linnaea 28: 461. 1856.

Tipo: Venezuela, entre Caracas y Puerto Cabello, Karsten s.n. (Isotipo B)

Arborescente; peciolo sin espinas, escamas rojizo marrón o atropurpureas; Lámina bipinnado-pinnatifida o tripinnada en la base; pinnulas largamente pecioladas; los segmentos basales decurrentes; Lámina ligeramente pubescente por el envés; soros mediales, indusio sphaeropteroide.

Se ha encontrado en Antioquia, Chocó, Huila y Magdalena, entre 1900-2500 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Elbert L. Little No. 8905, COL 62735. Lámina 8, fig. 4 y 4 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora, recta y rodeada por un grueso margo.

Sclerine: Exosporio aparentemente psilado. Perisporio delgado de aproximadamente 1 μm , con pliegues de distribución irregular y con pequeñas granulaciones.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo entre 48 y 66 μm . Grosor de la sclerine sin perisporio, entre 3 y 4 μm .

C. fulva (Mart. & Gal.) Fee, Mem. Fam. Foug. 9: 34. 1857.

Tipo: Mexico, Oaxaca, Talea, Galeotti 6346 (Holotipo BR, Isotipo P, fragmento BR, US, foto GH)

Arborescente; peciolo con escamas de color marrón, pardas concoloras o con márgenes claros; Lámina bipinnado-pinnatifida; costas con pelos escamas, soros inframediales, parafisos mas cortos que los esporangios, indusio sphaeropteroides.

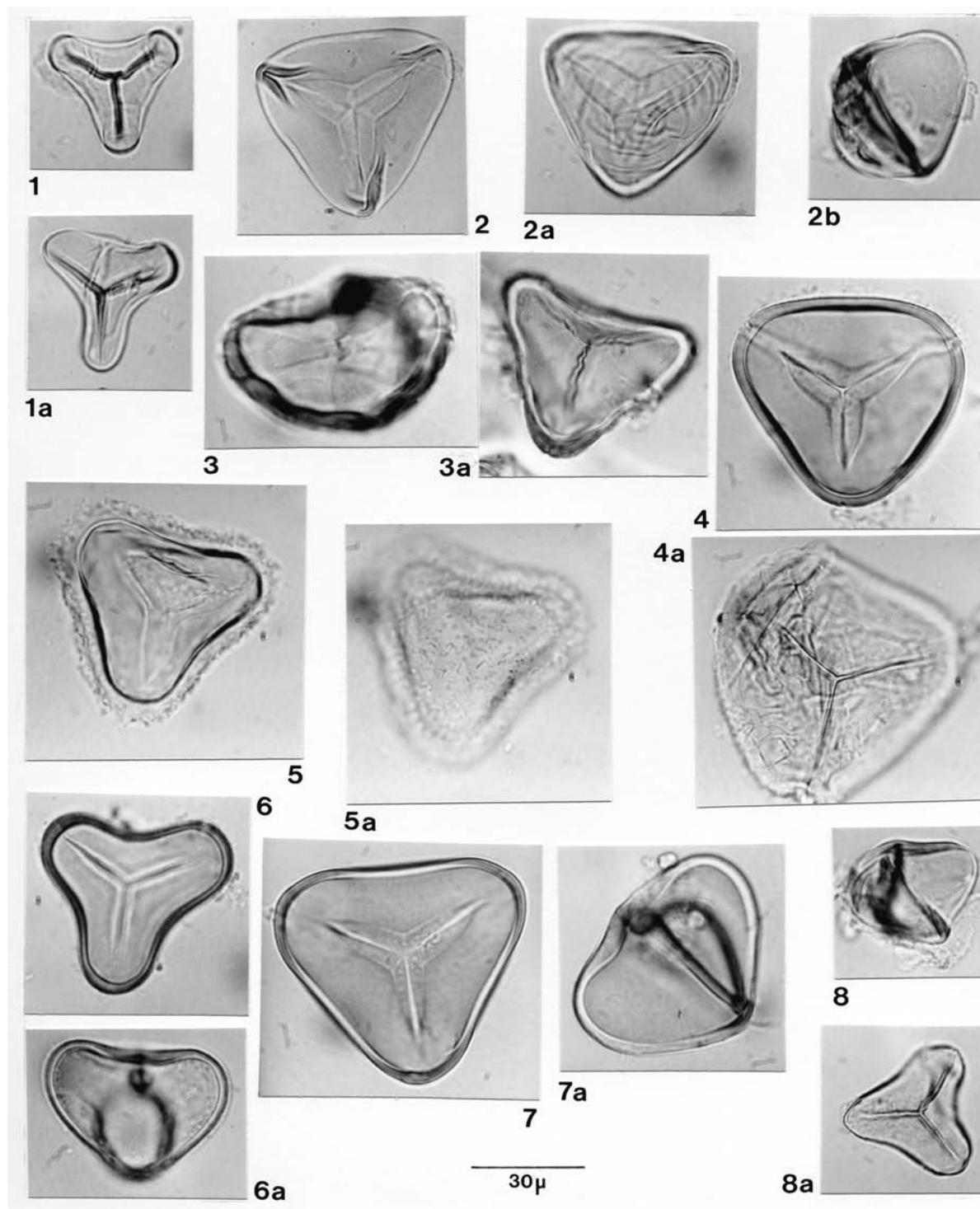


Lámina 8. *Cyathea caracasana*: (1) y (1a) cara proximal; *Cyathea cyatheoides*: (2) cara proximal, (2a) con perisporio estriado con pequeñas espinas, (2b) vista lateral con restos de perisporio; *Cyathea decorata*: (3) vista lateral con perisporio, (3a) vista ecuatorial con restos de perisporio; *Cyathea ebenina*: (4) cara proximal, (4a) cara proximal con restos de perisporio; *Cyathea fulva*: (5) cara proximal, (5a) cara distal; *Cyathea macrosora*: (6) cara proximal, (6a) vista lateral; *Cyathea nigripes*: (7) cara proximal, (7a) vista lateral; *Cyathea pallescens*: (8) vista lateral, (8a) cara proximal.

Se ha coleccionado en Antioquia, Boyacá, Caldas, Cauca, Cundinamarca y Norte de Santander, entre 1800 y 3300 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., M.T. Murillo No. 948, COL 151269. Lámina 8, fig. 5 y 5 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Recta rodeada por un grueso margo, se extiende hasta 3/4 del radio de la espora.

Sclerine: Exosporio en su parte externa recubierta de proyecciones alargadas a modo de pequeños bastones de menos de 1 μm , que posiblemente formarían el perisporio.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo entre 50 y 56 μm . Grosor de la sclerine de aproximadamente 4 μm .

C. macrosora (Baker) Windisch, Bradea 1: 372. 1973.

Tipo: Guiana Británica, Monte Roraima, Thurn 87 (Holotipo K, Isotipo US)

Arborescente; peciolo muricado, escamoso, escamas bicoloras; frondas bipinnado pinnatifidas, las pinnulas sésiles o pecioladas, venación libre, soros mediales, parafisos más largos que los esporangios; indusio flabelado, con uno a dos lobos, algunas veces reducido a una protuberancia del receptáculo, con muchos tricomas.

En Colombia se encuentra en Caquetá y Amazonas en alturas menores de 300 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., H. García-B. No. 14248, COL 58813. Lámina 8, fig. 6 y 6 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Triangular con lados cóncavos.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora. Margo de 2 a 3 μm de ancho.

Sclerine: Exosporio con muy pequeñas perforaciones en su superficie, difíciles de observar. Perisporio muy delgado presentando pequeñas granulaciones.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo entre 43 a 48 μm . Grosor de la sclerine sin perisporio, de aproximadamente 2 μm .

C. nigripes (C. Chr.) Domin, Pteridophyta 263. 1929.

Lectotipo: Ecuador, Chimborazo, Spruce 5742 (Isolectotipo K, seleccionado por D.S. Barrington, 1978).

Arborescente; tallo 6-8 m de alto; peciolo tuberculado a aculeado, escamas del peciolo bicoloras; Lámina bipinnado-pinnatifida, cartacea, venas fértiles simple, parafisos más cortos que los esporangios.

Se ha encontrado en Antioquia, Cauca y Valle entre 1500 y 2000 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., Fernando Giraldo No. 2578, COL 479586. Lámina 8, fig. 7 y 7 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular cóncava.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora. Margo variable entre esporas, anchura máxima entre 3 y 5 μm .

Sclerine: Exosporio con muy pequeñas perforaciones en su superficie poco visibles. No se ha observado perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 48 a 59 μm . Grosor de la sclerine aproximadamente de 2 μm .

C. pallescens (Sodirol) Domin, Pteridophyta 263. 1929.

Tipo: Ecuador, Bosques de Nanegal, Sodirol s.n. (Holotipo P, foto GH)

Arborescente; tallo de 10 m; escamas del peciolo bicoloras; Lámina bipinnado-pinnatifida a tripinnada en la base, glabra o pubescente, escamosa en el envés, venas fértiles regularmente furcadas, algunas venas simples, soros inframediales; indusio sphaeropteroides muy delicado.

Se ha encontrado en Antioquia, Cundinamarca, Huila y Santander, entre 2300-3000 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., J. Cuatrecasas 8438, COL 35853. Lámina 8, fig. 8 y 8 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Recta, se extiende hasta 3/4 del radio de la espora. Margo de aproximadamente 1 μm de grosor.

Sclerine: Exosporio ligeramente verrugado. Se han observado restos de perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 30 a 40 μm . Grosor de la sclerine, sin perisporio, aproximadamente 2 μm .

C. pilosissima (Baker) Domin, Pteridophyta 262. 1929.

Tipo: Perú, Monte Campana, Spruce 4322 (Holotipo K)

Arborescente; peciolo aculeado, escamas lanceoladas, bicoloras; Lámina bipinnado-pinnatifida, cartacea, pinnales sésiles, venas furcadas; soros mediales o supramediales, sin indusio, parafisos mas largos que los esporangios. Se encuentra en bosques lluviosos.

Se ha encontrado en el departamento del Chocó en alturas inferiores de 300 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., D.B. Lellinger No. 714, COL 133926. Lámina 9, fig. 1 y 1 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Recta, se extiende hasta 3/4 del radio de la espura. Margo de aproximadamente 1 μm .

Sclerine: Exosporio en su parte externa recubierto de proyecciones alargadas a modo de pequeños bastones inferiores a 1 μm , que formarían posiblemente el perisporio.

Medidas: Máximo diámetro ecuatorial entre 40 a 50 μm . Grosor de la sclerine aproximadamente 3 μm .

C. pungens (Willd.) Domin, Pteridophyta. 263. 1929.

Tipo: Brasil, Hoffmannsegg s.n (Holotipo B-Herb Willd 19717)

Arborescente; tallo decumbente a erecto, escamas del peciolo cretaceas; Lámina bipinnado-pinnatifida, venas simples o furcadas, soros supramediales, parafisos mas cortos que los esporangios. En bosque primario.

La especie se ha encontrado en Amazonas, Antioquia, Cundinamarca, Magdalena y Putumayo, entre 650 y 1450 m.

Material: Perú. Colección I.C.N., C. Grandez et al. No 2509, COL 386502. Lámina 9, fig. 2 y 2 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Recta, rodeada por un margo de aproximadamente 3 μm , se extiende hasta 3/4 del radio de la espura.

Sclerine: Exosporio aparentemente psilado. En la cara distal de la espura se observa un pliegue que se extiende desde el centro de la espura y se proyecta en los vértices dando un aspecto de valva.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo de 42 a 48 μm . Grosor de la sclerine entre 2 y 3 μm .

C. rufa (Fee) Lellinger, Amer. Fern J. 77 (3): 94. 1987.

Tipo: Brasil, Río de Janeiro, Glaziou 2291 (Hoja II) (Lectotipo P)

Arborescente; de mas o menos 7 m; peciolo y raquis con espinas, escamas bicoloras con margen blanco, Lámina tripinnada; raquis, costa costulas y nervaduras secundarias vellosas, nervadura libre o furcada, envés con muy pequeñas escamas blanquecinas esparcidas, segmentos con márgenes crenados, soros mediales sin indusio.

Se ha coleccionado en Antioquia, Boyacá, Huila y Santander, entre 1600 y 2500 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., R. Jaramillo, M.T. Murillo & T. van der Hammen No. 3563, COL 244804. Lámina 9, fig. 3 y 3 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular concava.

Laesura: Se extiende hasta 3/3 del radio de la espura. Margo aproximadamente de 1 μm de grosor.

Sclerine: Exosporio con muy pequeñas perforaciones poco visibles en la superficie. Perisporio con pequeñas perforaciones formando un retículo irregular.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo de 30 a 36 μm . Grosor de la sclerine cerca de 3 μm .

C. straminea Karst., Linnaea 28: 457. 1856.

Tipo: Colombia, Tolima, Karsten s.n. (Isotipo fragmento B)

Arborescente; peciolo con escamas concoloras; Lámina bipinnado-pinnatifida a tripinnada solo en la base; escamas pardas y tricomas por el envés, pinnulas grandes de 1-2 cm anchas, sésiles o subsésiles; soros mediales, indusio sphaeropteroide, muy delgado. En bosque montañoso.

Se ha encontrado en Caldas, Cauca, Nariño y Putumayo, entre 2000 y 3350 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., David S. Barrington No.482, COL 146516. Lámina 9, fig. 4 y 4 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa.

Laesura: Recta, se extiende hasta 3/4 del radio de la espura. Margo de aproximadamente 1 μm .

Sclerine: Exosporio ligeramente verrugado. Perisporio delgado, entre 1 y 2 μm de grosor con surcos, formando un retículo irregular.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo entre 38 a 50 μm . Grosor de la sclerine variable, entre 2 y 3 μm .

C. ulei (Christ) Domin, Acta Bot. Bohem 9: 168. 1930.

Tipo: Perú, Tatanara, Lechler 2532 (Holotipo B Herb. Mett.)

Arborescente; peciolo atropurpureo, muricado con escamas concoloras o bicoloras; Lámina bipinnado-pinnatifida, cartacea, ápice abruptamente reducido, venas simples, el par de venas basales conniventes en los senos, soros mediales, parafisos mas largos que en los esporangios.

Ha sido coleccionada en Huila, Nariño, Putumayo y Valle, entre 1000 y 2100 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., E.L. Little No. 8498, COL 63829. Lámina 9, fig. 5 y 5 a.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular cóncava.

Laesura: Se extiende hasta 3/4 del radio de la espora. Margo con grosor variable con un máximo de 4 μm aproximadamente.

Sclerine: Exosporio con pequeñas perforaciones en la superficie. Perisporio delgado con pequeños gránulos o bastoncitos.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo entre 51 y 64 μm . Grosor de la sclerine sin perisporio, aproximadamente de 3 μm en el área interradianal y de 5 μm en los vértices.

PTERIDACEAE

ACROSTICHUM

A. aureum L., Sp. Pl. 10: 69. 1753. (Ilustración 8)

Leptotipo: Plumier, Descr. Pl. Amer. t. 7. 1963. (Designado por Proctor, 1985)

Peciolo y raquis no acanalados, lisos; Lámina pinnada con varios pares de pinnas apicales fértiles; areolas cerca a la costa 3 veces mas largas que anchas. Se ha coleccionado en esteros, debajo de los manglares, en sitios salobres.

Se ha coleccionado en Antioquia, Atlántico, Bolivar, Cauca, Chocó, Córdoba, Magdalena, Nariño, Valle, de 0 a 200 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., P. Franco No. 2129, COL 375399. Lámina 9, fig. 6, 6 a., 6 b. y 6 c.

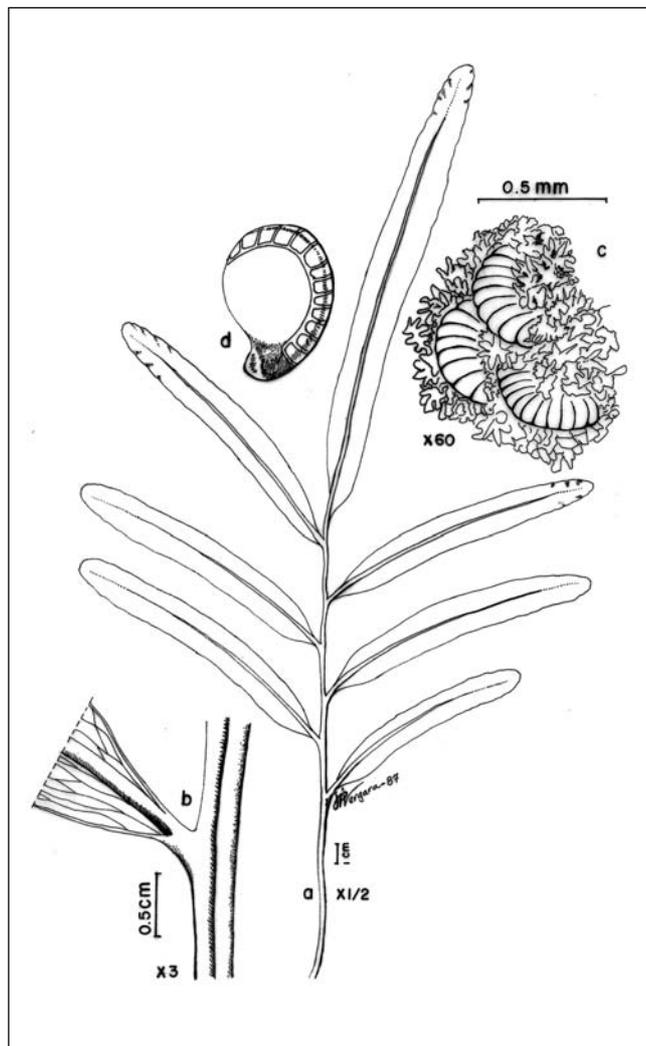


Ilustración 8. *Acrostichum aureum* L. a. Ápice de fronda; b. Base de pinna; c. Parte de soro; d. Esporangio.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular próxima a circular.

Laesura: Se extiende aproximadamente 2/3 del radio de la espora, comisura recta. Margo de aproximadamente 1 μm de grosor.

Sclerine: Exosporio aparentemente psilado. Perisporio formado por gránulos distribuidos por toda la superficie. Se encuentran pequeñas proyecciones encima los gránulos, difíciles de observar

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo entre 61 a 73 μm . Grosor de la sclerine, incluyendo el perisporio, entre 3 y 4 μm según los ejemplares.

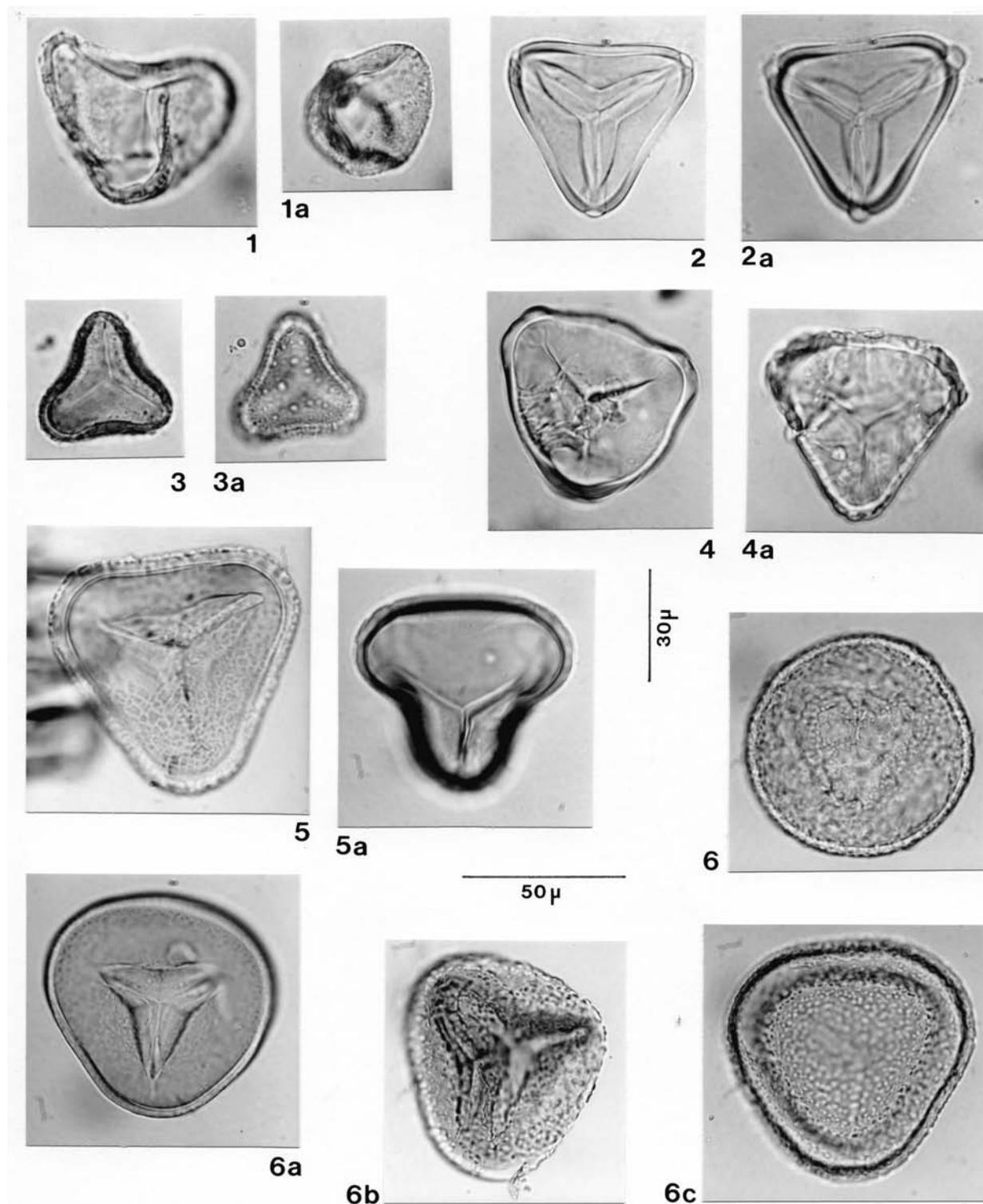


Lámina 9. *Cyathea pilosissima*: (1) y (1a) vista lateral, se observan pequeñas proyecciones; *Cyathea pungens*: (2) cara proximal, (2a) cara distal; *Cyathea rufa*: (3) cara proximal, (3a) cara distal con perisporio; *Cyathea straminea*: (4) cara proximal con restos de perisporio, (4a) cara proximal con perisporio; *Cyathea ulei*: (5) cara proximal con perisporio, (5a) cara proximal sin perisporio. PTERIDACEAE.- ACROSTICHUM.- *Acrostichum aureum*: (6) forma circular, (6a) y (6b) cara proximal, (6c) cara distal.

A. danaeifolium Langsd. & Fisch., Pl. Voy. Russes Monde 1: 5. 1810.

Tipo: Brasil, Krusenstern s.n. (Holotipo LE)

Peciolo y raquis acanalados; Lámina pinnada, hojas fértiles diferentes de las estériles; areolas cercanas a al costa menos tres de veces mas largas que anchas. En sitios fangosos, en manglares.

Se ha encontrado en Chocó, Magdalena y Valle entre 0 y 120 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., H. León No. 696, COL 252071. Lámina 10, fig. 1, 1 a. y 1 b.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Próxima a circular

Laesura: Aproximadamente 2/3 del radio de la espóra. Margo muy delgado de máximo 1 μm de grosor.

Sclerine: Exosporio aparentemente psilado. Perisporio formando pequeños gránulos de irregular tamaño, con pequeñas proyecciones difíciles de observar encima de los gránulos.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo entre 64 y 88 μm . Grosor de la sclerine, incluyendo el perisporio, aproximadamente 3 μm .

PARKERIACEAE

CERATOPTERIS

C. pteridioides (Hook.) Hieron, Bot. Jahrb. Syst. 34: 561. 1905.

Lectotipo: Guayana, Parker s.n. (Holotipo K, designado por Lloyd, 1974)

Plantas con peciolo generalmente ensanchados; las hojas estériles lobadas, las divisiones basales opuestas, y las células del anillo poco desarrolladas. Acuática, flotante.

Se ha coleccionado en Amazonas, Atlántico, Bolívar, Chocó, Córdoba, Nariño y Vichada, entre 5 y 290 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., J.M. Gillett No. 16509, COL 137291. Lámina 10, fig. 2, 2 a. y 2 b.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa a próximo circular.

Laesura: Se extiende hasta 2/3 del radio de la espóra, con margo psilado, ligeramente ondulado, de 1 a 2 μm de grosor.

Sclerine: Exosporio estriado. Cara proximal con un área de contacto psilada, el resto con estrías paralelas al ecuador. En la cara distal las estrías tienden a unirse en los ángulos de la espóra formando un pequeño triángulo en el centro de la cara. Las estrías con un ancho variable a lo largo de la estría. Perisporio muy delgado con pequeñas proyecciones o gránulos difíciles de observar.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo entre 80 a 102 μm . Grosor de la sclerine entre 5 y 7 μm aproximadamente. Grosor aproximado de las estrías 2 μm , con una altura de 1.5 μm y con una separación entre ellas variable de 5 a 8 μm , llegando en algún caso hasta 14 μm .

C. thalictroides (L.) Brongn., Bull. Sci. Soc. Philom. París. Ser. 3, 8: 186. 1821. (Ilustración 9)

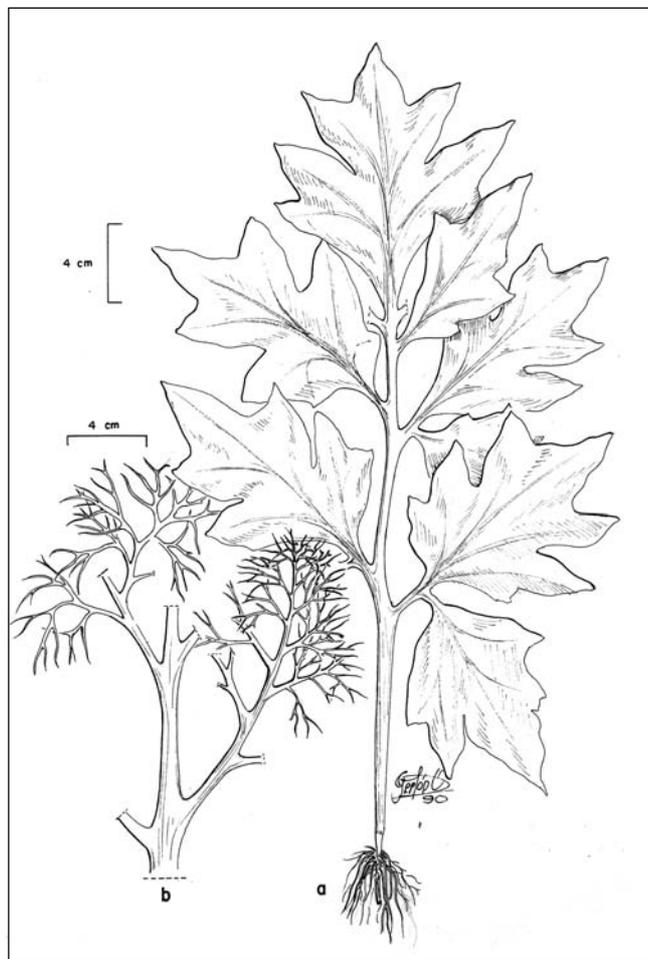


Ilustración 9. *Ceratopteris thalictroides* (L.) Brongn. **a.** Hábito de la planta; **b.** Ápice de la fronda fértil.

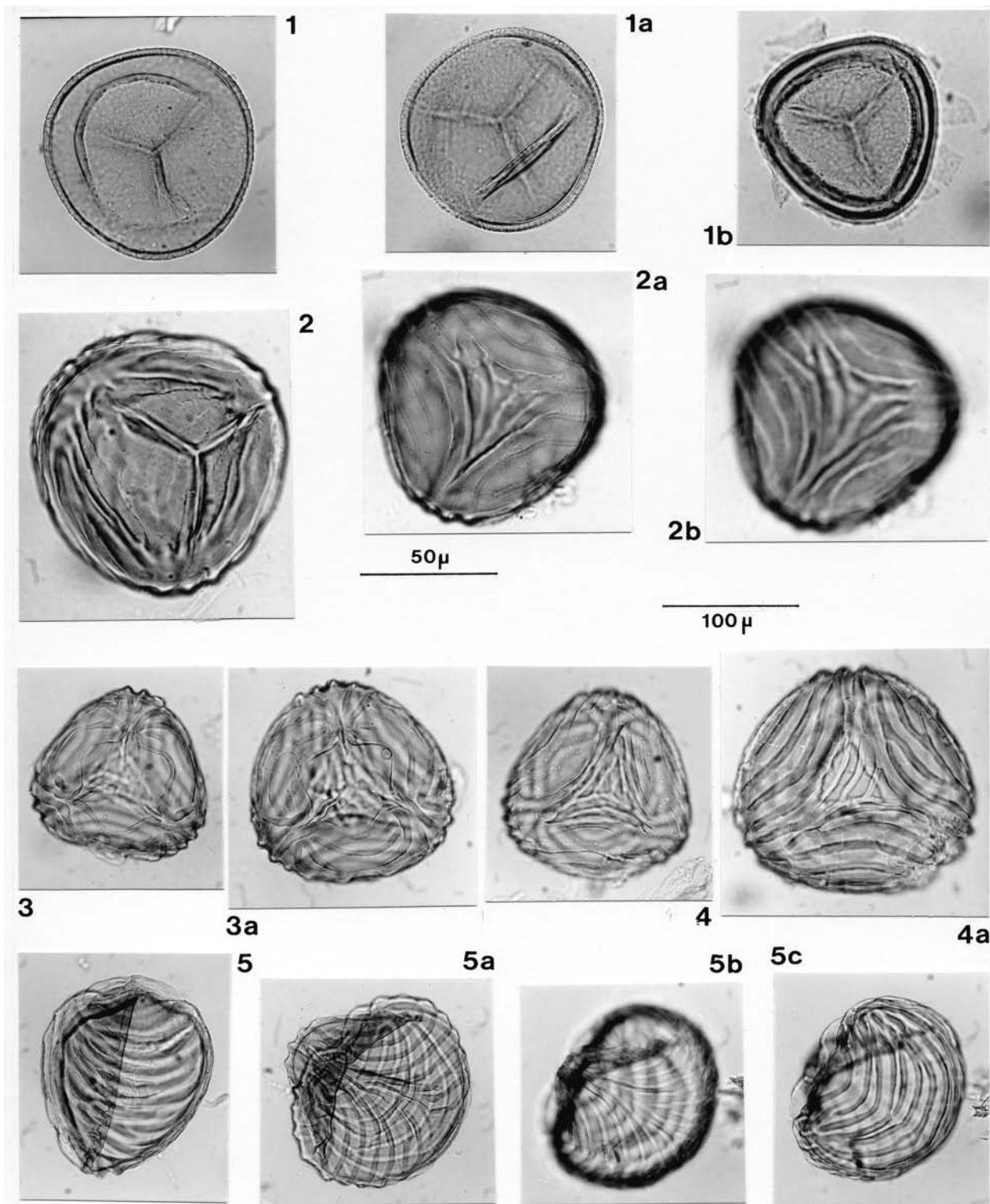


Lámina 10. *Acrostichum danaeifolium*: (1) cara proximal. (1a) y (1b) cara distal. PARKERIACEAE - CERATOPTERIS.- *Ceratopteris pteridioides*: (2) cara proximal, (2a) y (2b) cara distal; *Ceratopteris thalictroides*: (3) y (3a) cara proximal, (4) y (4 a) cara distal, (5), (5a), (5b) y (5c) distintas vistas laterales con diferentes planos de enfoque.

Lectotipo: Sri Lanka, Hermann s.n. (BM-Herb. Hermann 3: 42, espécimen 377, designado por Pichi-Sermolli, 1957)

Plantas con el peciolo no ensanchado, hojas estériles pinnadas a 3-pinnadas, pinnas basales alternas, células del anillo del esporangio muy resistentes. En bosque primario perturbado, enraizada en ciénaga o borde de quebrada.

Se ha coleccionado en Antioquia, Bolívar, Chocó y Meta, entre 10 y 450 m.

Material: Colombia. Colección I.C.N., J. Brand et al. No. 454, COL 291461. Lámina 10, fig. 3, 3 a., 4, 4 a., 5, 5 a., 5 b. y 5 c.

Espora: Trilete.

Vista ecuatorial: Subtriangular convexa a próxima circular.

Laesura: Se extiende hasta 2/3 del radio de la espora, con margo psilado ligeramente ondulado de aproximadamente 1 µm de grosor.

Sclerine: Exosporio estriado, a veces con bifurcaciones. Cara proximal con una área de contacto psilada y rodeada por estrías paralelas al ecuador. En la cara distal las estrías tienden a unirse en los ángulos de la espora formando un pequeño triángulo en el centro de la cara. Perisporio muy delgado difícil de observar.

Medidas: Diámetro ecuatorial máximo encontrado entre 115 a 186 µm. Grosor de la sclerine normalmente entre 5 y 6 µm, pero en algún caso hasta 9 µm. Altura aproximada de las estrías 3 µm y un grosor de 5 µm.

Agradecimientos

Al Doctor Mariano Marzo, Director del departamento de estratigrafía, paleontología y geociencias marinas de la Universidad de Barcelona; A la profesora Gloria Galeano Directora del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo y la ayuda

logística; al profesor Julio Betancur Curador general del Herbario Nacional Colombiano (COL) por permitir examinar los ejemplares depositados en este; a Silvio Fernández, Eugenia Rico y Carlos Bernal por las ilustraciones y a Daniel Felipe Chaux por la gran ayuda en la edición del manuscrito.

Bibliografía

- Erdtman, G.**, 1969. Handbook of Palynology. An Introduction to the Study of Pollen Grains and Spores. Munksgaard: 1-486.
- Font Quer, P.** 1975. Diccionario de Botánica. Editorial Labor S.A. Barcelona, Madrid.
- Gastony, G.** 1979. Spore morphology in the Cyatheaceae. III. The genus *Trichipteris*. American Journal of Botany **66**: 1238-1260.
- Gastony, G., & R. M. Tryon.** 1976. Spore morphology in the Cyatheaceae. II. The genera *Lophosoria*, *Metaxya*, *Sphaeropteris*, *Alsophila* and *Nephelea*. American Journal of Botany **66**: 1238-1260.
- Graf, K.** 1985. Esporas triletes de helechos bolivianos. Boletín del Servicio Geológico de Bolivia. Serie A **3**: 33-51.
- Moran, R.C. & R. Riba** (editores) 1995. Flora Mesoamericana. Vol. 1 Psilotaceae a Salvinaceae. Universidad Nacional Autónoma de México D.F.. Missouri Botanical Garden St. The Natural History Museum.
- Morbelli, M.** (Publicado para la obra del centenario del Museo de la Plata-Tomo 3). Esporas de las especies argentinas de *Selaginella* (Selaginellaceae-Pteridophyta) Obra del Centenario del Museo de La Plata **3**: 121-150.
- Murillo, M. T. & Bless, M.J.M.** 1974. Spores of recent Colombian Pteridophyta. I Trilete spores. Review of Palaeobotany and Palynology, **18**: 223-269.
- _____ 1978. Spores of recent Colombian Pteridophyta. II Monolete spores. Review of Palaeobotany and Palynology, **25**: 319-365.
- Punt, W., Blackmore, S., Nilsson, S., Le Thomas, A.**, 1994. Glossary of Pollen and Spore Terminology. LPP Contribution Series **1**: 1-70.
- Tryon, F.A., Lugardon, B.**, 1991. Spores of the Pteridophyta. Springer-Verlag edit: 1-647.

Recibido el 10 de marzo de 2005

Aceptado para su publicación el 4 de abril de 2005

PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE ALGUNAS PROTEÍNAS CITOESQUELÉTICAS EN EL MEROPLASMODIO DE UN GRUPO NUEVO DE ALGAS AMEBOIDES MARINAS DEL OCÉANO ATLÁNTICO

por

Ana Sofía Fliegner¹

Resumen

Fliegner, A. S.: Presencia y distribución de algunas proteínas citoesqueléticas en el meroplasmodio de un grupo nuevo de algas ameboides marinas del Océano Atlántico. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **29** (111): 219-227. 2005. ISSN 0370-3908.

Se estudia la presencia y distribución de actina, tubulina, miosina y cadherina en el meroplasmodio de un grupo nuevo de algas ameboides marinas, así como el efecto de citochalasina y colchicina sobre el transporte bidireccional de partículas en sus reticulopodios. Actina tiene apariencia granulosa, tubulina está organizada en forma de microtúbulos que irradian a partir de centros de nucleación, miosina y cadherina están presentes en el meroplasmodio. Citochalasina no afecta el transporte reticulopodial de partículas, colchicina sí lo afecta.

Palabras clave: Algas ameboides, meroplasmodio, reticulopodios, transporte bidireccional, citoesqueleto, inmunofluorescencia, actina, tubulina, miosina, cadherina, microfilamentos, microtúbulos, inhibidores, citochalasina, colchicina.

Abstract

The presence and distribution of actin, tubulin, myosin and cadherin in the meroplasmodia of a new marine ameboid algal group are studied, also the effect of cytochalasin and colchicine on the bidirectional particle transport along their reticulopodia. Actin has a granular appearance, tubulin is organized in form of microtubuli which radiate from nucleation centers, myosin and cadherin are also present in the meroplasmodia. Cytochalasin does not affect the reticulopodial movement of particles, colchicine does affect it.

Key words: Ameboid algae, meroplasmodium, reticulopodia, bidirectional transport, cytoskeleton, immunofluorescence, actin, tubulin, myosin, cadherin, microfilaments, microtubuli, inhibitors, cytochalasin, colchicine.

Introducción

Filopodios, axopodios, lamelipodios y lobopodios son elevaciones o levantamientos de la superficie celular (Grell, 1994) implicados en el movimiento y locomoción de organismos eucariotas unicelulares (Westheide & Rieger, 1996). Los filopodios son largos y delgados, los axopodios son rígidos y con disposición radial, los lamelipodios son ensanchamientos en forma de hoja y los lobopodios en forma lobular (Westheide & Rieger, 1996). Los reticulopodios son apéndices de los protistas que se diferencian de los filopodios, axopodios, lamelipodios y lobopodios en que no son elevaciones aisladas, sino que forman uniones anastomosantes entre ellos y permanecen unidos formando una red tridimensional (Grell, 1994). La formación de células ameboides unidas entre sí por medio de una red tridimensional de reticulopodios es una característica que comparten varios géneros de algas y es denominada meroplasmodio (Grell, 1990a) (Figura 1). En el meroplasmodio los cuerpos celulares principales mantienen su independencia y se separan después de la división celular, a pesar de estar unidos por reticulopodios. Las algas ameboides son amebas con plastos fotosintéticamente activos, los cuales se cree fueron inicialmente algas unicelulares libres, que fueron fagocitadas e integradas en procesos endocitobióticos (Hibberd & Norris, 1984; McFadden *et al.*, 1994; Gilson & McFadden, 1996; Van de Peer *et al.*, 1996; Ishida *et al.*, 1997; Schnetter, 2000; Fliegner, 2004). Existen géneros algales ameboides tanto de agua dulce (Bourrelly, 1968; Kristiansen & Preisig, 2001) como también marinos. Dentro de las algas ameboides marinas que forman un meroplasmodio en alguna de las fases de su ciclo de vida se encuentran las especies *Chlorarachnion reptans* Geitler (Geitler, 1930; Hibberd & Norris, 1984), *Lotharella amoebiformis* Ishida (Ishida *et al.*, 2000) y *Lotharella polymorpha* Dietz, Ehlers, Wilhelm, Gil-Rodríguez & Schnetter (Dietz *et al.*, 2003), todas ellas pertenecientes al phylum Chlorarachniophyta. Otras especies de algas ameboides marinas que forman un meroplasmodio son *Reticulosphaera socialis* Grell (Grell, 1989a; 1989b; Grell *et al.*, 1990) y *Reticulosphaera japonensis* Grell (Grell, 1990b), las dos únicas del género *Reticulosphaera* hasta ahora conocidas. El género *Reticulosphaera* ha sido atribuido a los phyla Heterokontophyta (Grell, 1989a) y Haptophyta (Cavalier-Smith *et al.*, 1996). El meroplasmodio desempeña un papel esencial en el transporte intercelular de partículas (Grell, 1989a; 1989b; 1990a; 1990b; 1994). En él quedan atrapadas células algales, bacterias y otros organismos, los cuales pueden ser digeridos en el mismo lugar de la captura (Grell, 1989a; 1989b; 1990a; 1990b; 1994; Dietz & Schnetter, 1996; Zamora & Schnetter, 2002) o transportados en el interior

de los reticulopodios hasta los cuerpos celulares principales. Las cepas de algas ameboides aquí estudiadas forman un meroplasmodio y tienen un sorprendente parecido con los representantes del género *Reticulosphaera* en cuanto a su morfología, reproducción vegetativa y composición de pigmentos fotosintéticos (Grell *et al.*, 1990; Sieber, 1995; Kinkel, 1996; Fliegner, 2004). Todas las cepas aquí estudiadas presentan meroplasmodios formados por células ameboides sésiles rodeadas por una lorica, a través de la cual se extienden los reticulopodios; amebas migratorias que pueden mantener el contacto con el meroplasmodio por medio de sus filopodios o bien desplazarse libremente sobre el sustrato y estadios flotantes libres que parecen heliozoos (Fliegner, 2004). Estos tipos celulares también se presentan en el ciclo de vida de las especies del género *Reticulosphaera* (Grell, 1989a; 1989b; 1990b; Grell *et al.*, 1990). En ambos casos se trata de organismos mixótrofos, que llevan a cabo fotosíntesis y pueden alimentarse en forma heterótrofa de otras células algales y bacterias (Grell, 1989a; 1989b; 1990b; Grell *et al.*, 1990; Schnetter, 2000; Fliegner, 2004). Las principales diferencias consisten en que el grupo de algas ameboides estudiadas presenta cloroplastos con pirenoides prominentes orientados hacia el interior de la célula y sus células carecen de flagelos (Fliegner, 2004), mientras que los cloroplastos de las especies del género *Reticulosphaera* no tienen pirenoides y sus estadios celulares flotantes poseen dos flagelos heteromorfos, además de presentar tricomas tubulares en la superficie celular en cercanía de los mismos (Grell *et al.*, 1990). El grupo de algas ameboides aquí estudiadas constituye aparentemente un nuevo grupo taxonómico.

Estudios de inmunofluorescencia han demostrado la presencia de proteínas citoesqueléticas como actina, tubulina, miosina y cadherina en el meroplasmodio de algunas algas ameboides (Dietz, 1996, 1997; Fliegner, 2004).

En el presente estudio se investigan la presencia y distribución de actina, tubulina, miosina y cadherina en el meroplasmodio de un grupo aún no descrito de algas ameboides marinas del Océano Atlántico, así como el efecto de inhibidores de la polimerización de los microfilamentos (citochalasina D) y los microtúbulos citoplasmáticos (colchicina) sobre el transporte bidireccional de partículas en los reticulopodios de estos organismos.

Materiales y métodos

A. Recolección y aislamiento de los organismos

Muestras de sustrato del sublitoral superior con agua marina fueron tomadas en Rocky Cay, Isla San Andrés,

Colombia (13°00' N, 81°30' W) y en Nordeste, Isla São Miguel, Portugal (37°50' N, 25°30' W), como lo describen **Zamora & Schnetter** (2002). En estas muestras se detectaron y aislaron cuatro cepas de algas ameboides, como lo describe **Fliegner** (2004): Dos provenientes de Rocky Cay, las cuales se denominaron San Andrés F1 y San Andrés C1 y dos del Nordeste, las cuales fueron llamadas Nordeste Piscina y Nordeste.

La recolección de las muestras, la detección y el aislamiento de los organismos de este estudio fueron realizados por el profesor Dr. R. Schnetter, Instituto de Botánica, Universidad Justus Liebig, Giessen.

B. Cultivos celulares

Las algas ameboides fueron cultivadas en cajas de petri plásticas y estériles y en cajas réplica (plásticas y estériles) en cuyo fondo se pusieron cubreobjetos de vidrio. Como medio de cultivo se utilizó agua marina (salinidad 32,8-33 ‰) proveniente de Asturias, España, la cual fue previamente filtrada, pasteurizada y enriquecida con una solución nutritiva (**Tabla 1**) como lo describe **Fliegner** (2004). Los cultivos celulares se mantuvieron bajo las condiciones de laboratorio descritas por **Beutlich & Schnetter** (1987). Las cepas de algas ameboides aquí estudiadas no fueron cultivadas de forma unialgal, otras células algales al igual que algunas bacterias estuvieron presentes en los cultivos.

C. Inmunofluorescencia

Para los ensayos de inmunofluorescencia se utilizaron organismos previamente cultivados sobre cubreobjetos de vidrio. La preparación se hizo aproximadamente a 20°C,

colocando los cubreobjetos (con el lado en donde crecieron los organismos hacia arriba) sobre portaobjetos de vidrio organizados en cámaras húmedas. Para la visualización de las proteínas actina, tubulina, miosina y cadherina se fijaron los organismos durante 20 minutos en una solución de formaldehído al 2% (w/v), glutaraldehído al 2,5% (v/v) y 3M NaCl en agua marina. Después de la fijación se adicionó Triton X-100 al 0,5% (v/v) en la solución tampón descrita por **La Claire** (1987) durante 5 minutos, para permeabilizar las células (**Dietz & Schnetter**, 1996). Posteriormente se agregó NaBH₄ (5,3 x 10⁻²M) en una solución tampón salina de fosfato ("phosphate buffered saline" o PBS) previamente preparada como lo describe **La Claire** (1987) durante otros 5 minutos, con el fin de reducir los aldehídos libres (**La Claire**, 1987). Finalmente se bañaron los cubreobjetos en una solución de suero de albúmina bovina (BSA) al 5% (w/v) en PBS, con el fin de evitar uniones no específicas del anticuerpo (**Worth et al.**, 2001). Las soluciones fueron adicionadas mediante pipetas de vidrio, asegurándose de que cubrieran por completo los cubreobjetos.

La incubación se llevó a cabo durante un mínimo de 4 horas con aproximadamente 50 ml por cubreobjeto de los siguientes anticuerpos primarios, previamente diluidos en PBS y adicionados con micropipetas:

Anti-actina monoclonal, Amersham, Braunschweig, RFA, código 350 en dilución 1: 1000; anti-a-tubulina monoclonal, Sigma, Saint Louis, Missouri, USA, código T-5168 en dilución 1: 2000; anti-miosina (músculo esquelético y liso), Sigma, Saint Louis, Missouri, USA, código M-7648 en dilución 1: 10; anti-pan-cadherina, Sigma, Saint Louis, Missouri, USA, código C-3678 en dilución 1: 100.

Tabla 1. Solución nutritiva según Von Stosch, modificada (ver **Schnetter et al.**, 1984)

Sustancia	Solución inicial (mg /100 ml agua destilada)	ml de solución inicial / 1 l agua marina	Concentración final (Mol / l)
NaNO ₃	4250,00	1,00	500
Na ₂ HPO ₄ · 12 H ₂ O	1075,00	1,00	30
FeSO ₄ · 7 H ₂ O	27,80	1,00	1
Na ₂ EDTA · 2 H ₂ O	37,20	10,00	10
As ₂ O ₃	9,30	0,10	1
Na ₂ MoO ₄ · 2 H ₂ O	24,20	0,10	0,1
NH ₄ VO ₃	11,70	0,10	0,1
MnCl ₂ · 4 H ₂ O	1,96	1,00	0,1
Na ₂ SeO ₃ · 5 H ₂ O	26,30	1,00	1
Na ₂ WO ₄ · 2 H ₂ O	33,00	0,02	0,02
TeO ₂	17,00	0,02	0,002
KJ	16,30	1,00	1

La incubación con los respectivos anticuerpos secundarios se llevó a cabo en la oscuridad, durante un mínimo de 15 horas con aproximadamente 50 ml por cubreobjeto de los siguientes anticuerpos secundarios, diluïdos en PBS:

Anti-Mouse IgG conjugado con FITC (isotiocianato de fluoreseina) (Amersham, código N-1031) en dilución 1:50; anti-Rabbit IgG conjugado con FITC (Sigma, código F-4151) en dilución 1:160.

Después de un baño final en PBS (3 x 10 minutos) los cubreobjetos fueron montados sobre DABCO (trietilendiamina) disuelto en PBS y sellados con esmalte transparente para uñas.

Para los ensayos control se realizó el mismo procedimiento y en vez del anticuerpo primario se utilizó únicamente PBS.

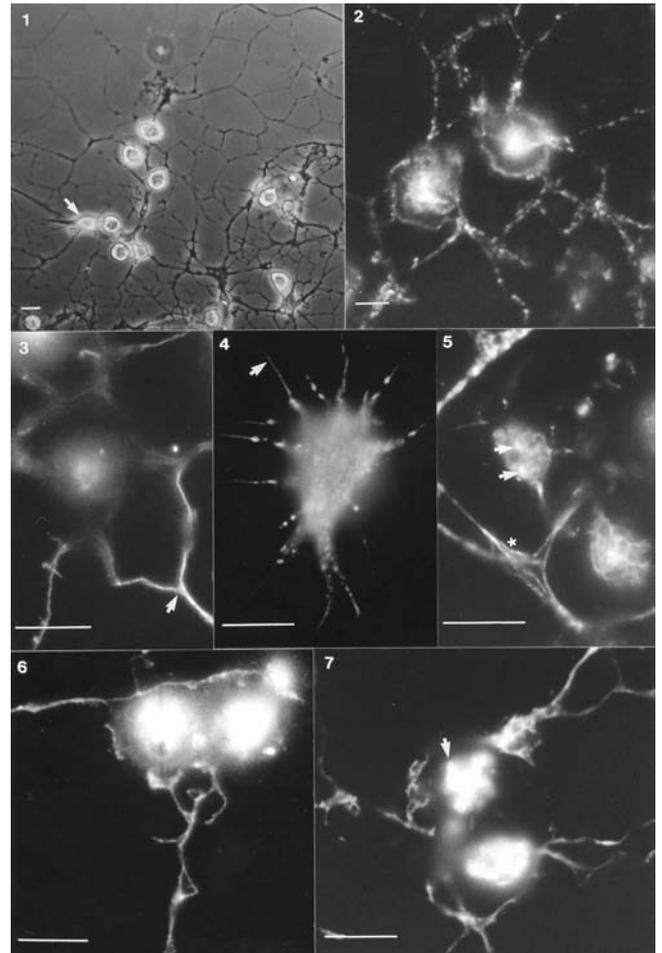
D. Inhibidores

Citochalasina D (Sigma, código C-8273) fue adicionada a cultivos en concentraciones finales de 5 y 10 µg/ml de agua marina, a partir de una solución inicial de concentración 1000 µg citochalasina D/ml de etanol al 98%. Colchicina (Sigma, código C-9754) en concentraciones 1, 3 y 8 mM en agua marina fue adicionada a cultivos en cajas de petri. Para los ensayos con inhibidores se cultivaron los organismos en cajas de petri a las cuales se les había realizado previamente una perforación circular en el centro a las dos tapas y el plástico en este lugar había sido reemplazado por un cubreobjeto de vidrio adherido con silicona. De esta forma se logró que el paso de la luz a través de las cajas de Petri estuviera adaptado a las características ópticas del objetivo para contraste de fase Zeiss Neofluar 40/0,75 Ph 2.

E. Equipos ópticos y documentación

Las muestras de los ensayos de inmunofluorescencia fueron examinadas con un microscopio Leitz Diaplan para fluorescencia, equipado con una lámpara de xenón Osram XBO 75 W/2, objetivos para uso con aceite de inmersión Leitz NPL Fluotar 40/1,30 (Fluoreszenz), Leitz NPL Fluotar 100/1,32, Leitz PL Fluotar 100/1,32 Phaco 3 y un filtro Leitz L3 (excitación 450 – 490 nm, dicróico 510 nm, emisión 505 – 545 nm). Las microfotografías fueron tomadas con un fotoautomático Wild MPS 46/52 y películas fotográficas Kodak T-Max 400.

Las cajas de petri de los ensayos con inhibidores fueron examinadas con un microscopio invertido Olympus, equipado para este fin con un objetivo para contraste de fase Zeiss Neofluar 40/0,75 Ph 2 y una placa corredera



Figuras 1. Meroplasmodio de la cepa Nordeste Piscina. Los cuerpos celulares principales de las amebas sésiles están unidos entre sí por medio de la red reticulopodial. Ameba migratoria (→). Escala = 10 µm. **2.** Marcación con los anticuerpos anti-actina y anti-mouse IgG conjugado con FITC, excitación con luz azul. Distribución granulosa de la actina en el meroplasmodio de la cepa San Andrés C1. Escala = 10 µm. **3.** Marcación con los anticuerpos anti-actina y anti-mouse IgG conjugado con FITC, excitación con luz azul. Microfilamentos (→) en los puntos de ramificación de los reticulopodios de la cepa San Andrés F1. Escala = 10 µm. **4.** Marcación con los anticuerpos anti-actina y anti-mouse IgG conjugado con FITC, excitación con luz azul. Distribución de la actina llega hasta las puntas de los filopodios (→) de las amebas migratorias de la cepa San Andrés C1. Escala = 10 µm. **5.** Marcación con los anticuerpos anti-a-tubulina y anti-mouse IgG conjugado con FITC, excitación con luz azul. Distribución longitudinal de los microtúbulos a lo largo de los reticulopodios de la cepa San Andrés F1. Haces de microtúbulos (*) en los puntos de ramificación de los reticulopodios y centros de nucleación o MTOCs (→) cercanos al núcleo, en el interior de los cuerpos celulares principales. Escala = 10 µm. **6.** Marcación con los anticuerpos anti-miosina y anti-mouse IgG conjugado con FITC, excitación con luz azul. Miosina se encuentra presente en los cuerpos celulares principales y reticulopodios del meroplasmodio de la cepa Nordeste Piscina. Escala = 10 µm. **7.** Marcación con los anticuerpos anti-pan-cadherina y anti-rabbit IgG conjugado con FITC, excitación con luz azul. Cadherina se encuentra presente en los reticulopodios y cuerpos celulares principales de la cepa Nordeste Piscina, en donde forma agrupaciones lobulares (→). Escala = 10 µm.

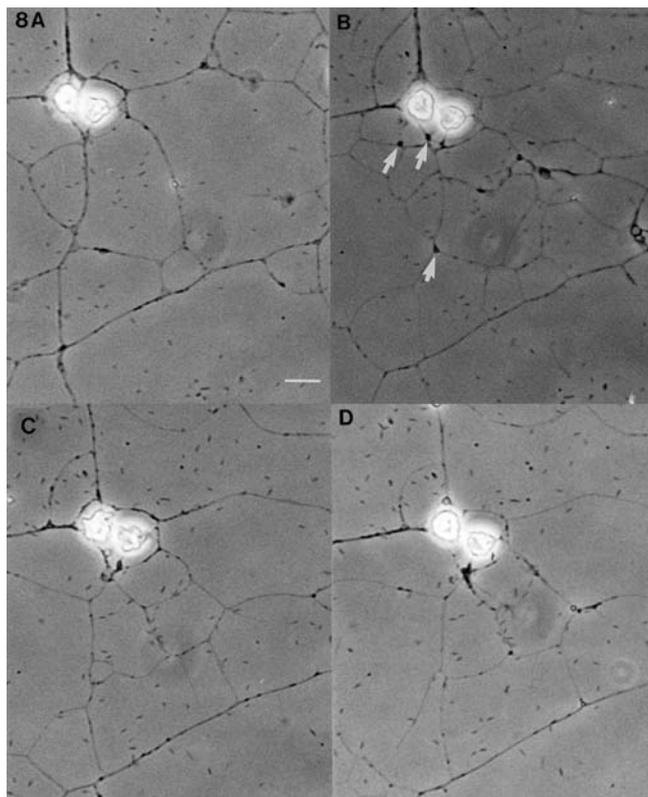


Figura 8. Efecto de citochalasina D (5 mg/ml agua marina) sobre el transporte bidireccional de partículas en los reticulopodios de la cepa Nordeste Piscina. **A.** Tiempo 0: 00 h; justo antes de la adición del inhibidor. **B.** Tiempo 1: 00 h; formación de algunos engrosamientos o acumulaciones de partículas (→) en los puntos de ramificación de los reticulopodios. **C.** Tiempo 3: 30 h; justo antes del reemplazo del inhibidor por agua marina. **D.** Tiempo 4: 30 h; acumulaciones de partículas a lo largo de los reticulopodios tienden a deshacerse, transporte reticulopodial transcurre normalmente. Escala = 10 μm .

con un anillo de luz ajustado para contraste de fase. Las microfotografías fueron tomadas con una cámara Olympus OM-2 y películas fotográficas AGFA Agfapan APX 100.

Resultados

Los ensayos control (sin el anticuerpo primario) no mostraron fluorescencia, por lo tanto se consideraron específicas las uniones de los anticuerpos. Las proteínas actina, α -tubulina, miosina y cadherina estuvieron presentes en el meroplasmodio de las cuatro cepas de algas ameboides estudiadas.

La apariencia de la actina fue granulosa (**Figura 2**), en algunos casos se observaron microfilamentos en los puntos de ramificación de los reticulopodios (**Figura 3**). La

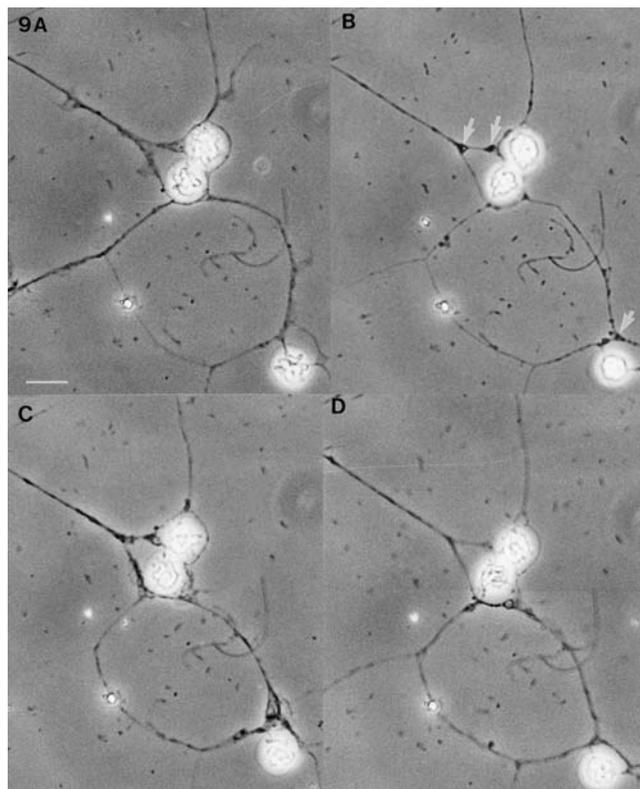


Figura 9. Efecto de citochalasina D (10 mg/ml agua marina) sobre el transporte bidireccional de partículas en los reticulopodios de la cepa Nordeste Piscina. **A.** Tiempo 0: 00 h; justo antes de la adición del inhibidor. **B.** Tiempo 0: 30 h; transporte reticulopodial de partículas no es afectado por el inhibidor, formación de algunos engrosamientos o acumulaciones de partículas (→) en los puntos de ramificación de los reticulopodios. **C.** Tiempo 3: 00 h; justo antes del reemplazo del inhibidor por agua marina. **D.** Tiempo 4: 30 h; acumulaciones de partículas a lo largo de los reticulopodios tienden a deshacerse. Escala = 10 μm .

distribución de actina llegó inclusive hasta las puntas de los filopodios de las células ameboides migratorias (**Figura 4**). Tubulina estuvo organizada en forma de microtúbulos, los cuales se orientaron longitudinalmente a lo largo de los reticulopodios (**Figura 5**). En los puntos de ramificación de los reticulopodios fueron visibles haces de microtúbulos (**Figura 5**). Los microtúbulos irradiaron a partir de centros de nucleación (**Figura 5**), localizados en el interior de los cuerpos celulares principales, cerca del núcleo. La miosina estuvo presente a lo largo de los reticulopodios y en interior de los cuerpos celulares principales (**Figura 6**).

La cadherina presentó una fluorescencia intensa en el interior de los cuerpos celulares principales, donde fueron visibles agrupaciones de forma lobular (**Figura 7**).

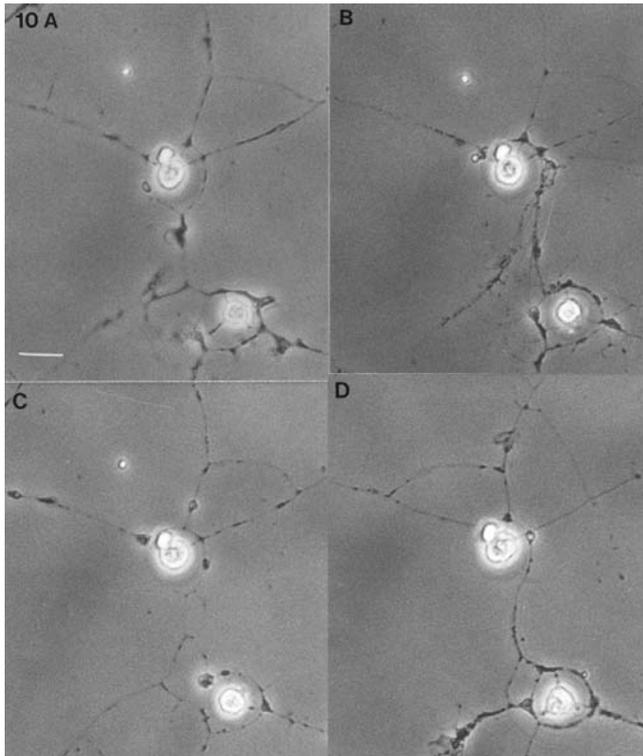


Figura 10. Efecto de colchicina (1 mM en agua marina) sobre el transporte bidireccional de partículas en los reticulopodios de la cepa Nordeste Piscina. **A.** Tiempo 0: 00 h; justo antes de la adición del inhibidor. **B.** Tiempo 0: 05 h; transporte reticulopodial de partículas se hace más lento en comparación con **A.** **C.** Tiempo 0: 30 h; transporte reticulopodial de partículas se ha detenido; permanece así hasta antes del reemplazo del inhibidor por agua marina. **D.** Tiempo 3: 40 h; transporte reticulopodial de partículas se ha reanudado. Escala = 10 μ m.

La citochalacina D no tuvo influencia sobre el transporte bidireccional de partículas a lo largo de los reticulopodios en concentraciones de 5 μ g/ml de agua marina durante 4½ horas (**Figura 8A, B, C, D, E, F**) y 10 mg/ml de agua marina durante 6½ horas (**Figura 9A, B, C, D, E, F**). La formación de engrosamientos a lo largo de los reticulopodios durante el tiempo de incubación con el inhibidor en ambas concentraciones fue totalmente reversible al sustituir el inhibidor por agua marina.

La colchicina si tuvo influencia sobre el transporte bidireccional de partículas a lo largo de los reticulopodios. En concentración 1 mM causó inicialmente una disminución en la velocidad del transporte, hasta detenerlo totalmente después de ½ hora de incubación. El transporte bidireccional de partículas a lo largo de los reticulopodios fue reanudado al sustituir el inhibidor por agua marina (**Figura 10A, B, C, D, E, F**). En concentra-

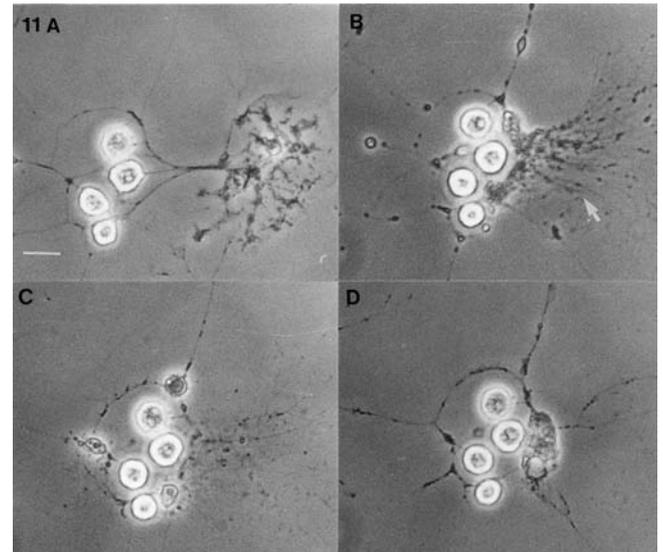


Figura 11. Efecto de colchicina (3 mM en agua marina) sobre el transporte bidireccional de partículas en los reticulopodios de la cepa Nordeste Piscina. **A.** Tiempo 0: 00 h; justo antes de la adición del inhibidor. **B.** Tiempo 0: 05 h; transporte reticulopodial de partículas se ha detenido, han desaparecido las extensiones citoplasmáticas (\rightarrow)comparar con **A**) en las puntas de los reticulopodios. **C.** Tiempo 1: 00 h; red reticulopodial ha desaparecido casi por completo, justo antes del reemplazo del inhibidor por agua marina. **D.** Tiempo 2: 00 h; transporte reticulopodial de partículas se ha normalizado y se han formado nuevas conexiones reticulopodiales. Escala = 10 μ m.

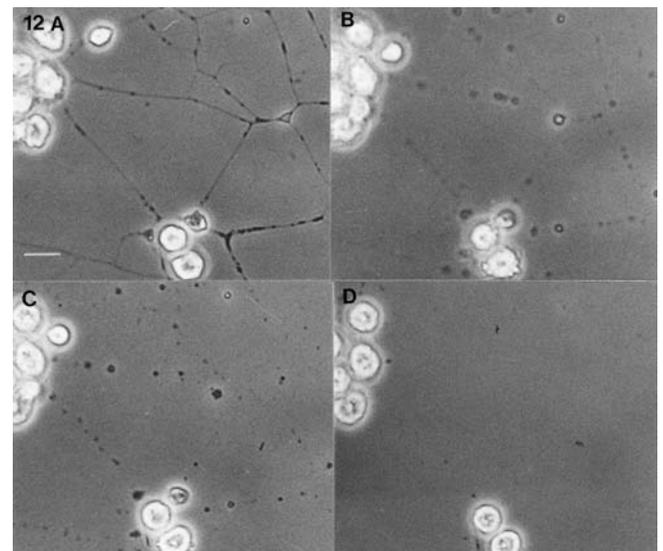


Figura 12. Efecto de colchicina (8 mM en agua marina) sobre el transporte bidireccional de partículas en los reticulopodios de la cepa Nordeste Piscina. **A.** Tiempo 0: 00 h; justo antes de la adición del inhibidor. **B.** Tiempo 0: 05 h; destrucción de la red reticulopodial. **C.** Tiempo 0: 30 h; justo antes del reemplazo del inhibidor por agua marina. **D.** Tiempo 1: 30 h; red reticulopodial no logra reestablecerse. Escala = 10 μ m.

ción 3 mM causó un cese del transporte inmediatamente después de la aplicación del inhibidor y una destrucción de reticulopodios. Estos efectos fueron reversibles, al sustituir el inhibidor por agua marina (**Figura 11A, B, C, D**). En concentración 8 mM causó un cese inmediato del transporte después de la aplicación del inhibidor, así como la destrucción de la red reticulopodial. Estos efectos no fueron reversibles al sustituir el inhibidor por agua marina (**Figura 12A, B, C, D**).

Discusión

En el meroplasmodio del grupo de algas ameboides estudiadas se encuentran presentes las proteínas citoesqueléticas actina, α -tubulina, miosina y cadherina, características de los organismos eucarióticos. Hoy en día se sabe que los movimientos protoplasmáticos de las células ameboides tienen su origen en un sistema de contracción cuya base molecular son la actina y la miosina (**Grell, 1994; Stossel, 1994; Westheide & Rieger, 1996**). Este sistema permite movimientos de contracción en organismos como las amebas, los hongos mucilaginosos y células de los animales vertebrados (**Grell, 1994**). Son pocos los conocimientos existentes acerca del citoesqueleto de las algas ameboides. **Hibberd & Norris (1984)** observaron elementos microtubulares a nivel ultraestructural en *Chlorarachnion reptans*, **Dietz & Schnetter (1996)** establecieron algunas características estructurales del citoesqueleto en los filopodios de *Cryptochlora perforans* Calderón-Saenz & Schnetter, especie del phylum Chlorarachniophyta que no forma meroplasmodio (**Calderón-Sáenz & Schnetter, 1987; 1989**), en el cual la distribución de actina y los microtúbulos no es paralela. La actina presenta una distribución granulosa y se observan escasos microfilamentos, mientras que los microtúbulos están organizados longitudinalmente a lo largo de los filopodios. Estos resultados son similares a la distribución de la actina y los microtubulos observada en los reticulopodios de *Reticulosphaera socialis* (**Grell et al., 1990**) y en los del grupo de algas ameboides estudiadas. Una clara diferencia consiste en que los microtúbulos de este grupo de algas y los de *Reticulosphaera socialis* (**Grell et al., 1990**) irradian a partir de centros de nucleación en el interior de los cuerpos celulares principales, mientras que en *Cryptochlora perforans* no se observan estos centros de nucleación (**Dietz & Schnetter, 1996**). Estos centros son también conocidos como MTOCs o “microtubule organizing centers” (**Kleinig & Sitte, 1992**) y son responsables del número, localización y orientación de los microtúbulos citoplasmáticos (**Alberts et al., 1998**). Se encuentran presentes en la mayoría de células animales (**Wolf & Boehm, 1997; Mogensen et al.,**

2000), en donde son llamados centrosomas y se componen de un par de centriolos y material pericentriolar (**Mogensen et al., 2000**). En células vegetales se encuentran centrosomas sólo en algunas gimnospermas y algas verdes (**Sitte et al., 1998**). En células neuronales se ha identificado que los haces longitudinales de microtúbulos a lo largo de los axones sirven como “carril” para las proteínas motoras, las cuales transportan distintas moléculas entre los cuerpos celulares y las porciones distales de las neuronas (**Keating & Borisy, 1999**). Un mecanismo similar podría funcionar en el transporte bidireccional de partículas en los reticulopodios del grupo de algas ameboides aquí estudiadas. La miosina, también presente en el meroplasmodio, podría desempeñar un papel no sólo en la movilización de distintas moléculas a lo largo de los reticulopodios, sino también en el elongamiento de los mismos. En células neuronales se ha logrado demostrar que microfilamentos y distintos tipos de miosina son responsables del crecimiento de las puntas de los axones (**Mitchison & Kirschner, 1988**). Las cadherinas pertenecen a un grupo de proteínas transmembranales que están implicadas en procesos morfogenéticos y en la adhesión intercelular en tejidos (**Boggon et al., 2002**). Se encuentran presentes en zonas especiales de contacto intercelular o entre la membrana plasmática y la matriz extracelular (**Geiger et al., 1985; Takeichi, 1988**). Una de sus características es que forman uniones estables con microfilamentos (**Geiger et al., 1987**). La presencia de cadherina en el meroplasmodio del grupo de algas ameboides estudiadas se puede relacionar con la formación de uniones anastomoseantes entre los reticulopodios y también con la adhesión del meroplasmodio al sustrato. El hecho de que la citochalasina no afecte el transporte reticulopodial de partículas en el grupo de algas ameboides estudiadas es similar a los resultados obtenidos por **Dietz & Schnetter (1996)** en los filopodios de *Cryptochlora perforans* con el mismo inhibidor. Observaciones semejantes fueron hechas para el foraminífero *Allogromia laticollaris* por **Travis & Bowser (1986a)**. Ellos observaron que los reticulopodios de *Allogromia* perdían su adhesión al sustrato con la adición de citochalasina 0,01M, sin embargo el transporte de partículas a través de los mismos no se veía afectado y los efectos del inhibidor eran reversibles al sustituirlo por medio de cultivo. La detención del transporte reticulopodial por la adición de colchicina ha sido observado no sólo para el grupo de algas ameboides estudiadas, sino también para *Allogromia laticollaris* (**Travis & Bowser, 1986a**), *Astrammia rara* (**Bowser et al., 1992**) y los filopodios de *Cryptochlora perforans* (**Dietz & Schnetter, 1996**). El hecho de que el transporte reticulopodial de partículas sea afectado por colchicina, más no por citochalasina, en el grupo de algas

ameboides estudiadas, sugiere que éste podría ser dependiente del citoesqueleto microtubular, como ocurre en *Allogromia laticollaris* (Travis & Bowser, 1986a; 1986b) y *Astrammia rara* (Bowser *et al.*, 1992).

Agradecimientos

Agradezco especialmente al profesor Dr. Reinhard Schnetter, Universidad Justus Liebig, Giessen, por sus comentarios e interés en este trabajo. Las muestras de sustrato provenientes de San Andrés, Colombia, fueron exportadas al Instituto de Botánica de la Universidad Justus Liebig, Giessen, con el permiso número 0069 del Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (Bogotá, 29 de Agosto de 2001).

Los resultados de esta investigación hacen parte de la tesis doctoral de Ana Sofía Fliegner (2004).

Bibliografía

- Alberts, B., Bray, D., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K. & P. Walter. 1998. Essential cell biology. An introduction to the molecular biology of the cell. Garland Publishing Inc., New York.
- Beutlich, A. & R. Schnetter. 1993. The life cycle of *Cryptochlora perforans* (Chlorarachniophyta). *Botanica Acta* **106**: 441-447.
- Boggon, T. J., Murray, J., Chappuis-Flament, S., Wong, E., Gumbiner, B. M. & L. Shapiro. 2002. C-Cadherin ectodomain structure and implications for cell adhesion mechanisms. *Science* **296**: 1308-1313.
- Bourrelly, P. 1968. Les Algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome II: Les Algues jaunes et brunes, Chrysophycées, Phéophycées, Xantophycées et Diatomées. Éditions N. Boubée & Cie, Paris.
- Bowser, S. S., Alexander, S. P., Stockton, W. L. & T. E. DeLaca. 1992. Extracellular matrix arguments mechanical properties in the carnivorous foraminiferan *Astrammia rara*: Role in prey capture. *Journal of Protozoology* **39**: 724-732.
- Calderón-Sáenz, E. & R. Schnetter. 1987. *Cryptochlora perforans*, a new genus and species of algae (Chlorarachniophyta), capable of penetrating dead algal filaments. *Plant Systematics and Evolution* **158**: 69-71.
- Calderón-Sáenz, E. & R. Schnetter. 1989. Morphology, biology, and systematics of *Cryptochlora perforans* (Chlorarachniophyta), a phagotrophic marine alga. *Plant Systematics and Evolution* **163**: 165-176.
- Cavalier-Smith, T., Allsopp, M. T. E. P., Haeuber, M. M., Rensing, S. A., Gothe, G., Chao, E. E., Couch, J. A. & U-G. Maier. 1996. Chrombionte phylogeny: The enigmatic alga *Reticulosphaera japonensis* is an aberrant haptophyte, not a heterokont. *European Journal of Phycology* **31**: 255-263.
- Dietz, C. 1997. Vergleichende Immunfluoreszenzuntersuchungen ueber das Cytoskelett von *Cryptochlora perforans* (Chlorarachniophyta), anderer amoeboider Algen und *Labyrinthula spec.* (Myxomycota). Inaugural-Dissertation, Fachbereich Biologie, Justus Liebig-Universitaet, Giessen.
- Dietz, C. & R. Schnetter. 1996. Arrangement of F-actin and microtubules in the pseudopodia of *Cryptochlora perforans* (Chlorarachniophyta). *Protoplasma* **193**: 82-90.
- Dietz, C., Ehlers, K., Wilhelm, C., Gil-Rodríguez, M. C. & R. Schnetter. 2003. *Lotharella polymorpha* sp. nov. (Chlorarachniophyta) from the coast of Portugal. *Phycologia* **42**: 582-593.
- Fliegner, A. S. 2004. Morphologie, Ultrastruktur und Cytoskelettproteine einiger mariner amoeboider Algen aus dem Atlantik. Inaugural-Dissertation, Fachbereich Biologie, Justus Liebig-Universitaet, Giessen.
- Geiger, B., Volk, T. & T. Volberg. 1985. Molecular heterogeneity of adherens junctions. *Journal of Cell Biology* **101**: 1523-1531.
- Geiger, B., Volk, T., Volberg, T. & R. Bendori. 1997. Molecular interactions in adherens-type contacts. *Journal of Cell Science (Supplement)* **8**: 251-272.
- Geitler, L. 1930. Ein gruenes Filarplasmodium und andere neue Protisten. *Archiv fuer Protistenkunde* **69**: 615-637.
- Gilson, P. R. & G. I. McFadden. 1996. The miniaturized nuclear genome of a eukaryotic endosymbiont contains genes that overlap, genes that are cotranscribed, and the smallest known spliceosomal introns. *Proceedings of the National Academy of Science USA* **93**: 7737-7742.
- Grell, K. G. 1989a. *Reticulosphaera socialis* n. gen., n. sp., ein plasmodialer und phagotropher Vertreter der heterokonten Algen. *Zeitschrift fuer Naturforschung* **44c**: 330-332.
- Grell, K. G. 1989b. The life cycle of the marine protist *Reticulosphaera socialis* Grell. *Archiv fuer Protistenkunde* **137**: 177-197.
- Grell, K. G. 1990a. Anzeichen sexueller Fortpflanzung bei dem plasmodialen Protisten *Chlorarachnion reptans* Geitler. *Zeitschrift fuer Naturforschung* **45c**: 112-114.
- Grell, K. G. 1990b. *Reticulosphaera japonensis* n. sp. (Heterokontophyta) from tide pools of the Japanese coast. *Archiv fuer Protistenkunde* **138**: 257-269.
- Grell, K. G. 1994. Reticulopodien. *Biologie in unserer Zeit* **24** (5): 267-272.
- Grell, K. G., Heini, A. & S. Schüller. 1990. The ultrastructure of *Reticulosphaera socialis* Grell (Heterokontophyta). *European Journal of Protistology* **26**: 37-54.
- Hibberd, D. J. & R. E. Norris. 1984. Cytology and ultrastructure of *Chlorarachnion reptans* (Chlorarachniophyta divisio nova, Chlorarachniophyceae classis nova). *Journal of Phycology* **20**: 310-330.
- Ishida, K., Cao, Y., Hasegawa, M., Okada, N. & Y. Hara. 1997. The origin of chlorarachniophyte plastids, as inferred from phylogenetic comparisons of amino acid sequences of EF-Tu. *Journal of Molecular Evolution* **45**: 682-687.
- Ishida, K., Ishida, N. & Y. Hara. 2000. *Lotharella amoebiformis* sp. nov.: A new species of chlorarachniophytes from Japan. *Phycological Research* **48**: 221-229.

- Keating, T. J. & G. G. Borisy.** 1999. Centrosomal and non-centrosomal microtubules. *Biology of the Cell* **91**: 321-329.
- Kinkel, H.** 1996. Kultivierung und Charakterisierung einer neuen Mikroalge mit amoeboiden Stadien von der karibischen Kueste Kolumbiens. Diplomarbeit, Fachbereich Biologie, Justus-Liebig-Universitaet, Giessen.
- Kleinig, H. & P. Sitte.** 1992. Zellbiologie: Ein Lehrbuch. 3., neubearbeitete Auflage. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Kristiansen, J & H. R. Preisig (Eds.).** 2001. Encyclopedia of Chrysophyte Genera. J. Cramer Verlag, Berlin.
- La Claire, J. W.** 1987. Microtubule cytoskeleton in intact and wounded coenocytic green algae. *Planta* **171**: 30-42.
- McFadden, G. I., Gilson, P. R., Hofmann, C. J. B., Adcock, G. J. & U-G. Maier.** 1994. Evidence that an amoeba acquired a chloroplast by retaining part of an engulfed eukaryotic alga. *Proceedings of the National Academy of Science USA* **91**: 3690-3694.
- Mitchison, T. & M. Kirschner.** 1988. Cytoskeletal dynamics and nerve growth. *Neuron* **1**: 761-772.
- Mogensen, M., Malik, A., Piel, M., Bouckson-Castaing, V. & M. Bornens.** 2000. Microtubule minus-end anchorage at centrosomal and non centrosomal sites: The role of ninein. *Journal of Cell Science* **113**: 3013-3023.
- Schnetter, R., Ruckelshausen, U. & G. Seibold.** 1984. Mikrospektrophotometrische Untersuchungen ueber den Entwicklungszyklus von *Ernodesmis verticillata* (Kuetzing) Boergesen (Siphonocladales, Chlorophyceae). *Cryptogamie, Algologie* **5**: 73-78.
- Schnetter, R.** 2000. Los animales se convierten en plantas: El ejemplo de las algas ameboides. En: *Memorias 1er Congreso Colombiano de Botánica*, Abril 26-30, 1999, Santafé de Bogotá, Colombia (Ed. por J. Aguirre C.). Instituto de Ciencias Naturales, Santafé de Bogotá. (CD-ROM) (ISBN: 958-8051-84-3).
- Sieber, T. K.** 1995. Charakterisierung einer Filarplasmodien bildenden marinen Alge von Teneriffa. Diplomarbeit, Fachbereich Biologie, Justus-Liebig-Universitaet, Giessen.
- Sitte, P., Ziegler, H., Ehrendorfer, F. & A. Bresinsky.** 1998. Strassburger, Lehrbuch der Botanik. 34. Auflage. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Stossel, T. P.** 1994. Der Kriechmechanismus von Zellen. *Spektrum der Wissenschaft* **11**: 42-49.
- Takeichi, M.** 1988. The cadherins: Cell-cell adhesion molecules controlling animal morphogenesis. *Development* **102**: 639-655.
- Travis, J. L. & S. S. Bowser.** 1986a. A new model of reticulopodial motility and shape: Evidence for a microtubule-based motor and an actin skeleton. *Cell Motility and the Cytoskeleton* **6**: 2-14.
- Travis, J. L. & S. S. Bowser.** 1986b. Microtubule-dependent reticulopodial motility: Is there a role for actin? *Cell Motility and the Cytoskeleton* **6**: 146-152.
- Van de Peer, Y., Rensing, S. A., Maier, U-G. & R. de Wachter.** 1996. Substitution rate calibration of small subunit ribosomal RNA identifies chlorarachniphyte endosymbionts as remnants of green algae. *Proceedings of the National Academy of Science USA* **93**: 7732-7736.
- Westheide, W. & R. Rieger (Eds.).** 1996. Spezielle Zoologie, erster Teil: Einzeller und Wirbellose Tiere. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Wolf, K.W. & K. J. Boehm.** 1997. Organization von Mikrotubuli in der Zelle. *Biologie in unserer Zeit* **27**: 87-95.
- Worth, N. F., Rolfe, B. E., Song, F. & G. R. Campbell.** 2001. Vascular smooth muscle cell phenotypic modulation in culture is associated with reorganisation of contractile and cytoskeletal proteins. *Cell Motility and the Cytoskeleton* **49**: 130-145.
- Zamora, A. S. & R. Schnetter.** 2002. *Chlorarachnion reptans*: Primer registro para la Costa Atlántica colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* **26** (101): 477-480.

Recibido el 26 de marzo de 2004

Aceptado para su publicación el 23 de febrero de 2005

ADN FÓSIL: ARQUEOPARASITOLOGÍA EN AMÉRICA

por

Felipe Guhl¹

Resumen

Guhl, F. : ADN fósil: Arqueoparasitología en América. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 229-238. 2005. ISSN 0370-3908.

Los agentes infecciosos suministran información de gran valor, especialmente cuando se identifican a partir de registros arqueológicos y de restos momificados de hombres y animales. Se puede obtener información muy precisa acerca de sus procesos evolutivos, su filogenia, su distribución geográfica, así como de sus huéspedes y reservorios en el caso de los parásitos. De igual manera brindan una clara idea del contacto que pudieron tener diferentes civilizaciones o grupos poblacionales entre sí, sus movimientos migratorios y su posible extinción. Para lograr obtener estos datos es preciso rastrear las evidencias e interpretarlas de manera correcta además de apoyarse en otras ciencias como la geología, la osteopatología, la química, la antropología y la biología molecular. Esta última ciencia en particular ha tomado enorme impulso en los últimos años y dado su alto nivel de resolución y sensibilidad se ha convertido en un aliado muy valioso en los análisis de ADN fósil. Se presenta el aislamiento y amplificación de ADN fósil de *Trypanosoma cruzi*, aislado de restos humanos de 9.000 años de antigüedad.

Palabras clave: ADN fósil, paleoparasitología, RCP, momias, filogenia, *Trypanosoma cruzi*.

Abstract

Infectious agents provide useful data, especially when identified from the mummified remains of humans and animals found in a particular archaeological excavation site. Precise information can be obtained about their evolutionary processes, phylogeny, geographical distribution and their hosts and reservoirs in the case of parasites.

A clear idea regarding the contact which different civilizations or population groups could have had amongst themselves, their migratory movements and possible extinction can also be deduced when medical effects are integrated with archaeological data. Other sciences such as geology, osteopathology, chemistry, anthropology and molecular biology often can provide valuable additional

¹ Director Centro de Investigaciones en Microbiología y Parasitología Tropical (CIMPAT)- Profesor Titular, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. fguhl@uniandes.edu.co

information. The latter science particularly has gained enormous ground during the last few years. Given its high level of resolution and sensitivity, it has become a very valuable ally for studies and analysis in the area of fossil DNA. Extraction and further amplification of fossil DNA from *Trypanosoma cruzi* isolated from human mummified bodies dated 9 000 years is reported.

Key words: Fósil DNA, paleoparasitology, PCR, mummies, phylogeny, *Trypanosoma cruzi*.

Introducción

Las principales teorías evolutivas actuales proponen que la vida sobre la tierra se originó gracias al parasitismo, inicialmente de unas moléculas a otras, dando paso a la formación de las primeras células, y posteriormente de células a células, permitiendo la diversificación de las formas moleculares y celulares. Estas teorías basan sus supuestos en las evidencias moleculares encontradas en los diferentes niveles de vida y organización celular. Por ejemplo, se han observado secuencias cortas de ADN móvil, denominadas transposones, que se insertan, por acción enzimática, en el ADN de las células, por lo que son considerados parásitos de ADN. Son moléculas como los transposones, las que les han permitido a los investigadores establecer una fuerte relación entre el parasitismo y la evolución de la vida sobre la tierra. Un buen ejemplo de cómo la vida ha evolucionado gracias a las relaciones parasíticas es la aparición de los cloroplastos y las mitocondrias. Estos, siendo originalmente pequeñas células parásitas de células más grandes, supuestamente se convirtieron en organelos de las células eucariotas. El hallazgo de este tipo de hechos han reevaluado el concepto de parasitismo; actualmente se define un parásito como cualquier forma de vida, o compuesto orgánico capaz de multiplicarse, que encuentre su hogar (nicho ecológico) en otra forma de vida (Hawdon & Johnston, 2001). Tan importante ha sido este mecanismo en la historia de la vida, que se estima que en la naturaleza existe un número de especies parásitas diez veces mayor que el número de especies de vida libre. Todas las asociaciones ínter específicas como comensalismo, mutualismo y simbiosis, son distintas manifestaciones de un mismo fenómeno: el parasitismo. Por estas razones los parásitos que se encuentran estrechamente relacionados con sus huéspedes constituyen sensibles marcadores evolutivos y se convierten también en marcadores homínidos de alta resolución.

Técnicas y procedimientos para la detección de agentes infecciosos en arqueología

Coprolitos: Las muestras de materias fecales disecadas proveen quizás la fuente de información más inme-

diata. La información que se puede obtener a partir de coprolitos está restringida básicamente a helmintos y excluye la gran mayoría de otros agentes infecciosos.

Momias: Existen muchas descripciones detalladas de los principales lugares en el mundo donde se han hallado cuerpos humanos y de animales momificados (Aufderheide, 2003). En realidad los hallazgos y la detección directa o indirecta de agentes infecciosos a partir de estas fuentes son escasos. Sin embargo algunos trabajos pioneros proveen excelentes protocolos y modelos para la evaluación paleoparasitológica, como el interesante informe del hallazgo de huevos de *Trichiurus trichiura* en el área intestinal de una víctima inca destinada al sacrificio (Pizzi & Shenmore, 1954). Las momias constituyen la fuente de información más importante para la paleoparasitología humana y gracias a esta ciencia se han podido esclarecer algunos aspectos acerca del origen, por ejemplo, del hombre americano, y de sus rutas de migración. Pues así como existen parásitos endémicos de América, existen los que acompañaron a los humanos desde su origen en África. De esta forma, se puede considerar a los parásitos como marcadores homínidos, o sea, elementos que pueden dar pistas sobre la evolución de este grupo de primates. Al mismo tiempo se reconstruye la historia evolutiva de los agentes infecciosos.

Una de las importantes fuentes de información son las momias más antiguas del mundo, que se encuentran en Sudamérica. Pertenecen a la cultura Chinchorro que existió hace alrededor de 9000 años en las costas de lo que hoy es Chile. El empleo de estas momias y otras alrededor del mundo, así como de coprolitos, ha permitido a los investigadores, de diferentes disciplinas, dar respuesta a algunas preguntas referentes a la forma de vida, costumbres y posibles causas de muerte de estos seres humanos ancestrales. Estas causas son muy variables e incluyen traumas, enfermedades hereditarias, condiciones ambientales y enfermedades infecciosas.

Paleoparasitología: Es una disciplina relativamente nueva que se basa en el concepto del parasitismo como fuente de variación y evolución. Esta ciencia se beneficia de los conocimientos generados por otras disciplinas como



Figura 1. Cuerpo humano momificado espontáneamente perteneciente a la cultura Chinchorro.

la historia, la antropología, la medicina, la paleontología, la palinología, la geografía y la genética, para ayudar a reconstruir la historia de la vida en nuestro planeta, en un proceso retroalimentativo entre todas estas disciplinas. Otra importante rama de la ciencia que ayuda al esclarecimiento de estos temas es la epizootiología, la cual estudia las epidemias y como éstas se manifestaron en la historia. Permite correlacionar la distribución de las especies con el impacto patológico, la abundancia de las especies y posibles migraciones.

La etnografía: Los códices de San Martín de la Cruz (1552) y el Florentino de Sahagún (1530) constituyen fuentes importantes de información. Hay claras descripciones de *Ascaris lumbricoides* y *Toxocara canis* inmediatamente después de la conquista de México. También

se hace referencia a *Enterobius vermicularis*. Se ha podido establecer por ejemplo el uso, por parte de los aztecas, de plantas que se cocinaban para producir “medicina que mata gusanos”. Los dibujos originales de herbalistas aztecas muestran plantas utilizadas como antihelmínticos y aún no identificadas en tiempos actuales.

aADN: La recuperación y el análisis de aADN (ADN antiguo o ADN fósil) proveniente de especímenes paleontológicos, arqueológicos, ejemplares de plantas y animales conservados en museos así como especímenes forenses, son un blanco importante para el análisis genético a través de su amplificación.

El término de ADN fósil se refiere a cualquier traza de ADN proveniente de un organismo muerto o también al ADN de un organismo vivo encontrado extracorporeamente. Así pues, cualquier tipo de ADN que haya sufrido procesos autolíticos o diagenéticos o cualquier tipo de fijación se considera como aADN (Herrmann & Hummel, 1994). La detección de ADN proveniente de restos antiguos (oscila entre menos de 100 años hasta millones de años) se ha convertido en una nueva y fascinante área de investigación con muchas implicaciones, abriendo la posibilidad de estudios evolutivos a nivel molecular en una escala de tiempo ilimitada. El estudio del aADN es un campo relativamente nuevo y está emergiendo como una herramienta valiosa para reconstruir el pasado de una manera muy precisa y en particular el origen de las enfermedades infecciosas humanas. Con el advenimiento de la amplificación *in vitro* del ADN, gracias al descubrimiento de la reacción en cadena de la polimerasa (RCP) en la década de los 80's, la biología molecular se revolucionó abriendo campos nuevos en su aplicación y análisis. Diversas disciplinas como la arqueología, las ciencias forenses, la paleoparasitología, la epidemiología molecular se han beneficiado del análisis de aADN.

Diversas aplicaciones que resultan de la investigación del AND fósil incluyen:

- aADN recuperado de tejidos momificados de humanos y animales.
- aADN recuperado de coprolitos.
- Recuperación de aADN de organismos atrapados en ámbar.
- aADN recuperado de especímenes de plantas y animales en colecciones de museo.
- aADN aislado de semillas de plantas o compresión de fósiles.

- aADN aislado de sedimentos orgánicos de pozos sépticos antiguos.

Métodos tradicionales de diagnóstico

Reconstrucción de coprolitos: Los coprolitos se encuentran con alguna frecuencia en restos momificados y pueden someterse a métodos sencillos de rehidratación y reconstrucción sumergiéndolos en una solución de Fosfato trisódico al 0.5%. Una vez obtenido el material reconstituido, este puede someterse a métodos de concentración, tales como centrifugación, formol-eter, métodos de flotación, etc., con el ánimo de poder visualizar mejor el posible material parasitario presente. Huevos de helmintos, fracciones de larvas y eventualmente quistes, son algunos de los elementos que pueden ser recuperados e identificados a través de la rehidratación de los coprolitos.

Métodos histológicos: Los diferentes tejidos momificados también pueden reconstruirse cuidadosamente y ser sometidos a cortes histológicos para luego ser coloreados y observados al microscopio de luz. Otras preparaciones podrían ser destinadas a su observación por el microscopio electrónico. La identificación de la presencia de parásitos intracelulares en ejemplares infectados se puede realizar de manera muy específica.

Métodos inmunológicos: Recientemente nuestro grupo de investigación ha logrado la recuperación de anticuerpos séricos a partir de tejidos momificados haciendo posible la determinación de infecciones a las cuales estaban sometidos los pobladores antiguos. Mediante la técnica de cromatografía de afinidad, en donde se busca la afinidad entre dos moléculas (proteína G acoplada a sefaroza 4B de manera covalente) muestra elevada afinidad por las inmunoglobulinas. Los anticuerpos son de carácter glicoproteico; al hidratar en una solución de fosfato trisódico, los tejidos que reciben gran irrigación sanguínea como el corazón, el hígado y el bazo, fue posible purificar inmunoglobulinas del tipo G en una concentración suficiente para llevar a cabo exámenes diagnósticos mediante pruebas convencionales tales como Inmunofluorescencia Indirecta (IFI) o ELISA. Como es sabido la determinación de la producción de anticuerpos contra diferentes antígenos es utilizada para el diagnóstico de muchas enfermedades infecciosas. Seguramente las inmunoglobulinas aisladas por este método podrán dar luces para determinar la causa de las infecciones ocasionadas también por hongos, virus y bacterias. La utilización de anticuerpos monoclonales constituye otra herramienta que ofrece una muy alta especificidad en pruebas convencionales de diagnóstico tales como ELISA, IFI

o radioinmunoensayo (RIA). Los anticuerpos monoclonales pueden ser producidos en el laboratorio y pueden estar dirigidos virtualmente contra cualquier tipo de antígeno. Teniendo esta herramienta a la mano, es posible buscar antígenos parasitarios en diferentes tejidos utilizando la técnica de inmunoperoxidasa (IP) o de IFI y también en paleo heces. Los anticuerpos monoclonales se obtienen a partir de la fusión de células de mieloma y linfocitos sensibilizados. Los híbridos resultantes conservan la propiedad de rápida multiplicación celular del mieloma y la característica de síntesis y secreción de anticuerpos de los linfocitos. Se pueden clonar y mantener indefinidamente en medios de cultivo celular o congelados. Hoy en día se encuentra una enorme gama de anticuerpos monoclonales que cubren un amplio espectro diagnóstico.

Métodos de biología molecular: A pesar de que los exámenes directos permiten conocer la morfología de ciertas estructuras de los parásitos o huevos, o quistes de los mismos, se hace muchas veces difícil su hallazgo así como la interpretación de los resultados. Estructuras frágiles de los organismos parasitarios multicelulares pueden destruirse fácilmente a través del tiempo dificultando la labor de su identificación. Los parásitos unicelulares, como es lógico, son prácticamente imposibles de ser detectados a través de los métodos convencionales de diagnóstico. Los métodos en biología molecular sin duda, se han convertido en una herramienta poderosa en el estudio genético permitiendo el análisis de aDNA proveniente de cuerpos humanos momificados y también de animales. Desde el punto de vista de la parasitología estas técnicas proveen también una fuente de información muy valiosa. Muchas veces los organismos que parasitaban a los humanos primitivos y a pobladores antiguos son posibles de ser detectados y de esta manera se pueden establecer correlaciones entre los microorganismos y sus huéspedes y deducir por ejemplo rutas de migración, interrelaciones entre diferentes grupos poblacionales etc. La metodología desarrollada en biología molecular permite no solamente la identificación específica del parásito sino también provee información genética del mismo organismo. A partir de los años 90 y con el advenimiento de la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa RCP, ésta se convierte en la técnica de elección preferida por los investigadores, debido a la escasa cantidad de ADN que se requiere para la amplificación y su posterior análisis. La RCP permite amplificar prácticamente cualquier ADN de cualquier célula obtenido a partir de tejidos. La técnica se puede desarrollar utilizando fracciones de ADN (iniciadores) que permiten el proceso de replicación de un fragmento determinado con la ayuda de una enzima polimerasa, la pre-

sencia de nucleótidos y una temperatura de anillaje adecuada proporcionada por un termociclador. Hoy día se puede amplificar aDNA a partir de cortes histológicos *in situ*, revelándose la amplificación con el uso de material radioactivo o enzimático. La hibridación con sondas específicas, es decir con secuencias propias del organismo también marcadas permite la confirmación del producto de amplificación de la RCP. La amplificación de determinadas fracciones de ADN hace posible una identificación mucho más fina y sutil del parásito, además de brindar información adicional acerca de su filogenia y proceso evolutivo a través del tiempo, como por ejemplo la amplificación de genes ribosomales. En un genoma eucariótico se presentan numerosas copias de los genes de 5S y del rARN principal; estos genes forman parte del ADN repetitivo medio. Los cientos o miles de copias del gen principal del rARN se conocen como ADN ribosómico (rADN) y se encuentran agrupadas en la región organizadora del nucleolo de uno o más cromosomas del genoma. Se ha demostrado que se sintetizan numerosos transcritos a un mismo tiempo a partir de un solo gen de rARN y que todos los genes de rARN organizados en tándem participan simultáneamente en la transcripción. Aunque una especie determinada presenta espaciadores con secuencias muy similares, puede existir homología muy escasa entre los organismos estrechamente relacionados. Esto podría indicar que no existe ninguna presión selectiva para mantener una secuencia espaciadora determinada presentándose numerosas variaciones entre especie y especie. Dentro de los genes ribosomales existen secuencias que han evolucionado de un modo relativamente lento y han sido expuestas a presiones de selección fuertes por lo que permanecen constantes en los individuos. Por lo contrario, las secuencias espaciadoras de estos genes han evolucionado de una manera rápida presentando una alta variabilidad dentro de especies de un mismo género o dentro de poblaciones. Estos hechos permiten hallar relaciones filogenéticas entre los individuos teniendo en cuenta que las secuencias que permanecen constantes permitirán el estudio de individuos lejanamente relacionados, mientras que las secuencias espaciadoras que varían mucho serán de interés para el estudio de individuos cercanamente relacionados. Los ácidos nucleicos son moléculas muy estables.

La primera extracción exitosa de aADN y aARN se llevó a cabo en 1980 por parte de un grupo de científicos chinos, a partir de un cartilago de costilla perteneciente a la antigua dama de Mawangtui, un cuerpo preservado por más de 2.000 años. La primera amplificación de aADN se llevó a cabo en un espécimen de museo en 1984, a partir de un ejemplar de quagga, un animal extinto hace relati-

vamente poco tiempo y evolutivamente cercano a los caballos modernos (**Higuchi et al.**, 1984). Un fragmento de ADN mitocondrial de este espécimen fue amplificado y secuenciado. Un año mas tarde, **Pääbo** en 1985, logró amplificar aADN a partir de una momia egipcia de 2.400 años de antigüedad. Fragmentos de ADN fueron amplificados a partir de un hueso humano de 5 500 años de antigüedad (**Hanni et al.**, 1990).

Estos descubrimientos fueron sobrepasados en tiempo con la amplificación de aADN de hojas de *Magnolia* fosilizadas, datadas de 18 millones de años (**Goldenberg et al.**, 1990). También se encuentran registros que describen el aislamiento exitoso de ADN fósil a partir de termitas embebidas en ámbar y que datan entre 25 y 30 millones de años (**DeSalle et al.**, 1992).

Pistas sobre el hombre americano

Acerca de la evolución y dispersión de algunos organismos parásitos se ha podido establecer que estos fueron procesos continuos que divergieron cuando las masas continentales actuales se separaron del súper continente Pangea hace 100 millones de años. En ese momento empezaron a encontrar nichos ecológicos y a crear relaciones huésped-parásito muy bien definidas, logrando eficientes métodos de dispersión y, en algunos casos, incluyendo dentro de su ciclo de vida a varios huéspedes diferentes. Este proceso en el continente americano tomo miles de años en establecerse, y se supone que existió un punto de equilibrio, el cual fue roto gracias a las interacciones de los primeros humanos pobladores del continente con el medio ambiente. Nuestros antepasados adquirieron estos parásitos de animales, dando cabida a las primeras enfermedades infecciosas, que son las mismas que hoy nos afectan. La capacidad de infectar a los humanos fue posible gracias a que estos organismos no eran completamente especialistas en las relaciones con sus huéspedes, al contrario estas tienen cierto grado de plasticidad, gracias a la variedad morfológica y fisiológica de los parásitos, que les permite tener una amplia gama de huéspedes. Algunas teorías sobre el inicio de las culturas americanas aseguraban que América era un continente libre de parásitos y que estos habían llegado al nuevo mundo con los colonizadores europeos durante la época de la Conquista. Sin embargo, se ha demostrado que varios parásitos autóctonos de América, les dieron la bienvenida a los primeros hombres que llegaron al Nuevo Mundo, causándoles enfermedades debilitantes y mortales (**Reinhard**, 1998). El examen de diversos restos humanos, entre los que se encuentran cazadores de focas de Alaska, pintores prehistóricos de cuevas en Norte Améri-

ca y agricultores Incas en el Perú, han llevado al hallazgo de una serie de parásitos propios de América. Algunos de estos parásitos resistieron el frío que enfrentaron los primeros inmigrantes humanos, que venían desde el Viejo Mundo a través del estrecho de Bering, durante el Pleistoceno, mucho antes de la llegada de los europeos a América.

Los primeros habitantes

El establecimiento, la dispersión y la evolución de organismos parásitos en el continente americano fue un proceso evolutivo continuo que empezó probablemente cuando el supercontinente Pangea se dividió y se separaron las masas continentales actuales, hace alrededor de 100 millones de años. Al igual que todas las especies animales o compartieron los habitats en los continentes separados o se convirtieron en especies endémicas ocupando nichos específicos y guardando ciclos de huésped-parásito bastante definidos. Es importante tener en cuenta que muchas entidades parasitarias se transmiten a través de insectos vectores, muchos de los cuales se alimentan de sangre de animales silvestres y transmiten los parásitos, convirtiéndolos en reservorios. Estos ciclos de transmisión tomaron miles de años en establecerse y en la gran mayoría de los casos se logró un equilibrio huésped-parásito muy bien establecido que solamente se vio alterado cuando el hombre comenzó a intervenir el medio ambiente para construir sus viviendas, cazar y obtener recursos energéticos para su subsistencia.

El origen y la dispersión de humanos al Nuevo Mundo coincidieron con la última parte de las glaciaciones del Pleistoceno y su distribución fue influida por estas glaciaciones de muy diversas formas. El proceso se aceleró periódicamente cuando el estrecho de Bering se angostó suficientemente para permitir el cruce de los humanos hacia el continente americano. Se han realizado excavaciones arqueológicas desde las islas Aleutianas a través de las costas occidentales de los Estados Unidos y Canadá hasta las costas de México, Centro y Sudamérica. La evidencia más cercana de la presencia de actividades humanas data de alrededor de 15.000 años atrás, probablemente 10 a 12.000 años, para comenzar actividades de asentamientos humanos en Sudamérica.

Varias especies de parásitos tuvieron tiempo suficiente para establecerse y para infectar a los primeros humanos que pisaban el Nuevo Continente y a su vez otras especies transportadas pasivamente por estos nuevos visitantes empezaron a encontrar nuevos albergues

y refugios en otras especies animales. El contacto entre hombres y animales se hizo cada vez más estrecho al domesticar muchos de ellos alrededor de sus viviendas y de su peridomicilio en donde se llevaban a cabo actividades de siembra y agricultura en general. Los continentes se reconectaron definitivamente cuando los viajes transoceánicos se volvieron frecuentes, hacia el siglo XVI, resultando en una rápida colonización global muchas veces por parte de humanos exóticos con sus animales domésticos y plantas sumadas a las plantas silvestres y animales salvajes locales. Procesos similares de introducción y extinción continúan hoy en día a pesar de las modernas medidas de control en salud pública en las fronteras.

Los primeros parásitos

Las principales teorías evolutivas actuales proponen que la vida sobre la tierra se originó gracias al parasitismo, inicialmente de unas moléculas a otras, dando paso a la formación de las primeras células, y posteriormente de células a células, permitiendo la diversificación de las formas moleculares y celulares. Estas teorías basan sus supuestos en las evidencias moleculares encontradas en los diferentes niveles de vida y organización celular. Por ejemplo, se han observado secuencias cortas de ADN móvil, denominadas transposones, que se insertan, por acción enzimática, en el ADN de las células, por lo que son considerados parásitos de ADN. Son moléculas como los transposones, las que les han permitido a los investigadores establecer una fuerte relación entre el parasitismo y la evolución de la vida sobre la tierra.

Un buen ejemplo de cómo la vida ha evolucionado gracias a las relaciones parasitarias es la aparición de los cloroplastos y las mitocondrias. Estos, siendo originalmente pequeñas células parásitas de células más grandes, supuestamente se convirtieron en organelos de las células eucariotas. El hallazgo de este tipo de hechos han reevaluado el concepto de parasitismo; actualmente se define un parásito como cualquier forma de vida, o compuesto orgánico capaz de multiplicarse, que encuentre su hogar (nicho ecológico) en otra forma de vida. Tan importante ha sido este mecanismo en la historia de la vida, que se estima que en la naturaleza existe un número de especies parásitas diez veces mayor que el número de especies de vida libre.

Las primeras enfermedades infecciosas

Se ha escrito acerca del origen y rutas de dispersión y del impacto de microbios en el Nuevo Mundo precolom-

bino tales como *Treponema* y el virus del Sarampión, así como también de enfermedades ocasionadas por protozoos parásitos como *Plasmodium* y *Trypanosoma*.

La paleo-epidemiología de enfermedades causadas por helmintos también ha recibido especial mención debido a su amplia ocurrencia. La información de la fauna de helmintos del Nuevo Mundo se ha obtenido principalmente de paleo heces y de cuerpos momificados. Es muy probable que algunas helmintiasis compartidas por humanos, por sus animales domésticos y salvajes tuvieran una distribución circunártica o que fueran comunes a los dos continentes. Trichinosis y Toxocariasis son claros ejemplos. Sin embargo, dentro de los parásitos estrictamente humanos solo *Enterobius vermicularis* y *Trichiurus trichura* están bien documentados al igual que *Ancylostoma duodenale*, que pudieron haber sido transferidos de Asia a América aún cuando parece no haber evidencia para confirmarlo. Por esta razón es muy importante hacer uso de técnicas muy sensibles y específicas que nos permitan rastrear de manera precisa estas incógnitas. Las costumbres alimenticias de nuestros antepasados les causaron graves problemas de salud. El hábito de comer carne y la falta de combustible para cocinarla en el Ártico, permitieron que los primeros Americanos se infectaran con gusanos del género *Trichinella*, que en gran número pueden causar la muerte y terribles dolores musculares, además de inflamaciones alrededor de los ojos y hemorragias debajo de las uñas. Un ejemplo que permite entender más claramente cómo se produjeron las primeras infecciones de Nematodos de la especie *Trichinella nativa* es el consumo de carne de oso polar cruda, por parte de los primeros americanos. Los quistes de esta especie infectan al oso polar. La forma en que lo infectan también se debe a sus hábitos alimenticios. El oso se alimenta de huevos de aves que a su vez han comido roedores infectados con el parásito. Debido a su rápido metabolismo, las aves, al defecar, expulsan pedazos de carne del roedor sin digerir, frecuentemente encima de sus huevos, y es en estos pedazos donde se encuentran los quistes del parásito. Los pequeños gusanos del género *Trichinella* invadieron los músculos y hasta el corazón de los americanos primitivos. Las lombrices de cabeza espinosa pertenecientes a los Acantocéfalos, perforaron las paredes intestinales de los antiguos habitantes de la Gran Cuenca de Estados Unidos. En la región andina, protozoos pertenecientes al género *Leishmania* ulceraron gargantas y bocas. Otros, pertenecientes al género *Trypanosoma*, causaron daños cardíacos y provocaron deformaciones en el tracto digestivo de sus víctimas y muertes súbitas por falla cardíaca.

Nuevas teorías

La búsqueda de respuestas sobre la presencia de ciertos parásitos en el Nuevo Mundo ha llevado a la formulación de nuevas teorías sobre el poblamiento de América. Este es el caso de la Uncinaria, género de Nemátodos que causa un tipo de anemia, la cual afectó a seres humanos en América antes del contacto con los conquistadores. Los nemátodos del género *Enterobius*, que aunque no causan infecciones mortales, producen severas molestias a sus huéspedes, aún hoy día, han acompañado al hombre desde sus orígenes en África. Estos parásitos han sido encontrados en restos de al menos 10.000 años de antigüedad. De igual forma este parásito es mencionado en el Codex Florentino escrito por médicos Aztecas y recopilados en 1550. La presencia de estos parásitos en muestras prehispánicas ha generado una gran controversia, ya que al ser parásitos tropicales (endémicos de zonas ecuatoriales) muy seguramente no habrían podido realizar la travesía a través del Ártico debido a las bajas temperaturas. Para responder a esta incógnita, se ha propuesto que la presencia de estos parásitos es una evidencia del contacto transpacífico entre América y las culturas asiáticas. Últimamente se ha dado otra posible explicación a la presencia de estos parásitos en el Nuevo Mundo, que ha surgido a partir de un fenómeno biológico conocido como hipobiosis, que consiste en que los organismos pasan largos periodos de tiempo en un estado "durmiente" o latente durante el cual detienen su desarrollo hasta que las condiciones vuelvan a ser óptimas. Este fenómeno ha sido observado en Uncinaria y muy posiblemente permitió a estos organismos sobrevivir a la migración trans Beringia. Varios parásitos de animales que ya estaban presentes en América antes de la llegada del hombre en el Pleistoceno, se adaptaron a la presencia de los nuevos primates extremadamente curiosos y entrometidos, llegando a establecer relaciones parasíticas con ellos. Es el caso de unos platelmintos, que pueden llegar a medir hasta 5 metros de longitud y que se alojan en el intestino delgado de sus huéspedes. Pertenecientes al género *Diphyllobothrium*, existían en América mucho antes de la llegada del hombre y se encontraban como parásitos de animales, entre ellos varios peces y el león marino, *Otaria byronia*, como huésped final. Debido al consumo de pescado crudo por parte de los hombres recién llegados, estos se convirtieron en huéspedes finales alternativos, sufriendo una enfermedad a veces bastante grave y debilitante que incluye anemia perniciosa, un tipo de anemia que se relaciona con deficiencia de la vitamina B12. Esta relación parásito-animal-hombre, ha permitido desarrollar nuevas ideas acerca de la evolución de los parásitos.

La detección de *Trypanosoma cruzi* en las momias humanas más antiguas del mundo

La escogencia de la tripanosomiasis americana, mejor conocida como enfermedad de Chagas, para el presente estudio, se debió principalmente a la alta prevalencia de esta infección en la región. Inicialmente, intentamos identificar la presencia del parásito *Trypanosoma cruzi* con el aislamiento y amplificación por RCP de aADN obtenido de cuerpos humanos momificados que datan 4.000 años de antigüedad, habitantes de desierto de Atacama al norte de Chile (Guhl *et al.*, 1997, 1999). La amplificación de un segmento de ADN de 330 pares de bases correspondiente a una fracción del ADN del cinetoplasto del parásito.

El cinetoplasto del parásito consiste de una compleja red de ADN, conformada por 50 maxicírculos y 10.000 minicírculos de ADN. Los minicírculos constan a su vez de cuatro bloques de secuencia conservada, los cuales al ser digeridos con enzimas de restricción permiten obtener diferentes segmentos de oligonucleotidos de longitud diferente. (Figura 2).

Extracción del aADN

Pequeños trozos de aproximadamente 3X3 mm de diferentes tejidos de los cuerpos momificados se rehidrataron en 0.5% de solución de fosfato trisódico a temperatura ambiente por 48 horas. Las muestras fueron centrifugadas por 15 minutos a 1.500 g. El sobrenadante se descartó y se agregó 2.5 ml de TENS (tris HCl 10mM, EDTA 50 mM, NaCl 100mM, SDS 0.5%) junto con 10 µl de proteinasa K (stock 10mg/ml) dos veces al día, durante tres días, conservando las muestras a 37°C para la digestión de proteínas.

Se agregaron 200 µl de la muestra digerida a 200 µl de fenol, colocadas en el tubo número 1, después de centrifugar por 5 minutos en microfuga, el sobrenadante se recolectó en el tubo número 2, se agregaron 100 µl de fenol y 100 µl de cloroformo. Después de agitación suave por un minuto, se repitió el proceso de centrifugación, y el sobrenadante se recolectó en el tubo número 3. Después se agregaron 150 µl de H₂O al tubo 2 con el ánimo de obtener una mayor cantidad de ADN repitiendo el procedimiento anterior.

El sobrenadante fue recolectado en el tubo 3 y un volumen igual de cloroformo fue adicionado a la fase acuosa obtenida. El ADN precipitado por adición de 10% del volumen inicial de acetato de sodio y el doble volumen de etanol absoluto a -20°C precipitado en hielo durante 15 minutos. El sobrenadante fue descartado después de 15 minutos de centrifugación en microfuga. El sedimento se secó a 50°C y fue resuspendido en 30 µl H₂O.

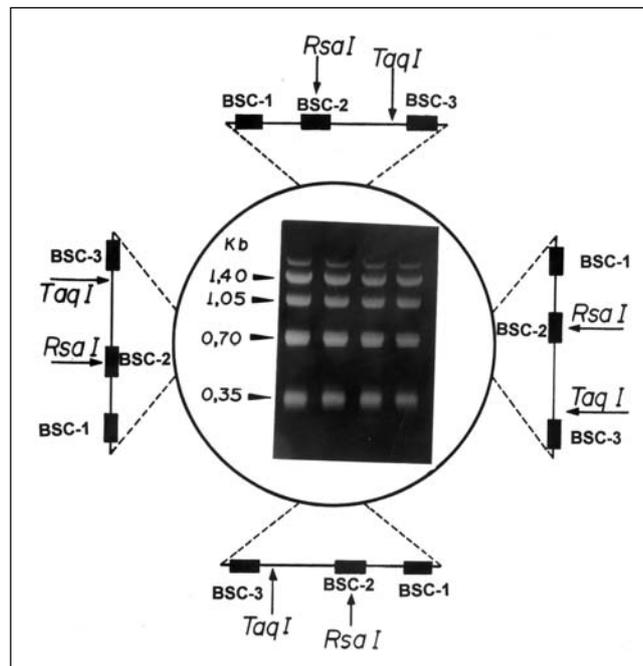


Figura 2. Esquema de un minicirculo de kADN de *Trypanosoma cruzi* con cuatro regiones conservadas. En cada región de 122pb, se muestran los bloques de secuencia conservada: BSC-1, BSC-2, BSC-3 y dos sitios de restricción para las endonucleasas *RsaI* y *TaqI*. En la parte interna del esquema se ilustra un gel de agarosa al 1% en el cual aparecen cuatro canaletas idénticas con muestras de ADN de minicirculos digeridos con *HaeIII*. Los cuatro fragmentos de 0.35, 0.70, 1.05 y 1.40kb confirman la existencia de cuatro regiones repetidas dentro del minicirculo.

Extracción de ADN a partir de muestras de sangre

T. cruzi fue cultivado en sangre de ratón. Tanto la sangre infectada como la sangre libre de tripanosomas se utilizaron como control y al ADN extraído con guanidina-EDTA se agregó un volumen igual de guanidina 6 M/EDTA 0.2 M, pH 8.

La mezcla se dejó a temperatura ambiente por 7 días. Para obtener los minicirculos de kADN se calentaron alícuotas de 200 µl por 15 minutos (Britto *et al.*, 1993) y luego fueron mantenidos a temperatura ambiente por otros 7 días. El ADN fue extraído siguiendo el procedimiento mencionado anteriormente.

Amplificación de ADN de *T. cruzi*

Para cada una de las reacciones en cadena de la polimerasa (RCP), se utilizó un termociclador (PTC-100; MJ Research Inc., Watertown, MA). La RCP se realizó usando los siguientes iniciadores:

S35: 5'-AAATAATGTACGGG-KGAGATGATGCAGTA-3'

S36: 5'-GGTTCGATTGGGGTTGGTGTAAATATA-3'

(Avila *et al.*, 1991; Britto *et al.*, 1993) que amplifican un segmento de 330 pb de la región variable del minicírculo de kADN de *T. cruzi*.

El siguiente protocolo fue usado para una reacción de 20 µl: buffer 10X (Promega, Madison, WI), MgCl₂ 2.5 mM (Promega), KCl (50 mM) dNTPs(200µm), S35 y S36 10 picomoles cada uno, y 1 unidad de Taq (Promega). Luego fueron agregados 2 µl del ADN extraído para cada 20 µl de reacción. El perfil térmico usado fue de 35 ciclos a 94°C por 1 minutos, 60°C por 1 minuto, y 72°C por un minuto, con un paso inicial de denaturación de 5 minutos a 94°C y una extensión final de 72°C por un periodo de 5 minutos. La electroforesis fue realizada en un gel de poliacrilamida al 5% con una alícuota de 10 µl para la visualización del fragmento de ADN amplificado. En este estudio una positiva identificación del kADN de *T. cruzi* se define como el aislamiento de una banda de 330 pb en el gel de electroforesis.

Tanto la extracción, como la mezcla de los reactivos para la RCP y la electroforesis fueron realizadas en cuartos separados. Todos los materiales fueron previamente irradiados con luz ultravioleta (UV). Otras medidas, como el uso de puntas anti-aerosoles también fueron tenidas en cuenta.

En ensayos de laboratorio subsiguientes y con el ánimo de aumentar la sensibilidad de la prueba se estandarizó un RCP anidado el cual amplifica un segmento de ADN más corto y que corresponde a un fragmento de 70 pb (Madden *et al.*, 2001). Teniendo en cuenta lo anterior se

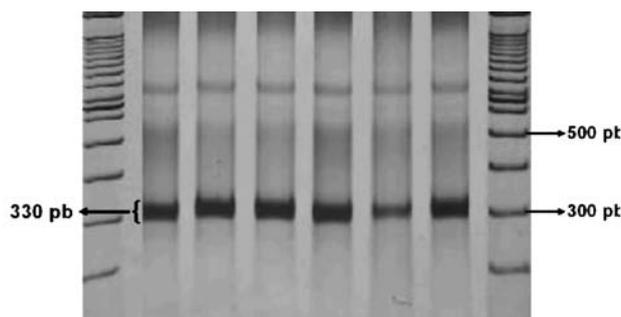


Figura 3. Productos de amplificación de *Trypanosoma cruzi* en gel de poliacrilamida al 5% utilizando los iniciadores S35 y S36.

estudiaron 283 cuerpos humanos momificados pertenecientes a 12 culturas prehispánicas que datan de 400 hasta 9 000 años de antigüedad, la tabla 1 muestra la secuencia de culturas de las poblaciones estudiadas, el periodo relativo, la distribución de las muestras y el porcentaje de positividad obtenido.

El 41% de los tejidos extraídos reaccionaron positivamente dando amplificación por RCP, los datos de prevalencia encontrados no demuestran diferencias estadísticamente significativas entre los grupos estudiados a nivel individual, ni tampoco entre los subgrupos comparados con base en el sexo, la edad o el peso del espécimen estudiado. Estos resultados sugieren que el ciclo selvático de la enfermedad de Chagas ya estaba bien establecido en el tiempo cuando los primeros humanos (miembros de la cultura Chinchorro) que habitaron por primera vez este segmento de la costa pacífica de los Andes, y que inadvertidamente entraron en contacto con mucho otras especies de mamíferos que actúan como reservorios del parásito.

Tabla 1. Secuencia de las culturas de las poblaciones estudiadas, período relativo, distribución de las muestras y porcentaje de positividad para *Trypanosoma cruzi*.

Cultura	Rango de tiempo	No. de muestras	Porcentaje positivos
Chinchorro temprano	7050 - 3000 BC	18	39
Chinchorro tardío	3000 - 1500 BC	53	43
Alto Ramírez temprano	1000 BC - 0	16	25
Alto Ramírez tardío	0 - 400 AD	20	35
Cabuza	400 - 1250 AD	27	41
Maitas	1000 - 1250 AD	25	40
Chiribaya	1050 - 1250 AD	70	47
M8 (Chiribaya alto)	1050 - 1250 AD	16	19
San Miguel	1250 - 1350 AD	9	33
Inca	1450 - 1550 AD	26	50
Colonial	1550 - 1850 AD	3	67
Todas las culturas	7050 BC - 1850 AD	283	40.6

Las edades fueron determinadas por dataje con carbono radioactivo.

Referencias bibliográficas

- Aufderheide, A.** 2003 *The Scientific Study of Mummies*. Published by the University Press, Cambridge, UK. 608 pp.
- Avila, H. A., Sigman, D. S., Coohen, L. M., Milikan, R. C. & Simpson, L.** 1991. Polymerase Chain Reaction Amplification of *Trypanosoma cruzi* kinetoplast minicircle DNA isolated from whole blood lysates: diagnosis of chronic Chagas' disease. *Mol Biochem Parasitol* **48**: 211-222.
- Britto, C., Cardoso, M. A., Wincker, P., Morel, C. M.,** 1993. A simple protocol for the physical cleavage of *Trypanosoma cruzi* kinetoplast DNA present in blood samples and its use in polymerase chain reaction (PCR)-based diagnosis of Chagas disease. *Mem Inst Oswaldo Cruz* **88**: 171-172.
- DeSalle, R., Gatesy, J., Wheeler, W. & Grimaldi, D.** 1992. DNA sequences from a fossil termite in Oligo-Miocene amber and their phylogenetic implications. *Science* **257**: 1933-1936.
- Goldenberg, E. M., Giannasi, D. E., Clegg, M. T., Smiley, C. J., Durbin, M., Henderson, D. & Zurawski, G.** 1990. Chloroplast DNA sequence from a Miocene Magnolia species. *Nature* **344**: 656-658.
- Guhl, F., Jaramillo, C., Yockteng, R., Vallejo, G. A. & Cárdenas - Arroyo, F.** 1997. *Trypanosoma cruzi* DNA in human mummies. *Lancet* **349**: 1370.
- Guhl, F., Jaramillo, C., Vallejo, G. A., Yockteng, R., Cárdenas-Arroyo, F., Fornaciari, G., Arriaza, B. & Aufderheide, A.** 1999. Isolation of *Trypanosoma cruzi* DNA in 4,000-year-old mummified human tissue from northern Chile. *Amer. Jour. Phys. Anthropol.* **108**: 401-407.
- Hanni, C., Laudet, V., Sakka, M., Begue, A. & Stehelin, D.** 1990. Amplification of mitochondrial DNA fragments from ancient human teeth and bones. *C. R. Acad. Sci. (Paris) III.* **310**: 365-370.
- Hawdon, J. & Johnston, S.** 1995 Hookworm in the Americas: An alternative to transpacific contact. In : *Proceedings of the II World Congress on Mummy Studies*. Cárdenas-Arroyo F. & Rodriguez-Martín C. Ed. 207-211.
- Herrmann, B. & Hummel, S.** 1994. *Ancient DNA: recovery and analysis of genetic material from paleontological, archeological, museum, medical and forensic specimens*. Editors. Springer - Verlag New York Inc. 263pp.
- Higuchi, R., Bowman, B., Freiberger, M., Ryder, O. A. & Wilson, A. C.** 1984. DNA sequences from a quagga, an extinct member of the horse family. *Nature* **312**: 282-284.
- Madden, M., Salo, W. L., Streitz, J., Aufderheide, A. C., Fornaciari, G., Jaramillo, C., Vallejo, G. A., Yockteng, R., Arriaza, B., Cárdenas-Arroyo, F. & Guhl, F.** 2001. Hybridization screening of a very short PCR products for paleoepidemiological studies of Chagas disease. *BioTechniques*. **30**: 102-109.
- Pääbo, S.** 1985. Molecular cloning of ancient Egyptian mummy DNA. *Nature* **314**: 644-645.
- Pizza, J. A. & Shenmore, H.** 1954. Contribuciones a la arqueoparasitología en América. *Boletín Chileno de Parasitología* **9**: 73-75.
- Reinhard, K. J.** 1998. Mummy studies in archeoparasitology. In A Cockburn, E Cockburn, TA Reyman, Editors. *Mummies, Disease and Ancient Cultures*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 377-380.

Recibido el 7 de febrero de 2005

Aceptado para su publicación el 4 de abril de 2005

EFFECTOS NATURALES Y ANTRÓPICOS EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA

por

Juan C. Restrepo^{a,b}, Juan D. Restrepo^{a,c}

Resumen

Restrepo, J. C. & J. D., Restrepo: Efectos naturales y antrópicos en la producción de sedimentos de la Cuenca del río Magdalena. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 239-254. 2005. ISSN 0370-3908.

La cuenca del río Magdalena tiene una producción de sedimentos de $689 \pm 528 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ con valores máximos por encima de $2000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Análisis de regresión múltiple indican que los principales parámetros que explican la varianza en la producción de sedimentos de la cuenca son la escorrentía y el caudal máximo. Para describir la producción de sedimentos se obtuvo un modelo numérico con una eficiencia del 58% ($P < 0.01$) y un error cuadrático medio relativo (ECMR) del 11%. Los análisis de series de tiempo muestran tendencias crecientes en el transporte de sedimentos en el 68% de la cuenca del río Magdalena.

Palabras clave: producción de sedimentos, transporte de sedimentos, erosión, río Magdalena.

Abstract

The Magdalena river basin sediment yield is $689 \pm 528 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ with maximum values up to $2000 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. Multiple regression analysis indicates that runoff and maximum discharges are the major controls to explain Magdalena basin sediment yield variance. A numerical model with a 58% efficiency ($P < 0.01$) and 11% relative root mean square error (RRMSE) was obtained to describe the Magdalena basin sediment yield. Time series analyses show that sediment load have upward trends in 68% of the Magdalena river basin.

Key words: sediment yield, sediment load, erosion, Magdalena river.

^a Grupo de Ciencias del Mar, Departamento de Geología, Universidad EAFIT, Apartado Aéreo 3300, Medellín, Colombia.

^b jrestr48@eafit.edu.co

^c jdrestre@eafit.edu.co

Introducción

La producción de sedimentos es un indicador de la cantidad de material erodado mecánicamente sobre un área dada en un período específico de tiempo y promediado para una zona específica (**Petts & Foster**, 1985); puede ser calculada estableciendo la relación entre la carga sólida transportada por un río en un sitio de referencia y el área de drenaje aguas arriba de este sitio. Los procesos erosivos que se presentan en la cuenca, el transporte de material erodado hacia la red drenaje, así como la competencia del sistema fluvial inciden en la producción de sedimentos. Por lo tanto, la producción de sedimentos es función de la interacción entre parámetros geológicos, hidrológicos y climáticos, así como de los cambios introducidos por la actividad antrópica en el sistema fluvial (**Knighton**, 1984).

A escala global, los estudios sobre producción de sedimentos se han orientado a identificar los parámetros naturales que controlan dicho proceso. Algunos autores han señalado que la producción de sedimentos es controlada, en gran medida, por la actividad tectónica y la configuración del relieve, en tanto que parámetros climáticos (i.e. precipitación, escorrentía y temperatura) presentan un papel secundario al explicar la variación en la producción de sedimentos (**Ahnert**, 1970; **Stallard**, 1988; **Pinet & Souriau**, 1988; **Milliman & Syvitski**, 1992). Partiendo de este enfoque, **Milliman & Syvitski** (1992) señalan que las mayores tasas de producción de sedimentos ($> 5000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) se presentan en pequeñas cuencas del sudeste Asiático y Oceanía, caracterizadas por relieves altos y escarpados y por intensa actividad tectónica. Otros autores afirman que la producción de sedimentos depende de la precipitación media anual, con una respuesta ampliamente regulada por la cobertura vegetal y el tipo de clima dominante (**Holeman**, 1968; **Douglas**, 1967; **Wilson**, 1973; **Jansen & Painter**, 1974).

Investigaciones recientes (**Summerfield & Hulton**, 1994; **Ludwig & Probst**, 1998; **Hovius**, 1998; **Harrison**, 2000), sugieren que la producción de sedimentos es más una función de un conjunto combinado de parámetros físicos que de un solo factor en particular. En un contexto global, **Ludwig & Probst** (1998) encontraron que la producción de sedimentos es controlada por la escorrentía, la variación estacional de la precipitación y la pendiente del terreno, mientras que **Hovius** (1998) indica que el conjunto de variables más eficientes al explicar la varianza en la producción de sedimentos está conformado por el área de la cuenca, la altura máxima, la escorrentía, la temperatura promedio y la variación estacional de la temperatura.

Estadísticas globales sobre producción de sedimentos muestran que las cuencas tropicales presentan magnitudes relativamente altas, comparadas con los valores reportados en cuencas de otras zonas geográficas (**Milliman & Syvitski**, 1992). La producción de sedimentos en cuencas tropicales también se caracteriza por una fuerte variabilidad espacial y temporal, relacionada con los procesos tectónicos, geomorfológicos y climáticos que identifican estas zonas y particularmente con la ocurrencia de eventos de alta intensidad (i.e. sismos, fenómenos de remoción en masa, tormentas torrenciales) (**Stallard**, 1988; **Thomas**, 1994). Hasta ahora, el papel de los eventos de alta intensidad en la producción de sedimentos ha sido poco explorado (**Reading et al.**, 1995).

Para la cuenca del río Magdalena, **Milliman & Meade** (1983) estimaron una producción de sedimentos de $900 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, mientras que **Milliman & Syvitski** (1992) y **Hovius** (1998) calcularon una producción de 920 y $846 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectivamente. La utilización de una base de datos más extensa y detallada les permitió a **Restrepo & Kjerfve** (2000) obtener un resultado más confiable ($560 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$). No obstante estas investigaciones han permitido obtener estimativos más precisos de la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena, aún se desconocen los parámetros que controlan la erosión y el aporte de sedimentos desde los mayores sistemas tributarios de la cuenca.

Dada la importancia de la cuenca del río Magdalena en el contexto internacional y nacional, este estudio pretende explorar los factores naturales que controlan la producción de sedimentos de la cuenca, estimar el porcentaje de variabilidad que explica cada parámetro físico analizado y a partir de estos resultados, establecer hipótesis sobre la influencia de procesos no estacionarios de aporte de sedimentos (i.e. movimientos en masa, variabilidad climática, efectos antrópicos) sobre el transporte y la producción de sedimentos en la cuenca.

La cuenca del río Magdalena en el contexto de la producción de sedimentos

En un contexto global, la tectónica ejerce un control de primer orden sobre la producción de sedimentos (**Pinet & Souriau**, 1988; **Stallard**, 1988; **Milliman & Syvitski**, 1992). Se ha encontrado que en cuencas de primer orden con tamaños similares, los mayores valores de producción de sedimentos se registran en áreas con influencia tectónica, presentándose diferencias hasta de 3 ordenes de magnitud con respecto a áreas geológicamente estables (**Milliman & Syvitski**, 1992). El área andina colombiana se encuentra en una zona geológicamente activa,

los valles del Magdalena y del Cauca constituyen depresiones tectónicas delimitadas por sistemas de fallas (i.e. Ibagué, Garzón-Suaza, Palestina, Bucaramanga, Cuaca-Romeral, entre otras), los cuales ejercen un marcado control estructural sobre el sistema fluvial del Magdalena (Mojica & Franco, 1992). Este control tectónico da lugar a movimientos relativos de bloques, exponiendo superficies levantadas a la acción de procesos erosivos.

En cuencas de orden mayor, una alta proporción de los sedimentos transportados por los ríos proviene de zonas altas y con pendientes pronunciadas ($>35^\circ$), correspondientes a la parte alta de la cuenca, mientras que en la parte media y baja de la misma, el transporte y la depositación de sedimentos constituyen los procesos dominantes (Guy, 1970). Este patrón no está bien demarcado en el Magdalena, ya que la estructura y configuración de la cuenca (valles paralelos al sistema de cordilleras), da lugar a que los procesos de erosión, transporte y sedimentación, se presenten a lo largo de toda la cuenca. Para el valle alto del Magdalena, entre la laguna de La Magdalena y Honda, el transporte de sedimentos es de $125 \times 10^3 \pm 107 \text{ t d}^{-1}$ y el caudal de $1329 \pm 271 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En el valle medio, entre Honda y el Banco, se registra un transporte de sedimentos de $224 \times 10^3 \pm 68 \text{ t d}^{-1}$ y un caudal de $4243 \pm 1124 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En la parte baja de la cuenca, entre el Banco y Calamar, el transporte de sedimentos es $393 \times 10^3 \pm 132 \text{ t d}^{-1}$ y se registra un caudal de $7160 \pm 1885 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

De los parámetros climáticos que influyen sobre la producción de sedimentos, la precipitación ha sido el más estudiado (Ludwig & Probst, 1998), encontrándose que a escala global se presenta una relación compleja entre estos parámetros, con picos máximos de producción de sedimentos en zonas áridas con precipitaciones de 250 mm a^{-1} , en áreas mediterráneas húmedas ($1250\text{-}1350 \text{ mm a}^{-1}$) y regiones tropicales muy húmedas ($>2500 \text{ mm a}^{-1}$) (Walling & Kleo, 1979). En la cuenca del Magdalena se presenta una alta variabilidad en la precipitación, tanto a

escala temporal como espacial. El valle alto tiene una precipitación promedio de 1500 mm a^{-1} , el valle medio de 2200 mm a^{-1} , mientras que en el bajo Magdalena se presentan precipitaciones del orden de 1600 mm a^{-1} . Las mayores precipitaciones ($>4000 \text{ mm a}^{-1}$) se registran en la parte media de la Cordillera Central y sobre las estribaciones de la Cordillera Occidental (Mesa et al., 1997). En la Tabla 1 se presentan el área de drenaje y algunas características climáticas e hidrológicas de las zonas geomorfológicas en las que se divide la cuenca.

Estudios regionales han mostrado que la conversión de bosques en áreas agrícolas y ganaderas genera incrementos en la producción de sedimentos (Dunne, 1979; Braud et al., 2001; Krishnaswamy et al., 2001; Walling & Fang, 2003). En Asia, se han registrado aumentos superiores al 75% en el transporte de sedimentos como resultado de la intensificación de actividades agrícolas; tales incrementos pueden alcanzar hasta un orden de magnitud dependiendo de las características litológicas y climáticas de las áreas intervenidas (Walling & Fang, 2003). En Colombia se han comunicado aumentos en los procesos erosivos relacionados con (i) la conversión de bosques en pastos para ganadería, (ii) el desarrollo de actividades agrícolas en zonas de fuertes pendientes y (iii) la construcción y operación de obras de infraestructura (Ministerio de Agricultura, 1977; IDEAM, 1998; IDEAM, 2001). Sin embargo, aún no se ha cuantificado el efecto y la magnitud que las actividades antrópicas han tenido en el transporte y la producción de sedimentos de la cuenca del Magdalena durante los últimos 30 años.

Datos y análisis

1. Caracterización física de las cuencas tributarias de segundo orden

Se seleccionaron 27 cuencas tributarias de segundo orden del río Magdalena (Figura 1) de acuerdo con la dis-

Tabla 1. Área de drenaje y principales características climáticas e hidrológicas de las zonas geográficas en las que se divide la cuenca del Magdalena. Las estaciones a) Arrancaplumas, b) El Banco y c) Calamar se muestran en la Figura 1.

	A ⁽¹⁾ (km ²)	P ⁽²⁾ (mm a ⁻¹)	Q ⁽³⁾ (m ³ s ⁻¹)	R ⁽²⁾ (mm a ⁻¹)	R/P ⁽²⁾ (-)	Sa ⁽³⁾ (x10 ³ t d ⁻¹)
Alto Magdalena ^a	55,937	1,535	1,341	901	0.59	148.2
Medio Magdalena ^b	83,514	2,185	4,224	1,259	0.58	189.2
Bajo Magdalena ^c	43,360	1,632	7,106	702	0.43	380.6

Nota: A = área de la cuenca medida en la estación hidrológica de referencia, P = precipitación promedio anual, Q = caudal promedio, R = escorrentía específica, R/P = coeficiente de escorrentía, Sa = transporte promedio de sedimentos en suspensión.

Fuente: ⁽¹⁾ IDEAM, 1995; ⁽²⁾ IDEAM, 2001; ⁽³⁾ IDEAM, 2003.

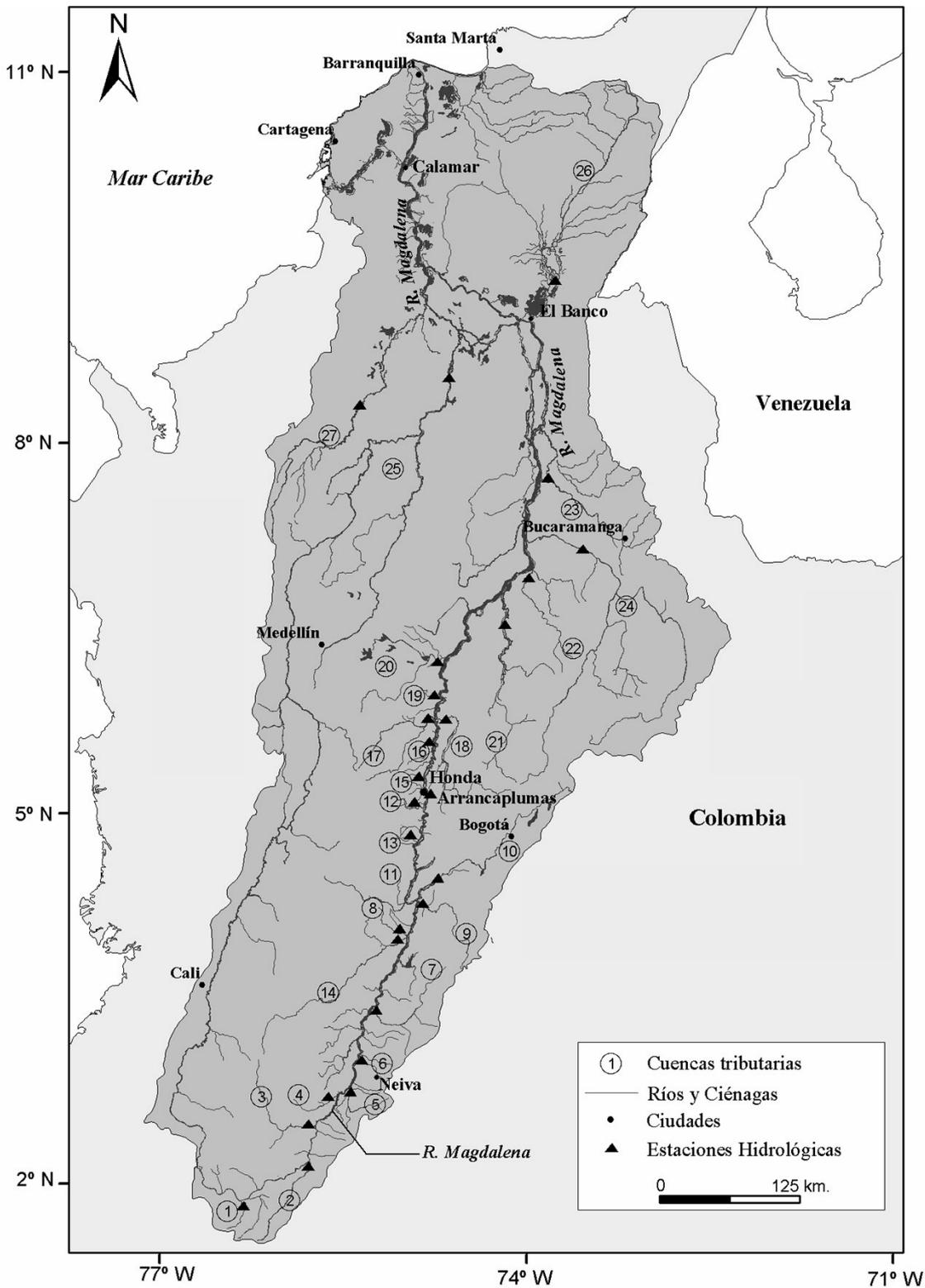


Figura 1. Cuenca del río Magdalena incluyendo las principales cuencas tributarias (círculos numerados) y las estaciones hidrológicas del IDEAM utilizadas para este estudio (triángulos sólidos); el nombre de las cuencas tributarias y su correspondiente numeración es presentada en la Tabla 2.

ponibilidad de datos de transporte de sedimentos en suspensión y se recolectó información morfométrica, topográfica, climática e hidrológica, con el fin de realizar una caracterización física de cada una de ellas (Tabla 2). La definición detallada de los parámetros físicos incluidos en este estudio puede ser consultada en **Hovius** (1998).

Los datos de caudal y transporte de sedimentos fueron obtenidos de los registros históricos del **IDEAM** (2003). En cada una de las 27 cuencas tributarias se obtuvo información multi-temporal de la estación hidrológica más cercana a la desembocadura en el río Magdalena (Figura 1), ya que se asume que la carga de sedimentos registrada en este punto refleja la sumatoria de todos los procesos erosionales y depositacionales que ocurren al interior de la cuenca (**Knighton**, 1984; **Petts & Foster**, 1985). Los registros originales del **IDEAM** (2003) incluyeron valores diarios de caudales ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), concentración de sedimentos en suspensión (kg m^{-3}) y transporte de sedimentos (t d^{-1}).

Mediciones simultáneas de nivel, caudal y concentración de sedimentos en suspensión fueron tomadas por el **IDEAM** entre 1971 y 2000, durante condiciones de caudales altos, intermedios y bajos. Las lecturas diarias de nivel son convertidas a caudal por medio de la ecuación de calibración correspondiente. Posteriormente, los valores de transporte de sedimentos en suspensión son obtenidos a partir de las medidas diarias de concentración de sedimentos y su relación con el caudal por medio de curvas de calibración (**Guy**, 1970). La longitud de las series de transporte de sedimentos de las cuencas tributarias varía entre 10 y 29 años para el período comprendido entre 1972 y 2000. En el 16% de las cuencas tributarias la longitud de las series de transporte de sedimentos es igual o superior a 25 años y ninguna presenta series inferiores a 10 años. La producción de sedimentos, expresada en $\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$, se obtuvo como el cociente entre el promedio interanual de transporte de sedimentos (t a^{-1}) y el área de la cuenca medida en la estación hidrológica de referencia (km^2).

Los datos morfométricos y topográficos fueron calculados a partir de cartografía IGAC a escala 1: 500.000 (**IDEAM**, 2001). Los datos de precipitación fueron obtenidos del software Hidro-SIG v.1.8, un sistema de información geográfica con énfasis en el manejo de información hidro-climática, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia seccional Medellín (**Vélez et al.**, 2000). Los datos de precipitación total y máxima se calcularon a partir del promedio de los valores medios multi-anales correspondientes a las estaciones climatológicas ubicadas en las zonas erosionales de cada cuenca, ya que se asume que gran porcentaje de la carga de sedimentos registrada en una estación hidrológica proviene de las zo-

nas erosionales aguas arriba de la misma (**Hovius**, 1998). Por medio del análisis espectral de 16 imágenes Landsat TM, el **IDEAM** (2001) elaboró un mapa de intensidad de erosión para Colombia el cual fue validado con información bibliográfica de parámetros físicos y de usos del suelo (i.e. tipo de suelo, tipo de cobertura vegetal, distribución de cobertura vegetal, morfología). En este mapa se identificaron 5 niveles de intensidad de erosión, desde muy baja hasta muy alta. Para este estudio se consideraron las estaciones climatológicas ubicadas en zonas de moderada, alta y muy alta intensidad de erosión.

2. Análisis de regresión simple y múltiple

Con el fin de identificar los parámetros físicos que controlan la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena, se desarrollaron regresiones simples y múltiples entre este parámetro (variable dependiente) y un conjunto de 13 parámetros físicos. Para ello, se utilizó la información morfométrica, topográfica, climática e hidrológica recolectada en las 27 cuencas caracterizadas (Tabla 2).

Para el análisis de regresión múltiple se seleccionó la metodología de regresión por etapas. Este método examina el conjunto finito de modelos formados por las variables independientes, seleccionando dentro del modelo final aquel conjunto más eficiente al explicar la varianza de la variable dependiente. Este procedimiento no elige automáticamente los parámetros con mayores coeficientes de correlación, ya que éstos pueden explicar la misma proporción de la varianza. Entonces es probable que parámetros con bajos coeficientes de correlación se incluyan en el modelo final, ya que explican una parte de la varianza que no ha sido explicada por ningún otro parámetro (**Bowerman & O'Connell**, 1987).

La eficiencia y precisión de los modelos estadísticos fue evaluada por medio del coeficiente de determinación de la regresión (r^2) y el error cuadrático medio relativo (ECMR). El ECMR proporciona una estimación del error asociado con la regresión y es independiente de las unidades en que se expresan los datos de la misma (**Bowerman & O'Connell**, 1987). Este estimador es calculado mediante la siguiente expresión,

$$ECMR = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - c_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n o_i} \quad (1)$$

Tabla 2. Parámetros morfométricos, topográficos, climáticos e hidrológicos calculados para las cuencas tributarias estudiadas. La localización geográfica de cada subcuenca es mostrada en la Figura 1.

Cuenca	Morfométricos			Topográficos							Climáticos			Hidrológicos					
	A ⁽¹⁾ (km ²)	L _b (km)	L _r ⁽²⁾ (km)	H ⁽²⁾ (m)	H _{max} ⁽²⁾ (m)	H _{min} ⁽²⁾ (m)	H _{max} [*] (m)	H _{pk} (-)	H _r (mkm ⁻¹)	?	P ⁽³⁾ (mm a ⁻¹)	P _{max} ⁽³⁾ (mm m ⁻¹)	P _{pk} (-)	Q ⁽⁴⁾ (m ³ s ⁻¹)	Q _{max} ⁽⁴⁾ (m ³ s ⁻¹)	Q _{pk} (-)	R (mm a ⁻¹)	S _a ⁽⁴⁾ (Mta ⁻¹)	Ps (tkm ⁻² yr ⁻¹)
1.Guarapas	503	49	56	1,730	2,200	1,259	941	0.786	19	16.8	1,460	172	8.51	8	144	0.055	495	0.1	13
2.Suaza	989	62	89	1,640	2,450	845	1,605	0.669	26	18.0	1,576	180	8.74	44	745	0.059	1,390	0.6	57
3.Páez	4,078	85	127	2,330	4,200	587	3,613	0.555	42	28.4	1,495	173	8.62	185	1,694	0.109	1,429	3.2	78
4.Yaguara	1,386	61	59	1,770	2,260	505	1,755	0.783	29	29.7	1,611	258	6.25	15	458	0.033	343	0.8	59
5.Neiva	756	44	71	1,640	2,600	468	2,132	0.631	49	30.0	1,773	215	8.25	17	375	0.045	702	0.3	33
6.Ceibas	220	36	39	1,600	1,650	443	1,207	0.970	33	31.3	1,451	160	9.09	5	118	0.041	694	0.1	58
7.Cabrera	2,446	94	115	1,750	4,000	356	3,644	0.438	39	31.7	1,159	166	7.00	71	848	0.084	914	1.8	75
8.Luisa	342	80	98	830	3,000	275	2,725	0.277	34	27.8	1,780	226	7.88	9	725	0.013	836	0.1	18
9.Sumapaz	2,435	72	137	2,120	4,000	260	3,740	0.530	52	27.3	1,766	235	7.52	43	988	0.043	555	0.5	20
10.Bogotá	5,544	167	305	2,280	3,200	258	2,942	0.713	18	9.6	923	126	7.33	39	606	0.064	220	1.3	23
11.Coello	1,580	78	108	2,080	3,750	252	3,498	0.555	45	32.4	1,346	163	8.26	40	2,202	0.018	802	1.6	103
12.Lagunilla	663	54	88	1,900	5,000	217	4,783	0.380	88	54.4	1,079	130	8.28	18	624	0.029	854	0.2	30
13.Recio	610	62	76	2,170	4,900	221	4,679	0.443	76	61.6	1,993	267	7.46	20	518	0.038	1,011	0.2	25
14.Saldaña	7,009	165	199	1,900	2,060	275	1,785	0.922	11	9.0	2,316	353	6.56	320	2,574	0.124	1,441	8.9	1,27
15.Gualí	480	77	96	1,640	4,800	193	4,607	0.342	60	48.0	2,053	296	6.93	23	1,164	0.020	1,514	0.2	40
16.Guarino	976	66	92	2,350	3,100	188	2,912	0.758	44	31.7	3,853	521	7.40	34	504	0.067	1,085	0.5	46
17.La Miel	2,121	86	104	1,560	2,650	150	2,500	0.589	29	24.0	4,477	612	7.31	243	1,903	0.128	3,618	2.7	1,25
18.Negro	4,604	111	214	1,200	3,500	152	3,348	0.343	30	15.6	1,460	213	6.85	136	1,620	0.084	930	8.0	1,73
19.Cocorna	799	35	86	530	2,200	134	2,066	0.241	59	24.0	3,651	423	8.63	56	700	0.080	2,203	0.6	74
20.Nare	5,711	110	187	1,410	3,000	125	2,875	0.470	26	15.4	2,594	320	8.10	396	2,850	0.139	2,189	2.6	45
21.Carare	4,943	173	274	1,010	3,600	88	3,512	0.281	20	12.8	2,638	348	7.58	232	2,476	0.094	1,479	10.9	2,20
22.Opón	1,698	91	179	790	2,000	79	1,921	0.395	21	10.7	3,212	301	10.66	90	566	0.159	1,670	3.4	1,97
23.Lebrija	3,500	150	258	1,030	3,700	49	3,651	0.278	24	14.2	2,442	324	7.54	90	1,000	0.090	813	4.4	1,25
24.Sogamoso	21,513	219	348	2,200	3,800	70	3,730	0.579	17	10.7	1,997	289	6.92	488	4,343	0.112	715	11.2	52
25.Cauca	59,615	789	1183	1,440	4,200	20	4,180	0.343	5	3.5	1,887	243	7.77	2,373	4,985	0.476	1,255	49.1	82
26.Cesar	16,657	232	379	500	1,850	27	1,823	0.270	8	4.8	1,575	154	10.21	53	199	0.268	101	0.2	1
27.S.Jorge	4,463	274	395	240	3,150	18	3,132	0.076	11	7.9	1,670	248	6.72	198	958	0.207	1,400	2.5	55

Nota: A = área de la cuenca, L_b = longitud de la cuenca, L_r = longitud del río, H = altura promedio, H_{max} = altura máxima, H_{min} = altura mínima, H_{max}* = altura máxima efectiva (H_{max} - H_{min}), H_{pk} = índice de relieve (H/H_{max}), H_r = cociente de relieve (H_{max}*/L_b), a = pendiente del río (H_{max}*/L_r), P = precipitación total anual (sobre las partes erosionales de la cuenca), P_{max} = precipitación en el mes más lluvioso, P_{pk} = índice de precipitación (P/P_{max}), Q = caudal promedio, Q_{max} = promedio en el mes de caudales máximos, Q_{pk} = pico máximo de descarga (Q/Q_{max}), R = escorrentía específica (Q/A), S_a = transporte de sedimentos en suspensión, P_s = producción de sedimentos (S_a/A). Para una definición más detallada de estos parámetros véase Hovius (1998).

Fuente: ⁽¹⁾ IDEAM, 1995; ⁽²⁾ IDEAM, 2001; ⁽³⁾ Hidro-SIG (Vélez et al., 2002); ⁽⁴⁾ IDEAM, 2003.

donde n es el número de datos, O_i el i -ésimo valor observado y C_i el i -ésimo valor calculado. Además, se desarrolló una prueba t pareada (**Montgomery & Runger, 1996**) para comparar los datos observados frente a los datos calculados por medio del modelo.

3. Selección de datos máximos de transporte de sedimentos

Se seleccionaron 8 cuencas tributarias con el objeto de identificar datos máximos en las series de transporte de sedimentos y establecer hipótesis sobre su magnitud y eventos detonantes (i.e. fenómenos de movimientos en masa, tormentas, influencia antrópica). De las cuencas seleccionadas, cinco corresponden a la cuenca alta del Magdalena (Guarapas, Suaza, Páez, Yaguara y Cabrera) y las restantes están ubicadas en la Cordillera Oriental, sobre la parte media de la cuenca (Negro, Carare y Opón). Las primeras fueron seleccionadas por mostrar un fuerte incremento en el transporte de sedimentos a partir de 1990, mientras que las últimas por presentar altos valores de producción de sedimentos en comparación con las demás cuencas incluidas en este estudio.

La normalización de datos ha sido utilizada para identificar eventos máximos en series de datos, empleando criterios de selección que varían de acuerdo con el objeto de estudio. Por lo tanto, se realizó una normalización de los valores mensuales de transporte de sedimentos tomando como referencia el promedio interanual, por lo que el dato normalizado representa la distancia del valor original con respecto al promedio, en términos de desviaciones estándar. Para este análisis, se considera como dato máximo aquel cuyo valor excede dos desviaciones estándar ($>2\sigma$) (i.e. **Camilloni & Barros, 2003; Farnsworth & Milliman, 2003**), ya que así se garantiza la selección de datos con diferencias significativas con respecto al promedio interanual.

4. Análisis preliminar de cambios en el uso del suelo

Para analizar de manera preliminar la incidencia del cambio en los usos del suelo sobre la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena, se cuantificó el cambio en las coberturas del suelo durante el período comprendido entre 1970 y 1990. Para ello se obtuvieron 26 imágenes de satélite multi-espectrales ortorrectificadas (corrección atmosférica), 13 correspondientes a la década de 1970 (Landsat MSS) y las demás a la década de 1990 (Landsat TM) (**IDEAM, 2001**). Las imágenes fueron georreferenciadas y corregidas geométricamente (**Chuvieco, 2000**) usando mapas topográficos IGAC a escala 1: 25.000. Con estas imágenes se elaboraron dos mosaicos de usos del

suelo de la cuenca del Magdalena (1970-1990). Estos mosaicos se procesaron mediante una clasificación no supervisada en la que se obtuvieron más de 100 categorías de usos del suelo (**IDEAM, 2001**). Finalmente, se aplicó un proceso de filtrado y de reclasificación de coberturas (modificadas a partir de **IDEAM, 2001**) para obtener las siguientes categorías de uso del suelo: (i) bosques, (ii) agroecosistemas herbáceos, (iii) cultivos misceláneos, (iv) rastrojo alto, (v) ríos, (vi) nieve, (vii) páramo, (viii) manglar, (ix) xerofítas, y (x) ciudades.

Resultados y discusión

1. Producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena

Las cuencas tributarias analizadas exhiben un amplio rango de características morfométricas, topográficas, climatológicas e hidrológicas (Tabla 2). En algunos casos, el rango de valores obtenido alcanza hasta tres ordenes de magnitud, por ejemplo, los caudales fluctúan entre 8 y $2.3 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que las áreas de drenaje oscilan entre 2.2×10^2 y $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$. El rango de variación para los demás parámetros es generalmente de un orden de magnitud y las menores variaciones se presentan en el índice de precipitación y en la precipitación máxima, que varían entre 6.25 y 10.66 y 126 y 612 mm m^{-1} , respectivamente (Tabla 2).

La producción de sedimentos promedio para la cuenca es de $689 \pm 527 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, lo que implica una denudación mecánica de 0.46 mm a^{-1} si se considera una densidad de roca de 1500 kg m^{-3} (**Milliman, J.; Hermelin, M.**, comunicación personal). Las cuencas del Carare, Opón y Negro presentan los mayores valores de producción de sedimentos con 2200, 1973 y $1730 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectivamente, los cuales sobrepasan el doble del promedio de la cuenca. Once de las cuencas estudiadas exceden el promedio, 7 de ellas con una producción de sedimentos superior a $1000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Los valores más bajos se presentan en los ríos Cesar ($10 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) y Gurapas ($128 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), con valores inferiores a la cuarta parte del promedio de la cuenca ($<172 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) (Tabla 2).

Los valores de producción de sedimentos registrados en cuencas de segundo orden (**Krishnaswamy et al., 2001; Higgitt & Lu, 2001; Verstraeten & Poesen, 2001; Xu & Cheng, 2002; Verstraeten et al., 2003**), generalmente corresponden a cuencas con áreas de drenaje inferiores a $10\,000 \text{ km}^2$, donde las características locales (i.e. composición litológica, morfología, régimen de lluvias, procesos de intervención antrópica) dan lugar a diferencias hasta de tres ordenes de magnitud en la producción de sedimentos,

lo que hace complejo cualquier tipo de comparación entre los valores reportados en cuencas de segundo orden.

Estimaciones globales sobre la distribución espacial de la producción de sedimentos (**Walling & Webb**, 1983) permiten afirmar que la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena es relativamente alta ($>500 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), mientras que los mayores valores encontrados en la cuenca (i.e. Carare, Opón, Negro, Saldaña, Lebrija) pueden catalogarse como muy altos en un contexto global ($>1000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$). Esto último puede ser explicado, en gran medida, por la actividad tectónica que caracteriza la cuenca del Magdalena (**Pinet & Souriau**, 1988; **Stallard**, 1988).

Además del factor tectónico, las características litológicas de las cuencas y la actividad antrópica aparecen como las principales causas de las altas tasas de producción de sedimentos. Los ríos Carare, Opón, Negro y Lebrija drenan suelos derivados de rocas sedimentarias, con pendientes moderadas a fuertes y altos niveles de precipitación ($2600\text{-}3200 \text{ mm a}^{-1}$). Estas condiciones propician altas tasas de producción de sedimentos ya que los suelos se erosionan con relativa facilidad, con una alta proporción de este material siendo transportado hasta la red drenaje por escorrentía superficial y por lo tanto los ríos tienen gran capacidad de transporte (**Guy**, 1970; **Stallard**, 1988).

En cuanto a la actividad antrópica, se ha documentado como la alteración de la morfología superficial del terreno, la modificación de los patrones de escorrentía superficial y la mayor susceptibilidad ante la erosión en zonas intervenidas por minería producen incrementos hasta de 2-3 veces en la producción de sedimentos (**Walling & Fang**, 2003). En Asia, por ejemplo, se han registrado incrementos hasta del 50% en la producción de sedimentos como resultado de la expansión de la minería (**Walling & Fang**, 2003). En el río Minero, principal tributario del río Carare, se han registrado concentraciones de sedimentos en suspensión mayores de 2000 mg L^{-1} como producto de la extracción de esmeraldas (**IDEAM**, 2001), mientras que la explotación aurífera en el río Saldaña es la segunda en extensión en la cuenca del Magdalena, con una área de $\sim 770 \text{ km}^2$ (**UPME**, 2004).

2. Parámetros físicos que controlan la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena

El análisis de regresión señala que el mayor porcentaje de varianza en la producción de sedimentos es explicado por la escorrentía y la precipitación promedio anual, con el 16% y el 14%, respectivamente. El porcentaje de varianza explicado por el resto de parámetros físicos es muy bajo y en general es inferior al 10%. Considerando que la relación

entre la producción de sedimentos y determinados parámetros físicos se describe mejor en términos de funciones logarítmicas (**Knighton**, 1984; **Milliman & Syvitski**, 1992), se efectuó una transformación logarítmica de los datos y se desarrolló un nuevo análisis de regresión. Se encontraron correlaciones positivas y relativamente altas entre la producción de sedimentos y la escorrentía ($r^2 = 0.51$, $P < 0.01$) y el caudal máximo ($r^2 = 0.36$, $P < 0.01$). Los coeficientes de correlación entre los datos transformados de producción de sedimentos y los parámetros morfométricos, topográficos, climáticos e hidrológicos analizados se presentan en la Tabla 3.

Con el fin de obtener un modelo estadístico más eficiente en términos de la varianza explicada, se realizó una regresión múltiple por etapas entre la producción de sedimentos y los parámetros físicos (Tabla 2). Se encontró que la escorrentía (R) y caudal máximo (Q_{max}) conforman el conjunto de parámetros más eficiente al explicar la varianza en la producción de sedimentos de la cuenca del río Magdalena. Por lo tanto, la producción de sedimentos en el Magdalena puede ser expresada por la siguiente ecuación,

$$\text{Log}_{10}(P_s) = 0.81\text{Log}_{10}(R) + 0.39\text{Log}_{10}(Q_{\text{max}}) - 0.88 \quad (2)$$

El modelo descrito por la ecuación (2) está basado en los datos de 26 cuencas tributarias de segundo orden del río Magdalena (Tabla 2) y explica el 58% ($r^2 = 0.58$) de la varianza en la producción de sedimentos (Figura 2A). La varianza restante (42%) no puede ser explicada en términos de las variables independientes incluidas en este estudio y puede estar relacionada con (i) el error asociado a los datos, (ii) el efecto del componente antrópico sobre la producción de sedimentos, (iii) la variabilidad espacial en la producción de sedimentos y (iv) el efecto de los procesos no estacionarios de aporte de sedimentos (i.e. fenómenos de remoción en masa, tormentas torrenciales) (**VanSickel & Beschta**, 1983; **Lane et al.**, 1996).

La incorporación de una o más variables independientes no contribuye en mejorar significativamente el poder explicativo del modelo descrito por la ecuación (2). Se estimó un ECMR del 11%, lo cual implica que el 67% de los valores calculados tienen un error inferior al 11%, mientras que el 95% tienen errores menores al 22% (Figura 2A). La aplicación de una prueba t pareada entre los valores observados y calculados en cada tributario, indica que no existen diferencias significativas ($P < 0.01$) entre dichos valores.

Los datos de producción de sedimentos observados en los tributarios presentan un buen ajuste con respecto al modelo general. Las mayores diferencias se presentan en

Tabla 3. Matriz de coeficientes de correlación entre los parámetros morfométricos, topográficos, climáticos e hidrológicos (datos transformados), utilizados en el análisis de regresión múltiple (regresión por etapas).

	Topográficos							Climáticos			Hidrológicos		
	P_s	A	H	H_{max}	H_{pk}	H_r	α_r	P	P_{max}	P_{pk}	Q	Q_{max}	Q_{pk}
A	0.04												
H	0.11	-0.10											
H_{max}	0.21	0.17	0.18										
H_{pk}	0.02	-0.11	0.85	-0.31									
H_r	0.09	-0.76	0.35	0.30	0.15								
α	0.06	-0.80	0.43	0.25	0.24	0.95							
P	0.34	-0.04	-0.20	-0.11	-0.05	0.00	-0.03						
P_{max}	0.43	-0.01	-0.12	-0.01	-0.03	0.01	0.01	0.94					
P_{pk}	-0.31	-0.08	-0.24	-0.31	-0.06	-0.02	-0.15	0.07	-0.23				
Q	0.43	0.84	-0.11	0.26	-0.18	-0.58	-0.63	0.28	0.32	-0.13			
Q_{max}	0.60	0.55	0.16	0.522	-0.05	-0.20	-0.22	0.19	0.30	-0.36	0.80		
Q_{pk}	0.08	0.79	-0.36	-0.104	-0.23	-0.73	-0.79	0.26	0.20	0.16	0.78	0.27	
R	0.71	-0.15	-0.04	0.191	-0.13	0.27	0.20	0.60	0.62	-0.09	0.40	0.53	0.10

Nota: La denominación de los parámetros es explicada en la Tabla 2.

Los coeficientes de correlación en negrilla e itálica son significativos a un nivel de confianza del 95%.

Los coeficientes de correlación en negrilla son significativos a un nivel de confianza del 99%.

los ríos Cesar, Nare y Luisa, cuyos valores son sobre-estimados por este modelo (Figura 3). En estos tributarios es probable que la sobre-estimación sea causada por la retención de sedimentos en embalses y lagunas, ya que estos sistemas presentan altas tasas de depositación de sedimentos y por lo tanto, tasas de transporte por debajo de los niveles esperados (Syvitski et al., 2003). La cuenca del Cesar posee un sistema de ciénagas con una extensión de ~235 km² y la cuenca del Nare presenta una red de embalses que cubre un área de ~50 km². Para el río Luisa no se tiene una explicación consistente al respecto.

Las relaciones encontradas entre producción de sedimentos y escorrentía y caudal máximo resaltan la importancia de los procesos de erosión hídrica superficial y capacidad fluvial en la cuenca del Magdalena. La importancia de estos procesos sobre la producción de sedimentos ha sido previamente documentada a escala global (Summerfield & Hulton, 1994; Hovius, 1998; Ludwig & Probst, 1998; Harrison, 2000) y regional (Douglas, 1967; Krishnaswamy et al., 2001; Higgitt & Lu, 2001; Braud et al., 2001).

La importancia de la escorrentía ha sido relacionada con la disponibilidad de agua dentro del sistema para producir erosión, principalmente por escurrimiento superficial y con la capacidad para transportar el material erodado hasta la red de drenaje (Ludwig & Probst, 1998; Harrison, 2000). Las

altas correlaciones entre escorrentía y precipitación y precipitación máxima (Tabla 3) brindan una explicación acerca del control que ejercen estos parámetros climáticos sobre la producción de sedimentos, particularmente en lo que respecta a la fragmentación de suelo por impacto de gotas de lluvia (Ludwig & Probst, 1998; Harrison, 2000).

A escala global la producción de sedimentos presenta una relación directa con el relieve, como variable subrogada del control tectónico (i.e. Ahnert, 1970; Pinet & Souriau, 1988; Milliman & Syvitski, 1992), e inversa con el área de drenaje de la cuenca (i.e. Milliman y Syvitski, 1992; Hovius, 1998; Harrison, 2000). Pinet & Souriau (1988) indican que la altura media de la cuenca explica el 81% de la varianza en la producción de sedimentos en cuencas con orogenias recientes (<250 Ma). También se ha mostrado que cuencas con alturas de >3000 m. tienen una producción de sedimentos hasta de 2 y 3 ordenes de magnitud mayor que cuencas de tamaño similar con elevaciones entre 100 m. y 500 m., lo cual implica que el factor tectónico ejerce un control en escala de varios ordenes de magnitud sobre la producción de sedimentos (Milliman & Syvitski, 1992).

En cuencas de alto relieve ($H_{max} > 3000$ m.) la producción de sedimentos se incrementa entre 5 y 9 veces por descensos de un orden de magnitud en el área de drenaje (Milliman;

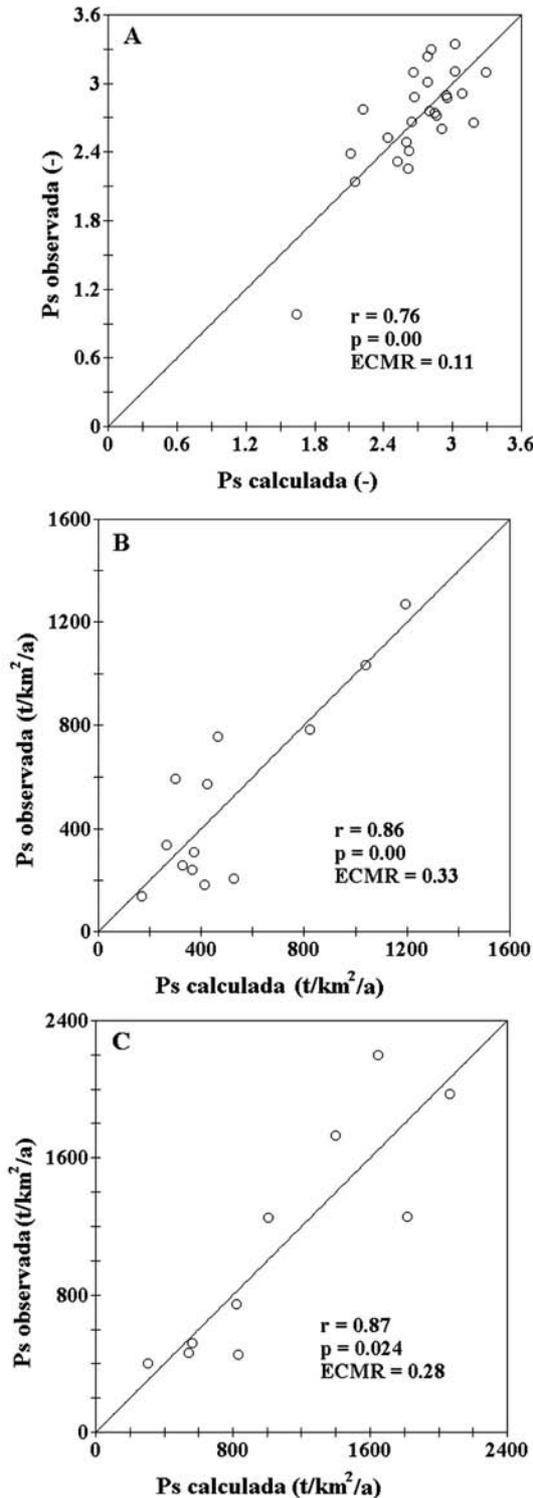


Figura 2. Valores observados frente a valores calculados de producción de sedimentos, para los modelos general (A), alto Magdalena (B) y medio Magdalena (C); en cada ventana se muestra el coeficiente de correlación (r), el valor p de la prueba F de significancia (p) y el error cuadrático medio relativo (ECMR) de la regresión.

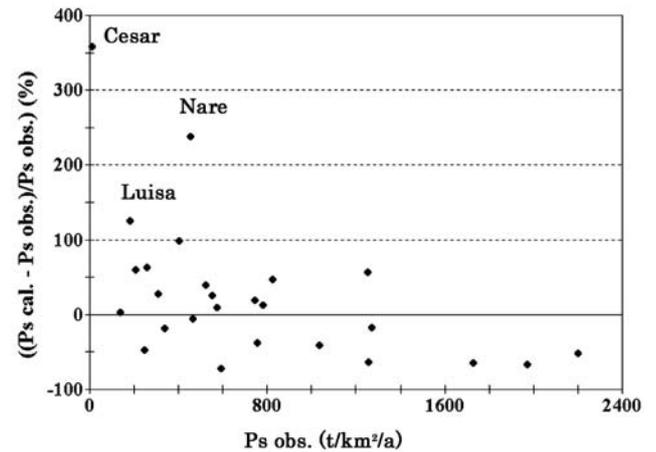


Figura 3. Diferencias entre los valores calculados a partir del modelo general y los valores observados de producción de sedimentos para las 26 cuencas tributarias; las diferencias positivas indican que el valor calculado es mayor que el valor observado, mientras que las diferencias negativas indican lo contrario.

1997). Esta relación inversa es explicada en cuencas con áreas menores a 5000 km^2 en términos de: (i) la baja capacidad de almacenamiento de sedimentos (Trimble, 1977), (ii) mayores gradientes topográficos que favorecen la dinámica de procesos erosivos y el transporte de sedimentos hasta la red de drenaje (Ludwig & Probst, 1998) y (iii) el efecto discernible de eventos de alta intensidad (i.e. movimientos en masa, tormentas torrenciales) (Milliman, 1997).

Este estudio no mostró correlaciones significativas entre la producción de sedimentos y el área de drenaje y ningún otro parámetro topográfico. Esto se debe a que en análisis regionales, específicamente en cuencas con áreas menores a 5000 km^2 , las características locales (i.e. clima, litología, vegetación) tienen un mayor peso sobre las variaciones en la producción de sedimentos (Dunne, 1979; Ludwig & Probst, 1998) y a que además, las relaciones con relieve y área de drenaje son menos acentuadas a esta escala (Pinet & Souriau, 1988; Milliman, 1997).

Con el fin de encontrar un modelo más eficiente al explicar la varianza en la producción de sedimentos, las cuencas tributarias se reagruparon en 2 categorías: alto Magdalena y Magdalena medio. Luego se empleó la rutina de regresión múltiple por etapas en cada una de estas categorías, utilizando datos en bruto y datos con transformación logarítmica. La varianza explicada para el alto y medio Magdalena corresponde al 77% y 75%, respectivamente (Figura 2B, 2C). Estos modelos explican más varianza en la producción de sedimentos en comparación con el modelo general (2). Sin embargo son menos precisos ya que el ECMR es mayor con respecto al ECMR del modelo gene-

ral (Figura 2A, 2B, 2C). Los parámetros que explican la producción de sedimentos en estas categorías son altura media, cociente de relieve y caudal para el Magdalena medio y caudal máximo para el alto Magdalena.

3. Evidencias de comportamiento errático en el transporte de sedimentos

En cuencas con áreas de drenaje mayores a 5000 km² el efecto de los eventos de alta intensidad en el transporte de sedimentos se enmascara debido al tamaño de la cuenca (i.e. tiempos de residencia mayores, acumulación en zonas de depositación) (Knighton, 1984). El proceso de enmascaramiento es proporcional a la extensión de la cuenca y se considera bajo en cuencas pequeñas (<5000 km²) (Trimble, 1977; Reading et al., 1995; Walling & Fang, 2003). Para este análisis se seleccionaron cuencas con áreas de drenaje entre 503 km² y 4943 km² (Tabla 4) con el objeto de disminuir el efecto de enmascaramiento. En las cuencas analizadas los datos máximos aportan un alto porcentaje de la varianza en las series de transporte de sedimentos (Tabla 4). Los mayores aportes se presentan en los ríos Páez y Guarapas, con el 81% y el 77%, respectivamente, mientras que los menores aportes se dan en los ríos Opón (60%) y Suaza (62%) (Tabla 4).

Cuando los datos máximos son removidos de las series de transporte de sedimentos los promedios interanuales varían (DS_a) entre el 16% y el 43% (Tabla 4). Además en la mayoría de cuencas, excepto Carare y Opón, el promedio interanual es superado por menos del 30% de los datos de la muestra (Tabla 4). Por ejemplo, el río Negro transporta en promedio 21.8 x 10³ t d⁻¹ de sedimentos, valor que sólo es igualado o excedido por el 26% de los datos, y cuando los datos máximos son removidos de la serie el promedio interanual sólo llega a 14.7 x 10³ t d⁻¹ de sedimentos (Tabla 4).

El efecto de los datos máximos sobre las series sugiere un comportamiento errático en el transporte de sedimentos, el cual es considerado normal para pequeñas cuencas (<5000 km²) ya que su capacidad para enmascarar el efecto de eventos de gran magnitud es baja (Trimble, 1977). Por ende, es factible que una alta proporción de la carga total transportada por el río sea movilizada en cortos períodos de tiempo (Dunne, 1979; Farnsworth & Milliman, 2003). Meade & Parker (1985) señalan que en algunos ríos de Estados Unidos, más de la mitad del sedimento movilizado durante un año es transportado en un período inferior a 10 días. Verstraeten et al. (2003) encontraron en cuencas de España que más del 50% de la producción

Tabla 4. Efecto de los datos máximos (d.m.) sobre las series de transporte de sedimentos, expresado como el aporte a la varianza total de la serie (%) y como el cambio en el promedio interanual de transporte cuando los datos máximos son removidos de la serie (ΔS_a).

Cuenca	Serie de transporte de sedimentos (S _a)						
	Área (km ²)	Total datos	Total d.m.	Aporte d.m. a la varianza (%)	S _a ⁽¹⁾ (x 10 ³ t d ⁻¹)	S _a ⁽²⁾ (x 10 ³ t d ⁻¹)	ΔS _a (%)
Carare	4,943	168	5	63.4	29.78	25.06	-15.8
Negro	4,604	300	15	71.5	21.83	14.77	-32.3
Páez	4,078	319	5	81.3	8.76	7.21	-17.7
Cabrera	2,446	228	12	64.4	5.05	3.86	-23.5
Opón	1,698	273	14	59.8	9.15	7.40	-19.1
Yaguara	1,386	215	13	72.3	2.23	1.28	-42.6
Suaza	989	240	12	61.8	1.54	1.21	-21.4
Guarapas	503	108	6	77.2	0.18	0.13	-27.7

Nota: Total datos= número total de datos de la serie mensual de transporte de sedimentos.

Total d.m.= número de datos que fueron clasificados como datos máximos en cada serie.

S_a⁽¹⁾= promedio interanual de transporte de sedimentos.

S_a⁽²⁾= promedio de transporte de sedimentos removiendo los datos máximos.

DS_a= cambio en el promedio interanual de transporte de sedimentos cuando los datos máximos son removidos de las series y calculado como DS_a = [(S_a⁽²⁾ - S_a⁽¹⁾)/S_a^{(1)]x100.}

de sedimentos, en un período total de tres años, fue causada por sólo tres eventos extremos de precipitación. Es probable que en pequeñas cuencas (<5000 km²) los valores de transporte de sedimentos registrados no representen los verdaderos promedios de largo plazo (**Inman & Jenkins**, 1999; **Verstraeten et al.**, 2003).

En un contexto global, se ha señalado que las causas detonantes para eventos extremos de transporte de sedimentos, están constituidas por patrones climáticos de alta intensidad, actividad antrópica concentrada y fenómenos de remoción en masa (**Thomas**, 1994; **Inman & Jenkins**, 1999; **Farnsworth & Milliman**, 2003). Los datos máximos de transporte de sedimentos se presentaron en muy baja proporción durante condiciones extremas de precipitación. En algunos casos, los eventos máximos de transporte de sedimentos se presentan en condiciones de baja precipitación. Por ejemplo, en los ríos Carare y Páez, con precipitaciones mensuales promedio de 165 mm m⁻¹ y 133 mm m⁻¹, respectivamente, una alta proporción de datos máximos de transporte de sedimentos se presentan en meses con precipitaciones inferiores a 100 mm m⁻¹. Sin embargo, la información de precipitación utilizada en este análisis sólo hace referencia a la cantidad total de precipitación. Considerando la importancia de las tormentas locales y la fuerte variación espacial de la precipitación, especialmente en zonas de ladera (**Mesa et al.**, 1997), deben estudiarse parámetros como intensidad de la precipitación (mm h⁻¹), distribución espacial, número de días de lluvia, a una escala más detallada si se quiere determinar el efecto neto de la precipitación sobre los eventos máximos de transporte de sedimentos.

4. Hipótesis preliminares sobre el efecto antrópico en el transporte de sedimentos de la cuenca del Magdalena

El análisis de cambios en usos del suelo por medio del procesamiento y análisis de imágenes de satélite indica que la cobertura de bosques en la cuenca del Magdalena pasó del 42.6% al 25.4%, entre 1970 y 1990, lo que implica una tasa de deforestación equivalente al 2.01% anual (~2.20 x 10⁵ ha a⁻¹) (Figura 4). En este mismo periodo, la extensión de cultivos misceláneos se incrementó en un 8%, mientras que la superficie de agroecosistemas subió en un 7.7%, presentando un incremento combinado del 15.7% (Figura 4). Esto implica que una alta proporción de zonas deforestadas se han destinado para la agricultura y la ganadería.

En los últimos 20 años los agroecosistemas y cultivos misceláneos han tenido un incremento combinado del 14% y 24% en las cuencas del Cauca y Sogamoso, respectivamente. La expansión de la frontera agrícola y ganade-

ra ha significado el descenso de bosques en un 18% en el Cauca y en un 25% en el Sogamoso, y coincide con un aumento del transporte de sedimentos en ambas cuencas (Figura 5). En el Cauca, el promedio de transporte de sedimentos en la década de 1980 era de 121 x 10³ t d⁻¹, en 1990 llegó a 152 x 10³ t d⁻¹, lo que implica un incremento del 26%, mientras que en el Sogamoso el transporte de sedimentos aumentó 2.5 veces en un periodo de 10 años, al pasar de 13.4 x 10³ t d⁻¹ en 1989 a 47.1 x 10³ t d⁻¹ en 1998 (Figura 5).

La conversión de bosques en pastos para ganadería y zonas agrícolas altera el ciclo hidrológico y modifica las propiedades físicas y químicas del suelo (i.e. contenido de materia orgánica, porosidad, tasa de infiltración), dando como resultado una mayor susceptibilidad a los procesos de erosión (**Bruijnzeel**, 1990). **Walling & Fang** (2003) reportan en Asia incrementos hasta del 80% en el transporte de sedimentos en un periodo de 30 años, como resultado de la deforestación y expansión de la frontera agrícola, y señalan que tales variaciones pueden ser mayores (i.e. 2-5 veces) dependiendo de la litología y condiciones climáticas del área intervenida. Estudios regionales (i.e. **Dunne**, 1979; **Krishnaswamy et al.**, 2001) muestran que existe una relación directa entre el aporte de sedimentos al sistema fluvial y el uso del suelo, la cual se hace más marcada en zonas agrícolas y ganaderas con el aumento de la escorrentía (**Dunne**, 1979).

Los efectos de la conversión de bosques sobre el transporte de sedimentos se reflejan con mayor eficacia en pequeñas cuencas, ya que la proporción de áreas intervenidas con respecto al área de drenaje es alta y existe una menor probabilidad de que los sedimentos sean almacenados dentro de la cuenca (**Walling & Fang**, 2003). En el valle alto del Magdalena los valores bajos de caudal pico de descarga (Tabla 2), que implican descargas máximas muy altas en relación con los caudales promedio, las altas precipitaciones (>2000 mm a⁻¹) y las fuertes pendientes indican un comportamiento hidrológico torrencial. En estos sistemas, el tiempo transcurrido entre la meteorización del material y su entrada al sistema fluvial es corto (**Guy**, 1970; **Thomas**, 1994). Por ello es presumible que el incremento en el transporte de sedimentos, que a partir de 1990 se hace notorio en la mayoría de cuencas de esta zona (i.e. Guarapas, Suaza; Páez, Yaguara) (Figura 5), sea causado por la expansión agrícola y ganadera, ya que ~600 x 10³ ha. de bosques han sido removidas en el alto Magdalena y el Macizo Colombiano desde 1990 (**IDEAM**, 2001) y actualmente la cobertura de bosques sólo llega al 27.3%, mientras que los cultivos misceláneos y agroecosistemas cubren cerca del 50% de la zona.

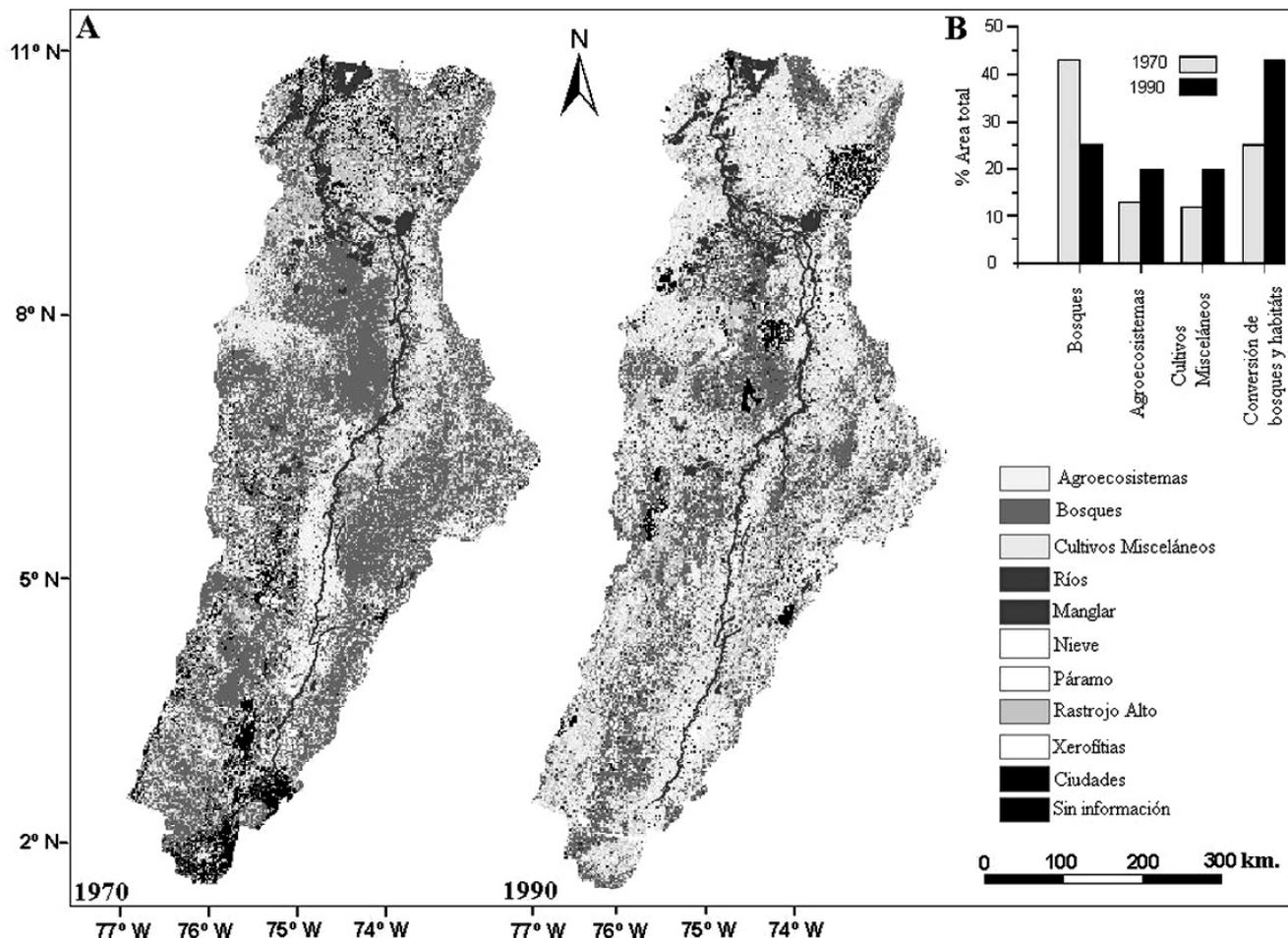


Figura 4. (A) Principales usos del suelo de la cuenca del Magdalena, calculados a partir del procesamiento de imágenes de satélite Landsat de 1970 (MSS) y 1990 (TM); (B) en la margen superior derecha se muestra la extensión de las principales coberturas en cada uno de los dos períodos expresadas como porcentaje del área total de la cuenca (análisis de coberturas modificado de IDEAM, 2001).

La relación entre deforestación y transporte de sedimentos no es directa (Krishnaswamy et al., 2001; Braud et al., 2001; Costa et al., 2003), ya que el efecto de la deforestación sobre la hidrología de una cuenca, incluyendo transporte de sedimentos, es complejo y depende de múltiples factores como litología, morfología, condiciones de evapotranspiración y precipitación y proporción de área deforestada. Además, los efectos de la conversión de usos del suelo sobre la erosión superficial no siempre son discernibles por medio de la producción de sedimentos, ya que los sitios donde se producen los sedimentos son menores en extensión que los sitios de almacenamiento temporal en pendientes o cauces (Trimble, 1977).

A nivel mundial, la mayoría de ríos no presentan tendencia alguna en lo que respecta al transporte de sedimentos, pero se estima que los países en vía de desarrollo

experimentan tendencias crecientes en el transporte, debido al incremento de procesos erosivos derivados de actividades antrópicas (Walling & Fang, 2003). La expansión de la frontera agrícola, de la frontera ganadera y de la minería, principalmente, han dado lugar a que en el 68% de la cuenca se presenten tendencias positivas en el transporte, mientras que en el 31% se presenten tendencias negativas (Figura 5). Por lo tanto, los procesos erosivos se han incrementado significativamente en la cuenca del Magdalena durante los últimos 20 años.

Conclusiones

Este estudio analiza los principales factores naturales que controlan la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena y establece hipótesis preliminares sobre la influencia de los procesos no estacionarios de aporte

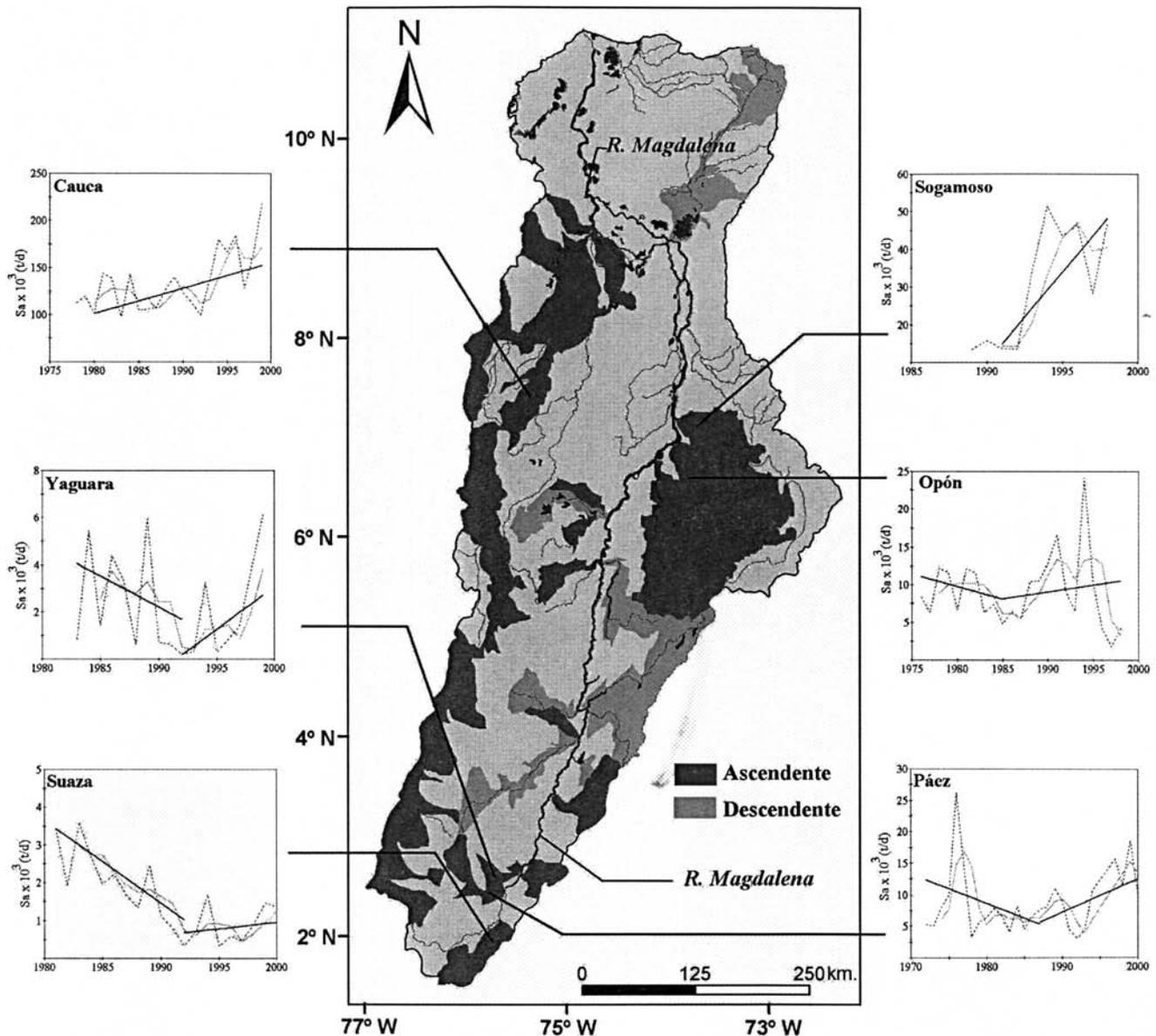


Figura 5. Tendencia con respecto al transporte de sedimentos para las cuencas tributarias estudiadas; las cuencas en gris oscuro muestran incrementos; las cuencas en gris claro presentan descensos en las series de transporte; en las ventanas se presentan series de interés de acuerdo con el objeto de este estudio (Cauca, Opón, Sogamoso, Yaguara, Páez y Suaza); en negro se presenta la línea de tendencia, en gris claro la serie filtrada de datos (media móvil = 3), y la línea punteada negra representa la serie de datos en bruto.

Nota: S_a = Transporte de sedimentos

de sedimentos (i.e. eventos de alta intensidad, actividad antrópica) en la producción y transporte de sedimentos. La producción de sedimentos en los principales tributarios de segundo orden del río Magdalena varía entre 10 y 2200 t km⁻² a⁻¹, con un promedio para toda la cuenca de 689 ± 527 t km⁻² a⁻¹. De acuerdo con estimaciones globales

de la distribución espacial en la producción de sedimentos, este valor puede catalogarse como alto en un contexto global y es causado, en gran proporción, por la intensa actividad tectónica, los regímenes de precipitación, las condiciones litológicas y los niveles de intervención antrópica que caracterizan la cuenca del Magdalena.

Los análisis de regresión múltiple entre producción de sedimentos y 14 parámetros físicos (morfométricos, topográficos, climáticos e hidrológicos), indican que la escorrentía y el caudal máximo explican el 58% de la varianza en la producción de sedimentos de la cuenca del río Magdalena. Lo anterior resalta la importancia de los procesos de erosión hídrica superficial y de la capacidad fluvial en la producción de sedimentos de la cuenca. En este estudio no se encontraron correlaciones significativas entre producción de sedimentos y área de la cuenca debido a que en cuencas con áreas de drenaje menores a 10000 km² estas relaciones son poco acentuadas, y a que además, a esta escala de trabajo las características locales (i.e. régimen de lluvias, cobertura vegetal, litología) tienen mayor peso sobre la producción de sedimentos.

El análisis de regresión múltiple permitió obtener un modelo numérico que describe la producción de sedimentos en términos de la escorrentía (mm a⁻¹) y el caudal máximo (m³ s⁻¹). Este modelo, basado en los datos de 26 cuencas tributarias, tiene una eficiencia del 58% (P<0.01) y un ECMR del 11%, lo que indica que el modelo es robusto y preciso en términos estadísticos. Por lo tanto, puede ser utilizado de manera confiable para la estimación de la producción de sedimentos en cuencas tributarias del río Magdalena a partir de datos de escorrentía y caudal máximo. Este tipo de modelos tiene gran aplicabilidad en estudios de navegabilidad en sistemas fluviales, delimitación de zonas críticas de producción de sedimentos, diseño de planes de control de erosión, determinación de vida útil de embalses, entre otros.

En ocho cuencas tributarias, seleccionadas de acuerdo con la tasa de producción de sedimentos y su ubicación geográfica, se determinó que los datos máximos de transporte de sedimentos aportan entre el 60% y el 81% de la varianza en las series interanuales de transporte. Esto señala un comportamiento errático en cuanto al transporte de sedimentos e indica que un alto porcentaje de la carga total transportada es movilizadada en cortos períodos de tiempo. De otro lado, análisis de series de tiempo indican que en el 68% del área de estudio se presentan tendencias ascendentes en el transporte de sedimentos. Los análisis preliminares de cambios de usos del suelo (1970-1990) señalan que estas tendencias podrían relacionarse con la reducción del ~17% de las áreas de bosque y con el incremento del ~16% de las zonas dedicadas a la agricultura y la ganadería. Lo anterior sugiere que las actividades antrópicas han incidido significativamente en los niveles de erosión de la cuenca del Magdalena durante los últimos 20 años.

Agradecimientos

Este estudio se desarrolló en el marco del Proyecto Magdalena, ejecutado por la Universidad EAFIT-Departamento de Geología con el apoyo financiero de COLCIENCIAS (código 1216-09-12105). Los autores también expresan su agradecimiento a CORMAGDALENA por el apoyo logístico y financiero y al IDEAM por la información suministrada (Convenio marco de cooperación entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- y la Universidad EAFIT).

Bibliografía

- Anhert, F.**, 1970. Functional relationships between denudation, relief, and uplift in large mid-latitude drainage basins. *Am. J. Sci.* **268**: 243-263.
- Bowerman, B., O'Connell, R.**, 1987. *Forecasting and time series: an applied approach.* Duxbury Press, Belmont. 726 p.
- Braud, I., Vich, A., Zuluaga, J., Fornero, L., Pedrani, A.**, 2001. Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region: observation and modelling. *Journal of Hydrology.* **245**: 124-144.
- Bruijnzeel, L.**, 1990. *Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion: a state of the knowledge.* UNESCO, Paris. 224 p.
- Camilloni, I., Barros, V.**, 2003. Extreme discharge events in the Paraná river and their climate forcing. *Journal of Hydrology.* **278**: 94-106.
- Costa, M., Botta, A., Cardille, J.**, 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins river, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology.* **283**: 206-217.
- Chuvioco, E.**, 2000. *Fundamentos de teledetección espacial.* Rialp S.A., Madrid. 568 p.
- Douglas, I.**, 1967. Man, Vegetation and Sediment Yield of Rivers. *Nature.* **215**: 925-928.
- Dunne, T.**, 1979. Sediment yield and land use in tropical catchments. *Journal of Hydrology.* **42**: 281-300.
- Farnsworth, K., Milliman, J. D.**, 2003. Effects of climatic and anthropogenic change on small mountainous rivers: the Salinas river example. *Global and Planetary Change.* **39**: 53-64.
- Guy, H.**, 1970. *Fluvial sediment concepts.* U.S. Geological Survey. United States Government Printing Office, Denver. 55 p.
- Harrison, C.G.**, 2000. What factors control mechanical erosion rates. *Int. Journal of Earth Sciences.* **88**: 1-11.
- Higgitt, D., Lu, X.**, 2001. Sediment delivery to the Three Gorges: 1. Catchment controls. *Geomorphology.* **41**: 143-156.
- Holeman, J.**, 1968. The sediment yield of major rivers of the world. *Water Resources Research.* **4**: 737-747.
- Hovius, N.**, 1998. Controls on sediment supply by large rivers. *SEPM Special Publication.* **59**: 3-16.
- IDEAM** (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), 1998. *El medio ambiente en Colombia.* IDEAM, Bogotá. 495 p.

- IDEAM**, 2001. Estudio ambiental de la cuenca Magdalena – Cauca y elementos para su ordenamiento territorial. (Formato digital)
- IDEAM**, 2003. Datos diarios de caudal, concentración de sedimentos en suspensión y transporte de sedimentos en suspensión para estaciones selectas de la cuenca del Magdalena. (Formato digital)
- Inman, D., Jenkins, S.**, 1999. Climate change and the episodicity of sediment flux of small California rivers. *Journal of Geology*. **107**: 251-270.
- Jansen, J., Painter, R.**, 1974. Predicting sediment yield from climate and topography. *Journal of Hydrology*. **21**: 371-380.
- Knighton, D.**, 1984. Fluvial forms and processes. Chaucer Press, Great Britain. 217 p.
- Krishnaswamy, J., Halpin, D., Ritcher, D.**, 2001. Dynamics of sediment discharge in relation to land-use and hydro-climatology in a humid tropical watershed in Costa Rica. *Journal of Hydrology*. **253**: 91-109.
- Lane, S.N., Richards, K.S., Chandler, J. H.**, 1996. Discharge and sediment supply controls on erosion and deposition in a dynamic alluvial channel. *Geomorphology*. **15**: 1-15.
- Ludwig, W., Probst, J.**, 1998. River sediment discharge to the oceans: present controls and global budgets. *American Journal of Science*. **298**: 265-295.
- Meade, R., Parker, R.**, 1985. Sediments in rivers of the United States. U.S Geological Survey-Water Supply Paper. **2275**: 49-60.
- Mesa, O., Poveda, G., Carvajal, F.**, 1997. Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Imprenta de la Universidad Nacional, Bogotá. 390 p.
- Milliman, J.D.**, 1997. Fluvial sediment discharge to the sea and the importance of regional tectonics. In: Ruddiman, W. (ed.). *Tectonic uplift and climate change*. New York, Plenum Press. pp. 239-257.
- Milliman, J. D., Meade, R. H.**, 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*. **91**: 1-21.
- Milliman, J. D., Syvitski, P.M.**, 1992. Geomorphic/Tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology*. **100**: 525-544.
- Ministerio de Agricultura**, 1977. La erosión de tierras en Colombia. Editorial Stella, Bogotá. 56 p.
- Mojica, J., Franco, R.**, 1992. Estructura y evolución tectónica del valle medio y superior del Magdalena. *Geología Colombiana*. **17**: 41-64
- Montgomery, D., Runger, G.**, 1996. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. McGraw-Hill, Mexico D.F. 895 p.
- Petts, G., Foster, I.**, 1985. Rivers and landscapes. Hodder & Stoughton, London. 274 p.
- Pinet, P., Souriau, M.**, 1988. Continental erosion and large-scale relief. *Tectonics*. **7**: 563-582.
- Reading, A., Thompson, R., Millington, A.**, 1995. Humid Tropical Environments. Blackwell Publishers Inc., Oxford. 429 p.
- Restrepo, J. D., Kjerve, B.**, 2000. Magdalena river: interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*. **235**: 137-149.
- Stallard, R.**, 1988. Weathering and erosion in the humid tropics. In: Lerman, A; Meybeck, M., (eds.). *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles*. Kluwer Academic Publishers. pp. 225-246.
- Syvitski, J., Peckham, S., Hilberman, R., Mulder, T.**, 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology*. **162**: 5-24.
- Summerfield, M.A., Hulton, N.J.**, 1994. Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins. *J. Geophysical Research*. **99**: 13871-13883.
- Thomas, M.**, 1994. Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes. Wiley, Chichester. 460 p.
- Trimble, S.**, 1977. The fallacy of stream equilibrium in contemporary denudation studies. *American Journal of Science*. **277**: 876-887.
- UPME**, 2004. Unidad de Planeación Minero Energética – Sistema de Información Minero Energético de Colombia (SIMEC). <http://www.upme.gov.co/simec>
- VanSickel, J., Beschta, R.L.**, 1983. Supply-based models of suspended sediment transport in streams. *Water Resources Research*. **19**: 768-778.
- Vélez, J., Poveda, G., Mesa, O.**, 2000. Balances hidrológicos de Colombia. En: *Memorias XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. Universidad Nacional-Sede Medellín, 2002 (Formato digital).
- Verstraeten, G., Poesen, J.**, 2001. Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate. *Geomorphology*. **40**: 123-144.
- Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J., Koninckx, X.**, 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology*. **50**: 327-348.
- Walling, D., Fang, D.**, 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*. **39**: 111-126.
- Walling, D., Kleo, A.**, 1979. Sediment yields of rivers in areas of low precipitation: a global view. In: *The hydrology of areas of low precipitation*, Proceedings of the Canberra Symposium, IAHS-AISH Publication. **128**: 479-493.
- Walling, D., Webb, B.**, 1983. Patterns of sediment yield. In: Gregory, K. (ed.). *Background to Paleohydrology*. Wiley. pp. 69-100.
- Wilson, L.**, 1973. Variations in mean annual sediment yield as a function of mean annual precipitation. *American Journal of Science*. **273**: 335-349.
- Xu, J., Cheng, D.**, 2002. Relation between the erosion and sedimentation zones in the Yellow river, China. *Geomorphology*. **48**: 365-385.

Recibido el 8 de junio de 2004

Aceptado para su publicación el 4 de noviembre de 2004

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL INTEGRADA DE ESPACIOS ACUÁTICOS COMPARTIDOS, EL DESAFÍO ES PASAR DE LAS PALABRAS A LOS HECHOS: EL CASO DEL RÍO DE LA PLATA Y SU FRENTE MARÍTIMO (RPFM)

por

Jaime Ricardo Cantera Kintz¹

Resumen

Cantera Kintz, J. R.: Investigación científica para la gestión ambiental integrada de espacios acuáticos compartidos, el desafío es pasar de las palabras a los hechos: El caso del río de la Plata y su frente marítimo (RPFM). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 255-269. 2005. ISSN 0370-3908.

La gestión ambiental de cuerpos de aguas transfronterizos (compartidos por varios países) presenta limitaciones que van desde la complejidad en los contextos geográficos, físicos y ambientales hasta las diferencias existentes en jurisdicción y gobernabilidad, pasando por la interdisciplinariedad de los temas que incluye el manejo ambiental integrado. Todo programa de planificación ambiental necesita principalmente de investigación científica multidisciplinaria realizada en estrecha coordinación y cooperación, puesto que cualquier aspecto que sea subestimado causa debilidades para la gestión. En este trabajo se describen los contextos en que se desarrolla el Proyecto Binacional Argentino-Uruguayo: “Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo (RPFM)”, las principales herramientas utilizadas para la construcción del conocimiento científico y las estrategias seguidas para implementar la constitución de un marco de participación cooperativa de las instituciones de investigación y de gestión ambiental de ambos países para el cumplimiento de los objetivos del Proyecto.

Palabras clave: Argentina, Uruguay, Río de la Plata, aguas fronterizas, gestión ambiental.

Abstract

The environmental management of Transboundary water bodies present several limitations, ranging from the complex geographical and environmental contexts to differences in jurisdiction and governance, and also involving the interdisciplinary topics included in the integrated

¹ Profesor Titular Universidad del Valle, Cali Colombia. Coordinador Internacional Proyecto FREPLATA. Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo. E-mail: jaime.cantera@freplata.org

environmental management. Any programme of environmental planning mainly needs of scientific research made in a close coordination and cooperation, since underestimated aspects cause management weakness. This paper describes the contexts in which the Argentinean-Uruguayan Binational Project: "Environmental Protection of the Rio de la Plata and its Maritime Front (RPFM)" is developed, the main tools to build the scientific knowledge, and the strategies followed to implement a cooperative framework with the participation of environmental management and research institutions of both countries in the pursue of Project objectives.

Key words: environmental management, Rio de la Plata, Argentina, Uruguay, transboundary water.

1. Introducción

Hacer compatibles las necesidades humanas y los procesos de desarrollo con la preservación de la vida y la protección ambiental, es la base sobre la cual se plantearon y se defendieron las teorías del Desarrollo Sustentable durante los años 80 y 90. La conservación del ambiente debería, en principio, resultar de la relación del avance de la ciencia y la tecnología con los procesos sociales, económicos y políticos que se llevan a cabo en cualquier región del mundo. Sin embargo, este propósito es mucho más difícil de llevar a la realidad que plasmarlo en documentos. Gran parte del esfuerzo para lograr el cambio de la relación del hombre con el medio ambiente surge de programas científicos internacionales, de redes de científicos en el mundo y de iniciativas gubernamentales o privadas que resultan de las coyunturas mundiales o de intereses puntuales más que de programas organizados, planificados, realizados y continuados en el tiempo.

La dificultad de convertir en realidad los deseos (compartidos por la mayor parte de la sociedad) de conservación de las especies vivientes y de protección de un ambiente limpio y sano, resulta principalmente de la complejidad que significa articular procesos globales con las características propias y la situación social de cada región. Los temas clave de la conservación ambiental son conocimiento (investigación), planificación y ejecución (acción) y participación de toda la sociedad en los propósitos de la planificación (implementación). Esto quiere decir que todo programa de gestión ambiental que quiera ser exitoso, exige la participación de científicos (entendiéndose en sentido amplio, es decir tanto de las ciencias naturales, o ciencias duras, como en las humanísticas, o ciencias blandas), gobernantes, políticos, abogados, ciudadanos activos, organizaciones sociales (ONGs por ejemplo), medios de comunicación, sistemas de educación y el llamado sector privado.

Los recursos marinos y costeros son muy importantes para los países de América del Sur, donde sirven como medio de subsistencia y satisfacción de necesidades básicas (Woodley 1997). Los hábitats costeros, los humedales,

las desembocaduras de los ríos, la zona costera y las aguas cercanas de la plataforma continental proveen de servicios y productos a las comunidades que los habitan. Se calcula que la población mundial se acercará a los 8.5 mil millones de personas y que el 75 % podría vivir en los 60 km que rodean a la costa (Gilman 2002). Una gran parte de la población de Sudamérica está concentrada en las ciudades costeras (Cicin-Sain & Knecht 1998). Ecológicamente estas zonas son muy importantes puesto que funcionan como un ecotono, según algunos autores, o ecoclina, según otros, entre tres grandes ecosistemas: el agua dulce, el agua marina y la zona costera terrestre (Attrill & Rundle, 2002).

Es bien conocida la dificultad que representa la gestión ambiental en zonas costeras o estuarinas, localizadas al final de cuencas hidrográficas de gran longitud. Es más difícil aún, si como ocurre en la mayor parte de los casos, durante su recorrido atraviesan diferentes países o jurisdicciones territoriales. Las aguas y los organismos que habitan en ellas no reconocen las fronteras jurisdiccionales y los límites establecidos por el hombre. Los últimos años han estado marcados por la creciente preocupación de buscar un buen manejo costero, habiéndose generado una cantidad de literatura notable y dos grandes áreas del conocimiento: "La Gestión integrada de la zona costera" (CZIM) o "las Ciencias de la sustentabilidad" (Olsen et al., 1999; Duda & Sherman, 2002; Kates et al., 1999).

Al igual que para la mayoría de grandes sistemas fluviales y estuarinos, la gestión ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo (RPFM) se caracteriza por su complejidad (Tabla 1). En este documento se describen los principales antecedentes y la justificación de un Programa Estratégico de Acción (PEA), basado en investigación científica para identificar las prioridades de gestión en el área del Río de la Plata y su Frente Marítimo y desarrollar las principales herramientas para la protección ambiental de esta importante área geográfica. Este programa incluye la organización y estrategia para hacer investigación en cada una de las grandes áreas de conocimiento, fundamentales para la gestión ambiental (aspectos científicos naturales, aspectos sociales y económicos,

Tabla 1. Diferentes temas en la gestión ambiental en el Río de la Plata y su Frente Marítimo

Tema	Ejemplos de complejidad
Áreas geográficas	Cuenca del Plata: Río Paraná, Río Uruguay, Río de la Plata, Frente Marítimo, Zona de Confluencia de corrientes Malvinas y Brasil.
Ecosistemas	Costas, bancos sedimentarios, aguas dulces, aguas salobres, zonas oceánicas, fondos blandos (arena, lodo), fondos duros (Restingas).
Procesos ambientales	Mareas, patrones de circulación (corrientes), caudales de los afluentes, clima, tempestades, sudestadas, vientos.
Marco jurídico e instrumentos jurídicos	Tratado del Río de la Plata y su Frente Marítimo, convenciones internacionales, leyes, decretos, reglamentaciones, normas.
Tipos de información existentes	Libros, revistas internacionales y nacionales, documentos técnicos de circulación limitada, informes de proyectos, revistas de divulgación, documentos de prensa, cartas y mapas, bases de datos, sistemas de información, Webs, imágenes.
Complejidad institucional	Comisiones (CARP, COFREMAR), diferentes divisiones ministeriales (Secretarías, Subsecretarías, Direcciones), divisiones políticas (Intendencias, Provincias, municipios, partidos) órganos de control (Armadas, Prefecturas) institutos de regulación pesquera, servicios de oceanografía, meteorología e hidrografía.
Complejidad social:	Diferente percepción social e identificación cultural, conflictos por uso del suelo costero, asimetrías sociales.
Actividades económicas	Suministro de agua dulce, navegación y transporte, actividades portuarias, pesca artesanal e industrial, turismo.
Fuentes de degradación y contaminación	Aportes del Río Paraná y del Río Uruguay, afluentes menores, emisarios de las ciudades de Buenos Aires y Montevideo, aportes domésticos e industriales puntuales.
Principales contaminantes:	Hidrocarburos, metales pesados, agroquímicos, aguas residuales domésticas e industriales
Problemas ambientales claves	Contaminación de aguas, sedimentos, por desechos peligrosos, acumulación de algunas sustancias en las cadenas tróficas, aparición de floraciones algales tóxicas, eutrofización, introducción de especies exóticas, pérdida de biodiversidad, disminución en los recursos pesqueros.

asuntos jurídicos e institucionales y sistema de información ambiental), pero sin perder de vista el objetivo fundamental de lograr una mejor protección y gestión sostenible del ambiente del RPFM.

2. Desafíos de la conservación de espacio acuáticos transfronterizos?

El principal desafío de la conservación de estos espacios acuáticos transfronterizos (desembocadura de ríos, grandes cuencas o estuarios) es la complejidad de asuntos involucrados y de los conflictos que esa complejidad origina. Son ambientes que sufren la acción de una gran cantidad de agentes de degradación ambiental: 1. Prácticas forestales o agrícolas inapropiadas en los bordes de los

ríos generan aportes importantes de sedimentos, fertilizantes y de biocidas; 2. Pérdidas sucesivas de caudales tanto por la extracción de agua para acueductos de grandes ciudades como por el funcionamiento de grandes represas; 3. Aportes de elementos contaminantes (que se acumulan en las aguas y los fondos) provenientes de la infraestructura urbana e industrial de la ciudades que bordean estos cuerpos de agua o sus tributarios; 4. Degradación de hábitats por los grandes desarrollos para actividades turísticas y de servicios que ocasionan modificaciones en el paisaje costero; 5. Factores de degradación derivados de la utilización de estas áreas para navegación de acceso a los continentes (basuras de buques, lavado de sentinas, deposición de aguas de lastre y del enfriamiento de motores; 6. Dragados para manteni-

miento de los canales de navegación y consecuencias que ocasionan tanto la remoción de grandes volúmenes de sedimentos como la resuspensión de contaminantes y las alteraciones del hábitat que se producen por la deposición del material dragado; 7. Las disminuciones importantes de las poblaciones de especies, que son recursos pesqueros como consecuencia de que los estuarios y la zona costera soportan la mayor parte de las poblaciones de pesca y son sometidos a la mayor actividad y presión pesquera; además, en estas áreas se producen los procesos de reproducción y desarrollo de las formas juveniles.

Además de las múltiples fuentes de degradación soportadas por los espacios acuáticos transfronterizos, también presentan características socioeconómicas legales e institucionales que dificultan los procesos de manejo, administración y gobierno (Governanza para algunos autores). Estos son: 1. La mayoría de estos cuerpos de agua pertenecen a dos o más unidades de manejo gubernamental (dos o más países, provincias o municipios o comisiones binacionales, corporaciones), lo que significa que existen diferentes jurisdicciones espaciales con legislación diferente a veces no solo en el contenido mismo sino también en su concepción teórica; 2. Las aguas y los recursos naturales que se encuentran no reconocen las fronteras, pero la acción ambiental si las tiene que reconocer; 3. La superposición de las autoridades que a veces sucede dentro de un mismo sistema de gobierno se multiplica con la "multinacionalidad" o con la múltiple jurisdicción que se ejerce sobre la cuenca de agua; 4. La situación social y económica de las unidades de gobierno que comparten la cuenca o el espacio acuático compartido también juega un papel importante puesto que las asimetrías de intereses, de acceso a la tecnología, de necesidad, o simplemente las diferencias de cultura y de idioma también son obstáculos determinantes de una inadecuada protección de estos recursos; 5. La propia percepción del medio o sentido de propiedad o de pertenencia es un factor limitante, puesto que existe un sentido mayor de pertinencia con las áreas adyacentes al borde costero y un sentido de no-propiedad o no-responsabilidad con la región más lejana o de la zona común a dos jurisdicciones diferentes, por ejemplo a dos países.

3. Caso ejemplo: los desafíos de la conservación ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo (RPFM)

El Río de Plata parece reunir todas las condiciones que hacen difícil la conservación y protección ambiental de las áreas fluviales y estuarinas. Está situado al final de la Cuenca del Plata, la segunda cuenca fluvial de América

del Sur, que soporta perturbaciones antropogénicas en sus áreas ribereñas conformadas por cinco países: Brasil, Bolivia, Paraguay, Argentina y Uruguay. Sirve como la más importante vía de navegación fluvial de grandes buques de América del Sur (Hidrovia). En los márgenes de los ríos Paraná y Paraguay que forman el eje principal de esta cuenca, existen explotaciones forestales importantes y agricultura intensiva. En algunas afluentes de esta cuenca, como el río Bermejo, se presentan aportes importantes de sedimentos. El otro afluente es la cuenca del río Uruguay que está bordeada por zonas con agricultura extensiva y que tiene además, en algunos de sus afluentes, una cantidad significativa de centrales hidroeléctricas.

El área del Río de la Plata propiamente dicha presenta en sus riberas algunas ciudades muy importantes como Buenos Aires y Montevideo, ambas con gran desarrollo industrial y portuario. Gran parte de las áreas costeras que bordean el Río de la Plata y la costa sobre el Frente Marítimo representan áreas turísticas muy importantes. Los aportes de contaminantes de los ríos Paraná y Uruguay, así como los vertimientos de las ciudades de Buenos Aires y Montevideo, de las otras ciudades costeras y de algunos arroyos han degradado la calidad de las aguas costeras en ambas orillas. En algunas regiones, a pesar de su prohibición, se realiza lavado de sentinas. Los canales de navegación son dragados regularmente debido a la continua deposición de sedimentos provenientes de la Cuenca del Plata. Existe pesca tanto en la parte dulce del río como en la parte salina; esta última es cuantitativamente más importante. Algunos recursos costeros presentan evidencia de sobreexplotación. Finalmente, el Río de la Plata y su Frente Marítimo sufren desde hace ya algún tiempo la invasión de especies exóticas.

El principal aspecto socioeconómico que dificulta la conservación del RPFM deriva de que ambos países presentan su mayor población y actividades económicas ligadas con este cuerpo del agua. Las principales ciudades son costeras y la infraestructura relacionada con la navegación y transporte marítimo, turismo y actividades industriales están situados en el borde costero. Tanto la Cuenca del Plata como la del río Uruguay están bajo la jurisdicción de varios países por lo que cuentan con regímenes jurídicos e institucionales diferentes. Argentina tiene un régimen político federal, con la responsabilidad ambiental atribuida a las provincias, pero con instituciones ambientales de carácter nacional, provincial y municipal, mientras que Uruguay tiene un régimen unitario con instituciones ambientales nacionales, pero con competencias en algunos aspectos, para las intendencias. En ambos países se le da importancia de la conservación del

medio ambiente, pero existe una percepción diferente del cuerpo acuático del RPFM que se puede resumir de manera general en que la mayoría de los argentinos lo consideran como “el río” y la mayoría de los uruguayos lo consideran “el mar”.

4. La complejidad del contexto Geográfico

El Río de la Plata y su Frente Marítimo constituyen un cuerpo de agua formado por un antiguo valle fluvial inundado situado en la desembocadura de la Cuenca del Plata en el Océano Atlántico Sur. Esta cuenca está vertebrada por los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay (Fig. 1). Más del 97 % del ingreso de agua dulce al Río de la Plata proviene de los ríos Paraná y Paraguay. Una veintena de ríos menores y más de un centenar de arroyos aportan sus aguas a lo largo de ambos márgenes del río.

El Río de la Plata (Fig. 2) es un cuerpo acuático con circulación del agua en dos capas con fuerte estratificación vertical, la cual se debilita hacia el mar. Entre la

desembocadura del río Paraná y la Barra del Indio, domina el régimen fluvial. Después de la barra, el agua marina hace intrusión a lo largo del fondo y toma la forma de un estuario de cuña de agua salada. La frontera entre el régimen fluvial y el régimen de cuña de agua salada define el frente salino sobre la Barra del Indio. Un frente de turbidez se forma en la punta de la cuña salada por la re-suspensión de sedimentos debida a la fricción de las corrientes mareales con el fondo (Mianzan et al., 2001). La dinámica del Río de la Plata esta controlada por mareas y vientos y la descarga de agua dulce del continente y es modificada por la topografía y el efecto de Coriolis. El Frente Marítimo (Fig. 2) es el espacio oceánico (52.900 km²) que se extiende mar adentro del límite exterior del Río de la Plata. Se sobrepone parcialmente a las zonas económicas exclusivas de Argentina y Uruguay y constituye un área común de pesca. Las profundidades en esta área varían desde aproximadamente 10 m en la desembocadura del Río de la Plata hasta más de 3000 m en sus regiones más profundas. La dinámica oceánica del Frente Marítimo es determinada por la confluencia entre la corriente fría de Malvinas (rica en nitratos) y la corriente cálida de Brasil; el considerable aporte del Río de la Plata (rico en fosfatos y sílice) y las aguas costeras de plataforma. Estas tres características resultan en una alta producción biológica en la plataforma continental y el talud, en el sector aguas afuera de la desembocadura del Río de la Plata, la cual se traduce en una considerable riqueza pesquera.

5. Importancia del contexto ambiental

El área del RPFM es una zona de transición y mezcla de aguas cálidas, templadas y frías que provee una amplia diversidad de hábitats para especies acuáticas y dependientes del agua. Ello ha resultado en la superposición de especies de aguas cálidas, templadas y frías. Es un área con un alto grado de diversidad y un bajo grado de endemismo. Entre las especies endémicas están: el mejillón (*Brachidontes rodriguezii*), las almejas *Macoma uruguayensis* y *Mesodesma mactroides*, la navaja (*Taggelus gibbus*) y el delfín del Plata también llamado franciscana (*Pontoporia blainvillei*).

Especies fluviales, costeras y de altura desarrollan todo o parte de su ciclo de vida en el área. Varias de esas especies son de considerable importancia global, desde un punto de vista ecológico, económico y social (por ejemplo túnidos y mamíferos marinos). Las poblaciones de peces migratorios del Río de la Plata superior, por ejemplo, sábalo (*Prochilodus lineatus*), boga (*Leporinus obtusidens*), patí (*Luciopimelodus pati*) y dorado (*Salminus maxillosus*), realizan movimientos ascendentes por el río Paraná inferior y

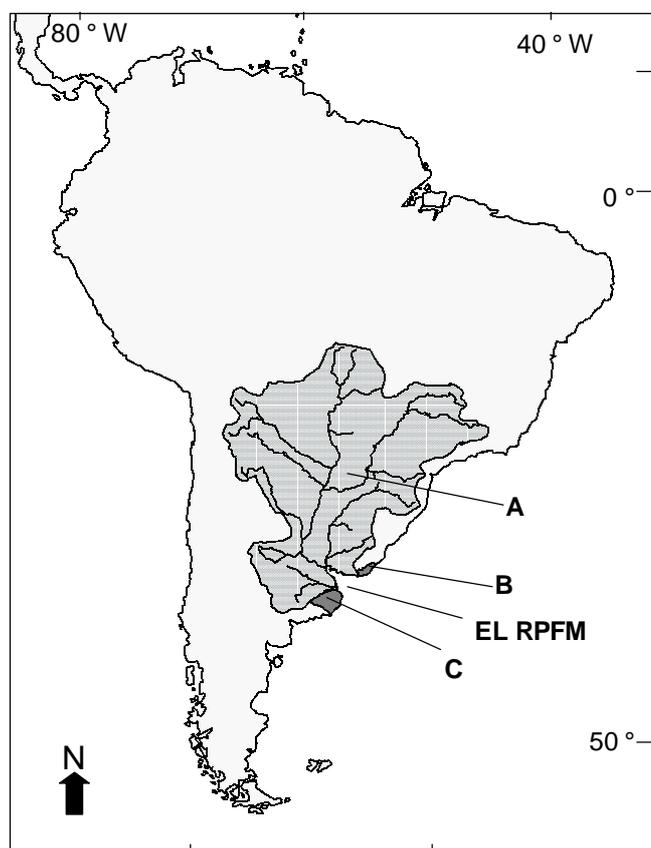


Figura 1. Principales cuencas tributarias al Río de la Plata y su Frente Marítimo (RPFM): A. Cuenca del Plata, B: Vertiente del Río Uruguay; Vertiente de la Provincia de Buenos Aires.

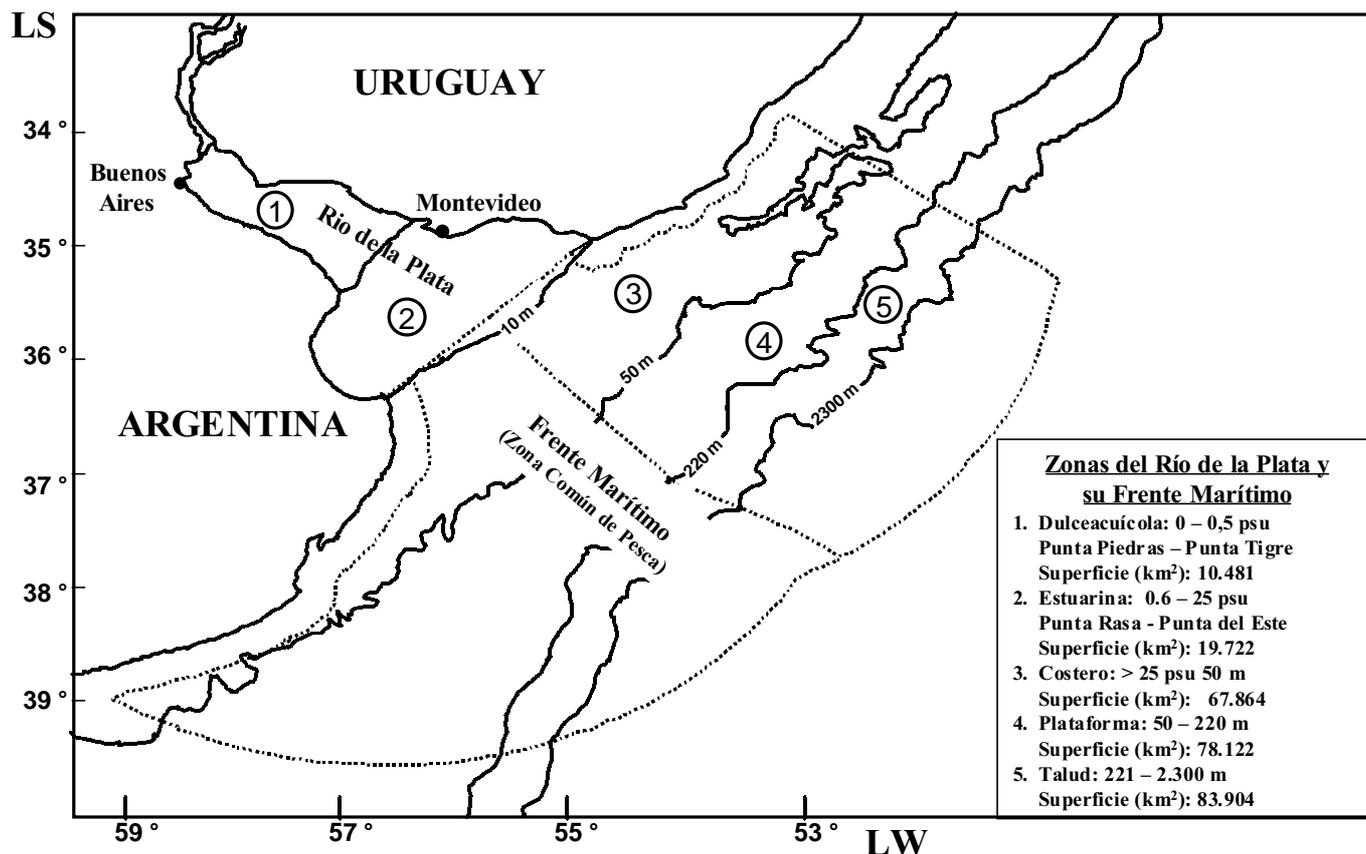


Figura 2. Zonación del Río de la Plata y su Frente Marítimo. Se presentan los rangos de salinidad (psu), los rangos batimétricos (m), los límites geográficos y las superficies (km²).

medio al comenzar el otoño y regresan en la primavera muy posiblemente a reproducirse.

En el Frente Marítimo se encuentran algunas de las principales reservas naturales mundiales de pinnípedos (*Arctocephalus australis* y *Otaria flavescens*). Varios mamíferos marinos son especies migratorias de significación ambiental global. Las más importantes son: Ballena boba, (*Balaenoptera borealis*), Ballena azul (*Balaenoptera musculus*), Ballena de aleta (*Balaenoptera physalus*), Ballena de esperma (*Physeter macrocephalus*), Ballena franca (*Eubalaena australis*), Orca (*Orcinus orca*), Delfín pintado (*Stenella attenuata*), Delfín listado (*Stenella coeruleoalba*), Delfín tornillón (*Stenella longirostris*), Ballena de pico de Arnoux (*Berardius arnouxii*).

6. Factores determinantes de la degradación ambiental: el contexto económico y social

En la ribera argentina del Río de la Plata, el eje metropolitano concentra el 45% de toda la actividad industrial

y el 40% de la población argentina residen en las áreas ribereñas al Río de la Plata y su Frente Marítimo (12,9 millones de personas). La tasa de incremento de la población en el litoral del área ha sido alta durante la última década acercándose al 14‰. En 1995 la participación de la ciudad de Buenos Aires y la Provincia de Buenos Aires en el Producto Bruto Geográfico Nacional argentino superó el 61% del valor total del país. Buenos Aires capta su provisión de agua del Río de la Plata con tres plantas potabilizadoras: Bernal (17 m³/s), General San Martín (35 m³/s) y Punta Lara (2,5 m³/s).

En la ribera uruguaya del Río de la Plata, la mayor concentración poblacional e industrial se encuentra en el departamento de Montevideo. Alrededor del 50 % de la población del país (y la mayor parte de su actividad portuaria, económica e industrial) se concentra sobre una franja costera de unos 50 Km entre el río Santa Lucía y el Arroyo Pando. También existe una concentración importante de población durante la temporada turística en el litoral del departamento de Maldonado, principalmente

en la ciudad de Punta del Este. En total, el 69.9% (2.2 millones) de la población reside en la franja costera uruguaya del RPFM. La tasa de incremento de la población en el litoral del área ha sido variable, entre 2,3 ‰ en Montevideo y 28,5 ‰ en Maldonado (Punta del Este). Los departamentos costeros uruguayos (Colonia, San José, Canelones, Montevideo, Maldonado, Rocha) concentran el 78% del Producto Bruto Interno. Montevideo capta el agua del río Santa Lucía, un tributario del río de la Plata y no de este último directamente debido a su salinidad.

El RPFM incluye importantes áreas donde se pescan especies fluviales y marinas. En el Río de la Plata superior cinco especies: sábalo (*Prochilodus lineatus*), boga (*Leporinus obtusidens*), pejerrey (*Odontesthes bonariensis*), patí (*Luciopimelodus pati*) y dorado (*Salminus maxillosus*) sustentan pesquerías de importancia local para pescadores comerciales y deportivos de ambos países. En el Río de la Plata inferior y en su Frente Marítimo las especies con mayor relevancia comercial son: la corvina (*Micropogonias furnieri*), la merluza (*Merluccius hubbsi*), la anchoíta (*Engraulis anchoita*), el calamar (*Illex argentinus*), el lenguado (*Paralichthys spp.*), y la pescadilla (*Cynoscion striatus*).

El sector pesca produjo exportaciones de 79.200 toneladas que representó un valor de US\$ 112.300 millones para el Uruguay (0.6 % del PIB) y de 453.500 toneladas para un valor de US\$ 643.500 (0.4 % del PIB) (Datos de COFREMAR y DINARA para Uruguay y COFREMAR y Secretaria de Ganadería, Agricultura y Pesca para Argentina). Existen asimetrías en los intereses económicos de Uruguay y Argentina con relación al manejo de los recursos naturales de la Zona Común de Pesca. Para Uruguay, ella representa prácticamente el 99% de su pesca industrial, mientras que para Argentina representa menos del 5% del volumen total de capturas de su flota industrial.

7. Los instrumentos para la conservación ambiental: el contexto legal e institucional

El Tratado del Río de la Plata y su Frente Marítimo, firmado en 1973 por Argentina y Uruguay, establece el marco jurídico fundamental para la administración binacional de ese cuerpo de agua. Este marco incluye dos Comisiones binacionales: la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP) y la Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo, (COFREMAR, Ex CTMFM). Estas comisiones son organismos internacionales de naturaleza gubernamental con capacidad de realizar estudios e investigaciones, adoptar y coordinar medidas

para la protección del medio acuático y de su fauna. Otras funciones incluyen: la prevención y eliminación de la contaminación y otros efectos nocivos que puedan derivar del uso y explotación de los recursos; la evaluación, y preservación de los recursos vivos y su racional explotación, la promoción de estudios y formulación de planes de armonización de la legislación, el establecimiento de volúmenes de captura por especie y la asignación de cupos de pesca a cada una de las partes. El Tratado estableció, en 1973, un área de prohibición de acciones contaminantes en el Frente Marítimo (Tratado, art.78).

Por intermedio de estas comisiones, los países han establecido un sistema binacional para la evaluación y administración de los recursos naturales en el Río de la Plata y su Frente Marítimo. Existen otras comisiones binacionales relacionadas con la problemática ambiental del Río de la Plata, las cuales se refieren a las cuencas que vierten sus aguas a ese cuerpo de agua. Estas comisiones son: La Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU), y la Comisión Técnica Mixta de la represa de Salto Grande en el río Uruguay y la Comisión Intergubernamental Coordinadora de la Cuenca del Plata (CIC), con jurisdicción sobre la cuencas del Paraná y del Paraguay.

Los dos países ribereños hacen parte de numerosas convenciones referentes a la conservación del medio acuático, incluyendo, entre otras, la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, la Carta de los Océanos. También han suscrito la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992) y ratificado la Convención sobre Diversidad Biológica.

Ambos países tienen organismos nacionales y locales con las funciones de establecer normas para la protección del medio ambiente y para controlar su aplicación (Tabla 2).

8. Principales problemas ambientales del Río de la Plata y su Frente Marítimo

8.1. Contaminación de aguas y sedimentos

Este es el principal problema ambiental que enfrenta el área. Si bien el cauce binacional del RPFM todavía muestra valores no muy alarmantes en cuanto al contenido de sustancias contaminantes, las riberas y las áreas costeras tienen algunos puntos sensibles en los que las acciones antropogénicas han afectado la calidad del agua y los sedimentos y la situación podría llegar a ser grave en un futuro no lejano. Los efectos de los diferentes apor-

tes de contaminantes sobre la calidad del agua y comunidades biológicas se ven atenuados por el gran efecto de dilución del Río de la Plata y su Frente Marítimo.

Los contaminantes encontrados en el Río de la Plata y su Frente Marítimo provienen de los siguientes aportes: la cuenca del Plata, algunos ríos de mediano tamaño como el río Salado, en la Provincia de Buenos Aires y el río Santa Lucía, en el centro de la región costera de Uruguay, algunas pequeñas cuencas y sub-cuencas tanto en Uruguay como en Argentina y finalmente, los aportes costeros de las grandes ciudades como Montevideo y Buenos Aires y las otras ciudades costeras sobre el RPFM.

Los aportes de la Cuenca del Plata son muy importantes. El río Paraná tiene un caudal medio de aproximadamente 17.000 m³/s, y el río Uruguay 5.000 m³/s. Se estima que la carga de metales pesados del río Paraná varía entre 2,3 (plomo) y 40 ton/día (cobre). Para el río Uruguay las cargas estimadas son entre 1,6 y 15,1 ton/día. La carga de hidrocarburos totales del Paraná es muy alta mientras que la del río Uruguay representa el 1% de los aportes. La DQO aportada por el Paraná es de 15.539 ton/día contra 9.840 del río Uruguay. En cuanto a los nutrientes, el Paraná aporta 49 ton/día de amonio y 307 ton/día de nitratos contra 13,2 y 135 del río Uruguay respectivamente. El material en suspensión del río Paraná puede experimentar grandes variaciones a lo largo del año (entre 40 y más de 250 mg/l), dependiendo de condiciones particulares en algún punto de la cuenca, por ejemplo de las crecidas del río Bermejo. La carga sedimentaria aportada por el río Paraná al Río de la Plata para el período 1993-2001 fue 2,44.10⁵ ton/día.

El área metropolitana de Buenos Aires presenta una población de aproximadamente 11 millones de habitantes y uso múltiple del territorio. En esta franja de costa de la Provincia de Buenos Aires, además de la presencia de contaminación por materia orgánica, se han detectado, tanto en la columna de agua como en sedimentos y biota, altas concentraciones de sustancias contaminantes.

Estas descargas afectan la franja costera desde Buenos Aires hasta Punta Lara donde se encuentran niveles de coliformes fecales y totales superiores a 3 unidades logarítmicas por litro (FCS, 1997). La calidad del agua está afectada principalmente entre los 500 y 2000 metros cercanos a la costa pero se pueden presentar concentraciones elevadas de cromo, bacterias coliformes e hidrocarburos en una franja de 10 km, bajo ciertas condiciones hidrometeorológicas. Se presentan también niveles elevados de nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) a la altura de la desembocadura del Riachuelo (entre 0,4 y

Tabla 2. Autoridades nacionales relacionadas con la planificación, gestión y control en temas ambientales de la República Argentina y del la República Oriental del Uruguay

República Argentina

- Armada Argentina.
- Prefectura Naval Argentina.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos.
- Secretaría de Política Ambiental de la Provincia de Buenos Aires.
- Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables de la Nación.
- Secretaría de Medio Ambiente y Planeamiento Urbano de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires.

República Oriental del Uruguay

- Administración Nacional de Puertos.
- Armada Nacional – Prefectura Nacional Naval.
- Intendencia Municipal de Canelones.
- Intendencia Municipal de Colonia.
- Intendencia Municipal de Maldonado.
- Intendencia Municipal de Montevideo.
- Intendencia Municipal de Rocha.
- Intendencia Municipal de San José.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Dirección Nacional de Hidrografía.
- Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Medio Ambiente.
- Oficina de Planeamiento y Presupuesto.

1,5 mg/l). Los valores máximos de fosfato (P/PO₄⁻³) observados corresponden a los arroyos Sarandí y Santo Domingo (1,3 y 1,7 mg/l, respectivamente). Los niveles de plomo y cromo observados para la columna de agua de la Franja Costera oscilan entre 1 y 10 µg/l y entre 10 y 20 µg/l para plomo y cromo, respectivamente (FCS, 1997). En la salida de la descarga de Berazategui, se detectó la presencia de cadmio en la columna de agua (1,7 µg/l). Los niveles de de bifenilos policlorados (PCBs totales) en la columna de agua (**Frias & Janiot, 2000**) son altos con respecto a los límites máximos sugeridos para la protección de la biota acuática (0,001 ng/l, CCME, 1999) en algunas desembocaduras de la costa argentina. El conjunto de plaguicidas organoclorados se encuentra entre 2,6 ng/l a 54 ng/l superando ocasionalmente el valor guía para la protección de la biota acuática correspondiente a la suma de los niveles guía para: HCH, heptacloroepoxi, dieldrin, endrin, DDT, DDD, DDE y clordano (36 ng/l, CCME, 1999). Los hidrocarburos aromáticos polinucleares en la columna de agua tuvieron un comportamiento similar, variando desde niveles no detectados hasta 12,5 µg/l, (Emisario de Berazategui).

Dichos valores son inferiores a los correspondientes a la suma de los niveles guía para los hidrocarburos aromáticos polinucleares (14,8 µg/l, CCME, 1999).

Los metales pesados, cromo, plomo, cadmio, zinc y cobre en sedimentos presentan valores superiores, por lo menos en algún punto de la costa, a los sugeridos para la protección de la biota acuática. Los PCBs presentaron concentraciones superiores al nivel guía en los sedimentos de la desembocadura del Riachuelo (29,5-70,2 ng/g), del Emisario de Berazategui (123-1085 ng/g) y el río Santiago (3-54 ng/g). La concentración promedio de plaguicidas organoclorados en sedimentos respecto al agua es aproximadamente 1800 veces en las cercanías de la descarga, y en toda el área es de alrededor de 950 (FCS, 1997).

Los peces comestibles capturados en esta zona presentan concentraciones de zinc, cadmio y arsénico que no exceden los niveles máximos permitidos para consumo humano (para Cromo no hay límite establecido). Sin embargo, puede haber niveles peligrosos de mercurio en todas las estaciones estudiadas y de plomo en los peces capturados a la altura de la desembocadura del Riachuelo y del Arroyo Sarandí. Se encuentran altas concentraciones de hidrocarburos alifáticos y PCBs en los sábalos (9,5-34,6 µg/g y 2,1-2,6 µg/g, respectivamente) del Río de la Plata (Colombo et al., 2000). También se han detectado metales pesados, plaguicidas organoclorados, PCBs, dioxinas y furanos en invertebrados (*Corbicula fluminea*) (Colombo et al., 1995, 1997; Cataldo et al., 2001).

La Franja Costera Norte del Río de la Plata corresponde a la República Oriental del Uruguay. Los principales usos de estas áreas son: recreativos (balnearios), productivos, pesca artesanal y agrícolas. La calidad de las aguas en la Franja Costera Norte del Río de la Plata está deteriorada entre la Bahía de Montevideo y la desembocadura del Arroyo Pando. En este tramo, el Río de la Plata recibe aportes de arroyos receptores (Pantanos, Miguelete, Carrasco, Pando y río Santa Lucía), de efluentes industriales y domésticos, así como descargas directas de la red de saneamiento, y de un emisario subfluvial, correspondientes al área metropolitana de Montevideo. Las concentraciones de metales pesados en sedimentos de la Bahía de Montevideo y del Litoral Oeste de la Franja Costera Norte del Río de la Plata superan los niveles máximos sugeridos para la protección de la biota acuática. El cromo es el que mayores concentraciones presenta en sedimentos (160• g/g p.s.). En biota se encontraron niveles altos de cobre mercurio y zinc. Para el mercurio, los niveles se muestran similares en ambos tejidos.

Los pocos datos existentes sobre la presencia de contaminantes en agua del cuerpo principal del RPFM mues-

tran cadmio y plomo superiores a los niveles guía para la protección de la biota. Para el cobre y el cromo, las concentraciones observadas en la columna de agua son inferiores a los niveles guía para la protección de la biota acuática. No se detecta la presencia de plaguicidas organoclorados, ni de hidrocarburos aromático, ni de PCBs (bifenilos policlorados) en concentraciones superiores a los niveles guía para la protección de la biota excepto en la Barra del Indio y en una estación ubicada en el Río de la Plata Interior cerca a la desembocadura del río Uruguay. Hay concentraciones variables de metales pesados en los sedimentos superficiales, siendo mayores en las áreas asociadas a la desembocadura del río Paraná, al frente de turbidez y a la Barra del Indio. Las concentraciones de hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) fueron inferiores a los niveles guía para la protección de la biota. Para los plaguicidas (biocidas) y los PCBs, también fueron inferiores a los niveles guía para la protección de la biota, a excepción de una estación ubicada en el Río de la Plata Interior a la altura de la desembocadura del río Uruguay.

8.2. Pérdida de biodiversidad

El área geográfica del RPFM pertenece a la eco-región costera "Plataforma Uruguay-Buenos Aires" (34°- 41° S) o a la "Zona Transicional" con que se conoce a la Provincia Biogeográfica Argentina. Es un área particular, caracterizada por una alta diversidad de peces e invertebrados y numerosas colonias de mamíferos marinos y aves. Dentro del contexto biogeográfico del Atlántico sudoccidental (macro-escala), el RPFM sostiene una alta biodiversidad, con escasos endemismos: 146 especies de peces demersales, 757 de especies de invertebrados bentónicos y 534 especies zooplanctónicas han sido registradas en el área. La zona con más alto número de especies es la plataforma costera con 1474 especies de bentos, más de 50 de peces y cerca de 20 de zooplancton. La distribución espacial de la riqueza de las especies (micro-escala) es altamente heterogénea, los sustratos duros y bancos de mejillones juegan un papel relevante en la máxima diversidad bentónica, que a su vez parece regular los máximos de diversidad de peces. Por su parte, los máximos de diversidad de copépodos parecen estar asociados con los frentes oceanográficos.

En el área del RPFM hay tres grupos de especies con características de especies carismáticas y que favorecen los programas de conservación: lobos marinos (*Otaria flavescens* y *Arctocephalus australis*), tortugas de mar (*Chelonia mydas*) y ballenas (*Eubalaena australis*). Hay tres especies como potenciales bioingenieros: mejillones, vieiras y cangrejos.

El Río de la Plata no parece ser una “unidad ecológica” ya que muestra una gran conectividad con los ambientes superiores de la cuenca en lo concerniente a ciclos de vida de los organismos y la producción de detritos de plantas. No se conocen todavía registros de especies acuáticas que se encuentren en peligro de extinción y tampoco hay un registro de las especies que han desaparecido en los últimos años.

8.3. Reducción de las poblaciones acuáticas pesqueras

Las asociaciones ícticas son indicadoras apropiadas de la heterogeneidad de hábitat, caracterizando los ambientes particulares a lo largo del gradiente en la comunidad íctica, desde una comunidad dominada por especies dulceacuícolas, a una comunidad de especies marinas asociadas con aguas profundas y frías.

En el área estuarina se encuentran 63 especies que lo habitan como adultos y 37 especies que lo colonizan durante el primer año de sus vidas. Estas especies son mayormente de origen marino, pero también se capturan especies estuarinas, dulceacuícolas e incluso especies anádromas (*Netuma barba*) y catádromas (*Mugil lisa*). La abundancia es mayor en la época primaveral y existe una tendencia declinante en las densidades capturadas de las campañas de pesca de los últimos años. En el área continental de agua dulce la explotación del Sábalo esta prohibida debido a la contaminación por PCB's. En el área de la plataforma y el talud, se observó en 2001 una disminución en la abundancia de juveniles de corvina (*Micropogonias furnieri*), la cual se ha reflejado en una disminución drástica en sus capturas en los últimos años. La serie de datos científicos sobre la captura de la merluza (*Merluccius hubbsi*) en el transcurso varios años muestra una disminución de los rendimientos promedio, al igual que disminución de las capturas y un aumento considerable de porcentajes de fauna acompañante. La merluza pasó de ser la principal especie, en cuanto a su aporte porcentual a la captura total, en 1994 (45% de la captura total), a segundo lugar en 1999 (16%) y al tercero en 2001 (12,4%). Estos indicadores coinciden con otros estudios e investigaciones que indicarían el estado de sobreexplotación de la merluza, que fuera observado en los últimos años y caracterizado por un decrecimiento sostenido de la biomasa total, reducción de la población reproductiva y tendencia a la desaparición de las clases de edad mayores.

8.4. Especies exóticas invasoras

En el Atlántico Sudoccidental hay 31 especies que pueden ser consideradas como introducidas. La mayoría de los ecosistemas costeros del RPFM presentan algunas especies que han causado modificaciones importantes en la

biodiversidad de la región y algunas han generado problemas económicos (Penchaszadeh, 2003).

El mejillón dorado “golden mussel” oriundo de ríos y arroyos de China y sudeste de Asia, *Limnoperna fortunei*, fue detectado en 1991 en el Río de la Plata. Desde su introducción a través del agua de lastre de los buques transoceánicos ha invadido cuatro importantes ríos de la Cuenca del Plata. En 1996 se encontró en los ríos Paraná y Paraguay. En 2001 fue citado para el río Uruguay. También registró entre 1991 y 1995, un importante aumento en la densidad (de 4 a 5 ind.m⁻² hasta superar los 150.000 ind.m⁻²).

El bivalvo de agua dulce *Corbicula fluminea* o “almeja asiática” es nativo del Pacífico occidental y de algunas partes de África. Fue citada por primera vez para la costa argentina del Río de la Plata en 1981, estimándose que la época probable de introducción fue a fines de la década de los 60. En 1983, se registra la presencia de *Corbicula* sp. en Uruguay, estimando que la invasión ocurrió en 1979.

El caracol *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) fue citado por primera vez en 2001. Esta especie tiene gran capacidad reproductora, coloca un número total de 184 a 410 cápsulas ovíferas por individuo y 976 huevos en promedio por cápsula. La fecundidad es de aproximadamente 179.000 a 400.000 huevos por individuo, con dos a cuatro posturas durante la estación de puesta. Por esta razón puede constituirse en invasora ya que su nicho ecológico no está ocupado por ninguna especie autóctona.

El poliqueto invasor formador de arrecifes *Ficopomatus enigmaticus* (Polychaeta: Serpulidae) es una especie cosmopolita formadora de arrecifes, introducida hace más de 60 años en varios estuarios y lagunas costeras en Argentina y Uruguay. Los arrecifes de poliquetos constituyen una fuente de refugio y alimento para muchas otras especies y además, pueden generar cambios hidrodinámicos alrededor de ellos.

Hay cinco especies de cirrípedos torácicos balanomorfos de la zona litoral del área de influencia del Río de la Plata y las costas marinas adyacentes: *Balanus amphitrite*, *B. glandula*, *B. improvisus*, *B. trigonus* y *Chthamalus bisinuatus*. De ellas, sólo la última es endémica del Atlántico sudoccidental. Las otras cuatro son cosmopolitas y/o invasoras. *B. amphitrite* y *B. trigonus* aparentemente son originarias del Océano Pacífico y habrían llegado a estas costas al final del siglo XIX.

La ostra japonesa *Crassostrea gigas* fue introducida para cultivo comercial en la región en 1981. Su distribución se ha extendido desde su hábitat original en Japón,

China y Corea hacia América, Australia y Europa, por medio de trasplantes para cultivo.

8.5. Floraciones de algas nocivas y mareas rojas

Los fenómenos de floraciones de algas en la región del RPFM han sido numerosos y corresponden a varios grupos taxonómicos. Los principales eventos han sido causados por los siguientes tipos de algas: **1. Microalgas productoras de toxinas paralizantes de moluscos o TPM** (aparecida en 1980 en Uruguay en la Península de Valdés y causada por el dinoflagelado *Alexandrium tamarense* y en 1992, en la costa uruguaya por *Gymnodinium catenatum*); **2. Microalgas productoras de toxina amnésica de moluscos o TAM** (causada por varias especies de diatomeas del género *Pseudonitzschia*, potenciales desde julio de 2000); **3. Microalgas productoras de toxinas diarreas de moluscos o TDM** causada por *Dinophysis* spp. en la costa uruguaya en el período estival de los años 1992, 1994 y 1996; **4. Otras especies tóxicas o potencialmente nocivas** (se han detectado dinoflagelados de los géneros *Gymnodinium* y *Gyrodinium* y *Prorocentrum* que presentan afinidades con especies productoras de toxinas hemolíticas que afectan a los peces que probablemente produce venerupina. También se han detectado florecimientos de una especie de cianobacterias, *Microcystis aeruginosa* que es productora de la hepatotoxina llamada microcistina. También se ha mencionado a *Pfiesteria*, un dinoflagelado heterótrofo letal para los peces); **5. Mareas rojas no tóxicas** (producidas por diversas especies de diatomeas, dinoflagelados, y ciliados tanto en aguas neríticas como costeras de la región).

8.6. Presencia del *Vibrio cholera*

La primera descripción de una epidemia de cólera que afectó varios países se remonta a principios del siglo XIX, más precisamente a 1817. En América Latina, el cólera se puede considerar una enfermedad re-emergente a partir de enero de 1991. Según datos de la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.), hasta el año 2000 se registraron 1.235.000 casos en América Latina y 12.476 muertes, afectando a todos los países del continente excepto Uruguay. En Argentina, el primer caso de cólera, en 1992, correspondió a *V. cholerae* O1 biotipo El Tor, serotipo Ogawa. Desde entonces hasta el año 2000 ocurrieron 7 brotes epidémicos, que afectaron a 4835 personas con una letalidad del 1,5%. Actualmente se estudia en el agua y en otros organismos habiéndose aislado un total de 421 cepas con características típicas, (146 de agua, 132 de fitoplancton y 143 de zooplancton). Hasta el momento se han analizado 334 cepas (122 de agua, 100 de fitoplancton y 112 de

zooplancton). Sólo el 5% de las cepas analizadas del Río de la Plata fueron identificadas como *V. cholerae* no O1. De 31 estaciones, en 10 (32,2 %) se detectó la presencia de *Vibrio cholerae* O1 VNC. El 25 % de estas detecciones correspondieron a muestras de agua, el 9,6% a fitoplancton y el 3,2% a zooplancton.

9. La conservación ambiental comienza con el conocimiento científico

La gran base sobre la cual se construye cualquier programa de conservación ambiental es el conocimiento científico. El Proyecto de protección ambiental del RPFM se ha trazado como uno de sus principales objetivos realizar investigación interdisciplinaria e interinstitucional compartiendo la infraestructura y recursos, produciendo información confiable y haciendo gestión participativa y transparente de los recursos. En esta sección se describen brevemente las principales herramientas científicas puestas al servicio de la gestión ambiental del RPFM y las estrategias utilizadas para lograr la participación de las instituciones que hacen investigación ambiental en los dos países.

9.1. Recuperación de información

Con la participación de 22 instituciones u organismos relacionados con el área geográfica y la temática ambiental de ambos países se elaboró un diagnóstico sobre el estado de la información. Las conclusiones del diagnóstico fueron:

- a. En algunos casos la información era inexistente (como sobre distribución y ciclos de vida de algunas especies) o insuficiente (monitoreo de la actividad de navegación)
- b. En otros casos podía ser de alcance limitado (enfocada casi exclusivamente a la biología pesquera), tomada con poca coordinación institucional (estaciones de monitoreo); de cobertura temporal y espacial limitada (mediciones de corrientes); de calidad variable (dependiendo de las limitaciones financieras institucionales).
- c. También pudo concluirse que la información existente podía estar poco disponible o restringida (estimaciones de caudal del Río de la Plata), subutilizada (información georeferenciada), en diferentes formatos no compatibles, no estandarizados (recolección de datos y metodologías de análisis) y dispersa en diferentes instituciones o personas (datos de contaminantes en agua, sedimentos y biota).

Durante la recolección de información y en actividades posteriores se observó que existían dificultades prácticas para compartir e intercambiar la información, aunque en teoría, todos afirmaban estar de acuerdo en hacerlo. Esto está relacionado con que la mayoría de científicos tienen tendencia a guardar datos e información hasta tanto no publican su trabajo, proceso que puede demorar varios meses o años. En consecuencia, ni los organismos de gestión cuentan con la información que requieren para la toma de decisiones, ni otros organismos de investigación pueden utilizarlas para mejorar sus propios trabajos. Esto se incrementa por las dificultades existentes para adquirir y actualizar equipamiento informático. Como estrategia para disponer de la información se generó un Sistema de Información Ambiental (SIA) de dominio público que incluye las bases de datos, las referencias bibliográficas, la cartografía, el sistema de información geográfica y el sistema integrado para el manejo ambiental. Este sistema cuenta actualmente con 3000 citas bibliográficas

9.2. Investigación interdisciplinaria e interinstitucional para llenar los vacíos claves de información

La complejidad de los temas relacionados con la gestión ambiental en un área como el RPFM superan las posibilidades de cualquier grupo individual de investigación sobre temas ambientales y se necesita un sistema interdisciplinario e interinstitucional que permita abarcar temas tan diferentes. Tres grandes áreas reúnen los grupos de investigación: **a. Investigaciones científico naturales** (contaminación de aguas, sedimentos, desechos peligrosos, acumulación de contaminantes en las cadenas tróficas, biodiversidad, mareas rojas, cólera, introducción de especies exóticas, biología de poblaciones, patrones de circulación del agua; **b. Aspectos sociales y económicos:** (demografía, usos del suelo y de los recursos acuáticos, dimensión económica de las actividades ligadas con el RPFM, instrumentos económicos para la protección ambiental y todo lo relacionado con la sensibilización, comunicación y educación ambiental); **c. Asuntos jurídicos e institucionales:** que incluye el marco jurídico y legal, las instituciones relacionadas con la protección del medio ambiente, sus competencias e interrelaciones, las leyes, decretos reglamentaciones y otras normas

El diagnóstico sobre la información existente se complementa con campañas oceanográficas para lograr una visión general de la situación ambiental actual del RPFM. Estas campañas se realizaron con embarcaciones de las instituciones participantes y un barco pesquero privado; con-

sintió de una primera etapa en las zonas internas del Río de la Plata y una segunda en el área del Frente Marítimo.

Los mecanismos de cooperación acordados entre las instituciones que realizan productos de investigación del Proyecto (Tabla 3) han permitido obtener datos históricos así como poner en marcha un ambicioso plan de investigación de campo utilizando la infraestructura (personal, embarcaciones y equipos) institucional. Estos datos proporcionaron los elementos para las bases de datos de uso común para los investigadores de distintos grupos de trabajo. Los grupos de trabajo inter-institucionales y binacionales así como las campañas de investigación han dado lugar al establecimiento de vínculos entre las instituciones participantes antes inexistentes y han producido 70 informes de diferentes investigaciones. Con el análisis de estos resultados se han podido focalizar problemas claves, establecer los puntos calientes (“Hot-spots”) tanto desde el punto de vista geográfico como de prioridades de acción, y evaluar las causas raíces de la problemática ambiental del área.

9.3. Otras herramientas

Dos de las principales áreas de investigación, además de los diagnósticos, que han servido como base al establecimiento de los conocimientos necesarios para la gestión ambiental del RPFM son la teledetección y los modelos de circulación. Los estudios ambientales que pueden ser realizados mediante la utilización de la teledetección están principalmente relacionados con la franja costera y son: erosión, deriva de sedimentos, extracción de arenas, determinación de vegetación en lagunas, contaminación proveniente de actividades de navegación y ordenamiento territorial. Los estudios de modelos de circulación permiten mejorar la comprensión del funcionamiento del sistema del RPFM y de sus características físicas y su dinámica. En el Proyecto se han utilizado tres modelos de circulación (HamSOM/CIMA, Río de la Plata 2000/INA y RM-2/IMFIA) los cuales proporcionan una buena representación de los patrones de circulación del Río de la Plata y de su Frente Marítimo. Los resultados de las aplicaciones de los modelos sirven para estudiar las siguientes características de la circulación del RPFM: patrones de circulación en el Río de la Plata, dinámica del frente salino, corredores de flujo y respuesta del sistema a los vientos fuertes del sudeste (Sudestada).

10. Pero hacerla realidad requiere de estrategia: como pasar de las palabras y de los documentos a los hechos?

Pasar de los programas y proyectos de investigación y de la generación de informes, artículos, libros y otros do-

Tabla 3. Instituciones vinculadas al proyecto de protección ambiental del RPFM que realizan productos de investigación para el Análisis Diagnóstico Transfronterizo.

Institución	Sigla	Actividades que realiza
Argentina:		
Centro de Investigaciones del Mar y de la Atmósfera	CIMA	Modelos de circulación del RPFM
Instituto de Astronomía y Física del Espacio	IAFE	Procesamiento y análisis de imágenes de satélites
Instituto Nacional del Agua	INA	Modelos de circulación del RPFM
Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero	INIDEP	Investigaciones oceanográficas, biología de poblaciones, biodiversidad
Servicio de Hidrografía Naval de la Armada Argentina	SHN	Investigaciones oceanográficas, contaminación
Universidad Nacional de Mar del Plata	UNDMP	Biología de Poblaciones y biodiversidad
Universidad Nacional de la Plata	UNLP	Biología de Poblaciones y biodiversidad
Instituto Limnológico Raúl Ringuelet	INPLA	Biología de Poblaciones y biodiversidad
Prefectura Naval Argentina	PNA	Investigaciones oceanográficas, contaminación
Museo Nacional Bernardino Rivadavia		Invasión por especies exóticas
Comisión Nacional de Actividades Espaciales.	CONAE	Provisión de imágenes de satélite
Uruguay:		
Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada Nacional	SOHMA	Investigaciones oceanográficas, contaminación
Universidad de la República, Facultad de Ingenierías, Instituto de Mecánica de fluidos	UDELAR-FC IMFIA	Biología de Poblaciones y biodiversidad de Ciencias Modelos de circulación del RPFM
Universidad de la República, Facultad de Veterinaria, Instituto de Investigaciones Pesqueras	IIP	Biología de poblaciones y biodiversidad
Proyecto Gestión Costera en la costa Uruguay del Río de la Plata	ECOPLATA	Estudios sociales y económicos de la utilización de recursos
Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Dirección Nacional del Medio Ambiente	DINAMA	Estudios sobre contaminación costera, biodiversidad
Centro Latinoamericano de Economía Humana	CLAEH	Gestión costera participativa
Laboratorio Tecnológico del Uruguay	LATU	Estudios sobre contaminación, educación ambiental

cumentos a un programa gubernamental de protección ambiental y recuperación de hábitats constituye sin duda el más grande reto de estas iniciativas. Una vez realizado el diagnóstico y producidas las recomendaciones, van a transitar por la larga y difícil senda de la aprobación y adopción por parte de las instituciones encargadas de hacer la planificación gubernamental y de generar normas, programas de monitoreo y educación. Este es el paso crítico puesto que, si ya se ha mostrado que la comunicación entre científicos es difícil, parcial y llena de desconfianza, el paso de la información entre los científicos y los tomadores de las decisiones es todavía más incipiente en los países de América del Sur. La desconfianza de los científicos quienes creen que los tomadores de decisión no están interesados en utilizar las informaciones científicas y las de éstos que creen que los científicos generan conocimientos sin aplicación o que esperan siempre tener to-

dos los datos e informaciones para atreverse a proponer alguna recomendación. La metodología actualizada de Manejo Integrado Costero ha incorporado el concepto de manejo adaptativo para integrar en un ciclo la información generada y su utilización para los programas de conservación ambiental (Olsen et al., 1997). El principal papel de la ciencia en este proceso es generar conocimiento y aportar las informaciones necesarias para que pueda haber el gobierno (“governaza”) adaptativo a medida que se avanza en dicho conocimiento (GESAMP, 1999).

Una forma de romper la desconfianza mutua es incorporando al medio científico en los procesos de gestión y al medio gubernamental en los procesos investigativos cooperativos. Uno de los fracasos más conocidos en el manejo ambiental surge cuando las autoridades de gestión,

dirigidas por personas, posiblemente formadas en el medio científico, quieren convertir a estas instituciones en unidades de investigación, lo que a menudo termina en que la autoridad no hace ninguna de las dos cosas, en vez de unir los esfuerzos con las instituciones que tienen naturalmente el papel de la investigación dentro de su razón de ser. En este proyecto sobre el RPFM, la estrategia ha sido la de vincular desde el diagnóstico mismo a las instituciones de investigación (universidades, institutos hidrometeorológicos, institutos de pesca, institutos oceanográficos) con autoridades ambientales (ministerios, secretarías) tanto para fijar las metas de investigación como para planear la gestión. Este es, en esencia, un proceso de generación de consensos para que las informaciones claves obtenidas en el proceso de investigación sean incorporadas a un sistema de información ambiental de dominio público que sirva como apoyo a la gestión ambiental del área.

El proceso de transmisión de los resultados y recomendaciones del proyecto debe ser realizado en conjunción con un grupo jurídico asesor que contribuya a armonizar las propuestas con los marcos jurídicos y competencias institucionales. Después de este proceso, las recomendaciones y el programa estratégico serán adoptadas y aplicadas por un grupo conformado por las autoridades ambientales de ambos países. Es muy importante entonces, que esta fase proponga, en consenso entre científicos y tomadores de decisión, recomendaciones concretas como: objetivos de calidad del agua, estrategias para la conservación de la biodiversidad, protocolos para estudios binacionales de impacto ambiental y también la promoción del uso de tecnologías que permitan la recuperación y conservación ambiental. Finalmente, las sociedades de ambos países deben ser informadas y participadas mediante estrategias de corto plazo utilizando los medios de comunicación (no solamente los medios masivos) y a más largo plazo introduciendo la problemática ambiental de RPFM en las estrategias educativas hasta la participación efectiva de las dos sociedades tanto en la protección ambiental como en el logro de la sustentabilidad de las iniciativas relacionadas con proyectos específicos diseñados para tal fin.

Conclusiones

Los resultados obtenidos hasta el momento muestran que si es posible lograr un trabajo conjunto de cooperación interinstitucional y que los investigadores de los dos países han venido aceptando la importancia de la interdisciplinariedad para el desarrollo con éxito de proyectos ambientales. Llevar este proceso a las instituciones de gestión ambiental gubernamental y lograr el apoyo

de las iniciativas privadas constituye el nuevo reto del Proyecto. La incorporación temprana de los tomadores de decisión con los encargados de los procesos de investigación científica les disminuye la sensación de inutilidad de estos estudios y su aparente falta de realidad. Por su parte la participación de científicos pertenecientes a unidades de investigación clásicas en la búsqueda de soluciones a problemas puntuales y concretos de la sociedad, o a establecer legislaciones, medidas o programas educativos les permite creer un poco más en la gestión gubernamental y en la transparencia y así avanzar en el difícil y largo proceso de formación de consensos.

Es cierto que las duras épocas que atraviesan los dos países en el campo económico y social pueden constituir un elemento retardador de un proyecto de planificación ambiental, pero no es menos cierto que los tiempos de crisis son tiempos de cambio, son tiempos para enfrentar la historia, cambiar las realidades y lograr lo que parece imposible. Si en algo es posible superar los tiempos de crisis, es en los aspectos ambientales, cuando el horizonte gris permite ver que la sustentabilidad del futuro de la humanidad y de un país determinado, está en la sustentabilidad del ambiente y de los recursos naturales.

Referencias Bibliográficas

- Attrill, M. J., Rundle S. D.** 2002. Ecotone or Ecocline: Ecological Boundaries in Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **55**: 929-936.
- Cataldo, D., J.C. Colombo, D. Boltovskoy, C. Bilos and P. Landoni.** 2001. Environmental Toxicity Assessment in the Paraná river delta (Argentina): Simultaneous Evaluation of Selected Pollutants and Mortality Rates of *Corbicula fluminea* (Bivalvia) Early Juveniles. *Environmental Pollution*. **112**: 379-389.
- CCME** (Canadian Council of Ministers of the Environment). 1999. Canadian Environmental Quality Guidelines.
- Cicin-Sain, B., Knecht, R. W.** 1998. Integrated coastal and ocean management: concepts and practices. Island Press, Washington, DC, USA.
- Colombo, J.C., C. Bilos, M. Campanaro, M.J. Rodríguez Presa and J.A. Catoggio.** 1995. Bioaccumulation of polychlorinated biphenyls and chlorinated pesticides by the Asiatic clam *Corbicula fluminea*: its use as sentinel organism in the Río de la Plata. *Environmental Science and Technology*. **29**: 914-927.
- Colombo, J.C., C. Bilos, M. Remes Lenicov, D. Colautti, P. Landoni and C. Brochu.** 2000. Detritivorous Fish Contamination in the Río de la Plata Estuary. A Critical Accumulation Pathway in the Cycle of Anthropogenic Compounds. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. **57**: 1139-1150.
- Colombo, J.C., C. Brochu, C. Bilos, P. Landoni and S. Moore.** 1997. Long-term Accumulation of Individual PCBs, Dioxins, Furans and Trace Metals in Asiatic clams from the Río de la

- Plata Estuary, Argentina. *Environmental Science and Technology*. **31**: 3551-3557.
- Duda, A., Sherman, K.** 2002. A new imperative for improving management of large marine ecosystems. *Ocean and Coastal Management* **45**: 797-833.
- FCS** (Franja Costera Sur). 1997. Calidad de las Aguas de la Franja Costera Sur del Río de la Plata (San Fernando-Magdalena). Ed. Consejo Permanente para el Monitoreo de la Calidad de las Aguas de la Franja Costera Sur del Río de la Plata.
- Frías, F.C. y L. Janiot.** 2000. Protección Ambiental Costera y Desarrollo Sustentable en el Río de la Plata Frente a las Actividades Basadas en Tierra. UCES. Fundación Maphre-Servicio de Hidrografía Naval (SHN).
- GESAMP** (Grupo mixto de Expertos OMI/FAO/UNESCO-COI/OMM/OMS/OIEA/ Naciones Unidas/PNUMA sobre los aspectos científicos de la protección del Medio Marino). 1999. La Contribución de la ciencia al manejo costero integrado. *Inf. Estudios GESAMP*, **61**: 1-65.
- Gilman E.** 2002. Guidelines for coastal and marine site-planning and examples of planning and management intervention tools. *Ocean and Coastal Management* **45**: 377-404.
- Kates, R. W., Clark, W. C. Corell, R., Michael, J. Hall, C., Jaeger, C. Lowe, I. McCarthy, J. J. Schellnhuber, H. J. Bolin, B., Dickson, N. M., Faucheux, S., Gallopin C. G., Grubler, A., Huntley, B., Jager, J., Jodha J., Kasperson, R. E., Mabogunje, A., Matson, P. Mooney, H., Moore, B., O'Riordan, T., Svedi, U.** 1999. Sustainability Science. *Science* **292**: 641-642
- Mianzan, H., Lasta, C., Acha, M., Guerrero, R., Macchi, G., Bremec, C.** 2001. Rio de la Plata estuary, Argentina-Uruguay In: *Coastal Marine Ecosystems of Latin America* **144**, pp. 185-204. Ed. U Seeliger and B. Kjerve, Springer, Heidelberg.
- Olsen S., Lowry, K., Tobey, J.** 1999. A manual for assessing progress in coastal management. *Coastal Management Report* **2211**: 1-77.
- Olsen S., Lowry, K., Tobey, J.** 1997. A common framework for learning from ICM experience. *Ocean and coastal Management* **37**: 155-174.
- Penchaszadeh, P. E.** 2003. Especies animales bentónicas introducidas, actual o potencialmente invasoras en el sistema del Río de la Plata y la región costera oceánica aledaña del Uruguay y de la Argentina. Diagnóstico de situación. Freplata, Informe de trabajo.
- Woodley S.** 1997. Management of marine and coastal resources. Staff Paper -059. International Symposium on Integrated Coastal and Marine Management, ITN, Malang, Indonesia.

Recibido el 10 de septiembre de 2003

Aprobado para su publicación el 15 de noviembre de 2003

EFECTO DEL MÉTODO DE SÍNTESIS SOBRE LA SINTERABILIDAD DE LOS POLVOS CERÁMICOS DE $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$

por

C. Ararat¹, J. A. Varela², J. E. Rodríguez-Páez¹

Resumen

Ararat, C., J. A. Varela & J. E. Rodríguez-Páez: Efecto del método de síntesis sobre la sinterabilidad de los polvos cerámicos de $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 271-281 2005. ISSN 0370-3908.

El sistema $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$, sin y con dopantes, es de gran interés por las potencialidades tecnológicas que presenta como sensor de gas y como varistor. A pesar de esto se ha realizado muy poco trabajo para mejorar los métodos de síntesis que permitan obtener polvos cerámicos de $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$, sin y con dopantes, con características físicas y químicas pre-determinadas. Se realizó la síntesis de polvos cerámicos de este sistema utilizando los métodos de coprecipitación y precursor polimérico (Pechini). Los polvos obtenidos se caracterizaron con Difracción de Rayos X (DRX) y análisis térmicos (ATD/TG). La sinterabilidad de los mismos fue estudiada utilizando dilatometría y la microestructura de muestras densificadas se observó utilizando Microscopía Electrónica de barrido (MEB). Además se realizó una discusión de los resultados obtenidos considerando los diferentes fenómenos fisicoquímicos que se presentaron durante la sinterización de las muestras.

Palabras claves: $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$, Síntesis, Sinterización, Microestructura.

Abstract

Solid solutions of $\text{SnO}_2 - \text{TiO}_2$ systems have recently emerged as attractive materials for application in electronic devices, particularly in gas sensor and varistor applications. Although the technological application of this $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ system is important, very little work had been realized to optimize the synthesis methods to obtain ceramic powders with predetermined physical and chemical properties. In this work the ceramic powders were obtained by coprecipitation and polymeric precursor methods. They were characterized with X-ray diffraction (XDR) and thermal analysis (DTA / TG). We investigate the sintering parameters and some aspects of mass transport in $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ polycrystalline ceramics.

Key words : $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$, synthesis, sintering, microstructure.

¹ Grupo CYTEMAC. Departamento de Física, Universidad del Cauca, Calle 5 N° - 4-70 Popayán, Colombia

² Instituto de Química, UNESP, Araraquara, SP, Brasil

1. Introducción

El dióxido de estaño, SnO_2 , es un semiconductor tipo n que presenta una estructura cristalina tetragonal similar a la estructura tipo rutilo (Jarzebski J.M. 1976). Al igual que el óxido de cinc, ZnO , el SnO_2 es un semiconductor con banda prohibida ancha y presenta una adecuada combinación de propiedades químicas, electrónicas y ópticas que lo hacen útil como material para sensores de gas, catalizadores, dispositivos optoelectrónicos, electrodos electrocatalíticos y celdas fotovoltaicas (Chopra K. L. et. al. 1983, Duhn J. G. et. al. 1989, Fagan J. G. & Amarakon V. 1993, Olive P. et. al. 1993); recientemente se ha generado un gran interés por el desarrollo de varistores con base en el SnO_2 (Pianaro S. A. et. al. 1995, Leite E. E. et. al. 1999, Bueno P. R. et. al. 1998, Bueno P. R. et. al. 2000). Un aspecto que limita el uso de este óxido es su baja densificación durante la sinterización debido a que los mecanismos de transporte de masa que predominan son la difusión superficial o la evaporación – condensación, dependiendo de la temperatura de tratamiento, mecanismos que no favorecen la densificación (Varela J. A. et. al. 1987, Kimura T. et. al. 1989, Santilli C. V. et. al. 1995, Brito G. E. S. et. al. 1996, Ahn J. P. 1997); una alta densidad se logra con la incorporación de CoO , MnO_2 (Cerri J. A. et. al. 1996, Cerri J. A. et. al. 1996, Castro M. S. & Aldao C. M. 1998) y ZnO (Wang Y. J. et. al. 2000), entre otros.

Los polvos cerámicos de SnO_2 , sin y con dopantes, se pueden sintetizar utilizando los métodos siguientes: sol-gel, coprecipitación de oxalatos o hidróxidos, precursor polimérico, reacciones en estado sólido a través de la descomposición de carbonatos, deposición en fase vapor y oxidación de SnO (a) a SnO_2 por crecimiento epitaxial (Giuntini J. C. et. al. 1990, Leite E. R. et. al. 2002). Aunque los polvos cerámicos obtenidos pueden ser ultrafinos, característica que garantizaría un aumento de las velocidades de sinterización y por lo tanto un aumento de la posibilidad de obtener materiales densos con grano fino (Herring C. 1950), el SnO_2 es un caso típico donde el polvo nanométrico no garantiza un material completamente densificado; este comportamiento se debe a los mecanismos de transporte de masa que predominan durante la sinterización (Varela J. A. et. al. 1987, Kimura T. et. al. 1989, Santilli C. V. et. al. 1995, Brito G. E. S. et. al. 1996, Ahn J. P. 1997). El estudio de Santilli, Brito y colaboradores (Santilli C. V. et. al. 1995, Brito G. E. S. et. al. 1996) sugiere que la morfología de las partículas, las especies químicas ligadas a la superficie del SnO_2 y la microestructura de las piezas en verde tienen un gran efecto sobre la sinterización de este óxido.

Al igual que el SnO_2 , el TiO_2 en su fase tipo rutilo, estructura tipo tetragonal, es también un semiconductor tipo n y se realizan investigaciones para utilizarlo como material en electrocatalisis, fotoelectroquímica y como contraelectrodo en las ventanas inteligentes (Finklea H. O. et. al. 1988). El TiO_2 densificado también presenta efecto varistor, como el ZnO y el SnO_2 , con un voltaje de ruptura bajo por lo que puede utilizarse como varistor a voltajes bajos (Yan M. F. & Rhodes W. W. 1982) y sensor de humedad (Gopel W. & Shierbaum K. D. 1995). A diferencia del óxido de estaño, el TiO_2 no requiere de dopantes para su densificación y se alcanza un valor muy cercano a su densidad teórica sinterizándolo a $\sim 1300^\circ\text{C}$.

Por otro lado, al mezclar el SnO_2 y el TiO_2 , óxidos isoestructurales, se obtienen soluciones sólidas dentro de un amplio rango de composición (Park M. et. al. 1975, Flevaris N. K. 1987); este sistema exhibe un intervalo de miscibilidad a ciertas temperaturas, dependiendo de la composición química, y además se observa descomposición espinoidal (Park M. et. al. 1975). Recientemente se han realizado estudios sobre sinterización y transporte de masa en cerámicos policristalinos de $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ (Bueno P. R. et. al. 2003), además se trabaja en su posible uso como sensor de gas (Chung W. Y. et. al. 1992, Redecker M. et. al. 1998, Redecker M. et. al. 1999,) y varistor a voltajes bajos (Bueno P. R. et. al. 2002); un estudio completo de este sistema fue realizado por M. R. Cassia-Santos (Cassia – Santos M. R. 2003). Además de ser un promisorio candidato para la detección de gases, el sistema $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ se considera como un potencial sensor de humedad (Yamamoto T. & Shimizu H. 1982, Sze S. M. 1994); este sistema complejo se ve beneficiado por la combinación de las propiedades sensoras de sus componentes.

En este trabajo se utilizaron dos métodos de síntesis, coprecipitación y precursor polimérico (Pechini), los cuales son adecuadamente descritos para obtener la materia prima de los sistemas $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ y $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ dopado con cobalto, con diferentes composiciones. Los polvos cerámicos obtenidos se caracterizaron utilizando difracción de Rayos X (DRX), Análisis Térmico Diferencial y Térmico Gravitacional (ATD/TG) y se estudio su sinterabilidad utilizando dilatometría.

2. Procedimiento experimental

2.1. Síntesis de los sistemas $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$, sin y con CoO , por coprecipitación

Se sometieron a molienda 2.707 gramos de TiO_2 (Aldrich 99%), en un molino planetario (Mono Mill pulverisette 6), durante 74 horas. En otro recipiente se preparó una solu-

ción 0.3 M de $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Mallinckrodt 99.6%), con 0.1 M de HNO_3 en 500 mL de agua desionizada, a la cual se le adicionó de manera controlada, utilizando un dosificador (Metrohm Dosimat 685) a una velocidad de suministro de 0.5 mL cada 15 seg., hidróxido de amonio (NH_4OH Merck al 28%); el sistema se llevó hasta un valor de pH de 6.2 y se registró la variación del pH del sistema, a medida que se adicionaba el precipitante, utilizando un pH-metro Metrohm 744 con electrodo de vidrio. El polvo de TiO_2 activado mecánicamente se incorporó a la solución de la sal de estaño y se agitó la mezcla por 10 min. Así se conformó la suspensión de estaño-titanio.

Para preparar la suspensión del sistema estaño-titanio con cobalto, se disolvió en un recipiente 0.9376 gramos de acetato de cobalto (Aldrich) en 100 mL de agua desionizada y a la solución obtenida se le adicionó NH_4OH de manera controlada, utilizando el dosificador, hasta alcanzar un valor de pH de 9; también se realizó el registro de la variación del pH del sistema durante la adición del NH_4OH . A continuación, las suspensiones de estaño-titanio y la de cobalto se mezclaron y la mezcla se sometió a agitación durante quince minutos; posteriormente se dejó el sistema en reposo durante 24 horas a temperatura ambiente.

Con el fin de eliminar los iones de cloro presentes en el sistema, para actuar sobre las características de las partículas, tamaño y morfología principalmente, y favorecer transformaciones de fases que se puedan dar en el sólido, la suspensión coloidal obtenida se sometió a tratamientos en rotavapor (rotavapor B-721). El producto obtenido de este tratamiento se adicionó a una solución 0.05M de dietilamina en 50/50 de etanol-agua con el objetivo de eliminar de manera más eficiente los iones cloro presentes en el sistema. La suspensión resultante se sometió a un proceso de redispersión utilizando un equipo dispersor de alta cizalla (Ultra-Turrax T 50) a 2000 rpm durante 5 min.; la suspensión obtenida se dejó reposar durante 24 horas (este proceso se realizó dos veces). Al final, el sistema se sometió a un proceso de eliminación de solvente en el rotavapor para disminuir su volumen hasta un 90% del inicial; el producto obtenido se calentó a 70°C en una plancha calefactora hasta que se eliminó totalmente el solvente. El sólido resultante se secó en una estufa, a 70°C durante 12 horas, y finalmente se maceró en un mortero de ágata.

2.2. Obtención de los polvos cerámicos de $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$, sin y con CoO , a través del método de precursor polimérico (Pechini)

En un recipiente se colocó etilenglicol (Mallinckrodt 99.5%) a calentar a 70°C. Luego se adicionó lentamente ácido cítrico (Carlo Erba 99%) en una cantidad tal que cum-

plía con una relación 4: 1 con el etilenglicol. Al sistema anterior se le adicionaron 47.98 gramos de 2-etilhexanoato estannoso (Sigma 99%) y luego 9.07 gramos de butóxido de titanio (IV) (Acros 99%). En otro vaso de vidrio se disolvió 0.73 gramos de acetato de cobalto, en 100 mL de etanol absoluto a temperatura ambiente, y se adicionó a la solución anterior para conformar el sistema $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2\text{-CoO}$; el sistema se mantuvo siempre en agitación. Posteriormente se le adicionó NH_4OH hasta alcanzar un valor de pH de 9.

La solución obtenida, totalmente transparente, se sometió a un tratamiento térmico a 150 °C, en agitación continua, hasta que se formó una resina de color negro. Se dejó enfriar el sistema y se mantuvo a temperatura ambiente durante varios días. Por último, la resina obtenida se sometió a un precalcinado a 350°C durante 6 horas y el sólido resultante se maceró utilizando un mortero de ágata.

En la tabla I se indican las composiciones utilizadas para conformar los sistemas estudiados y que fueron sintetizados utilizando los dos métodos descritos anteriormente.

2.3. Caracterización de los polvos cerámicos obtenidos

Los sólidos obtenidos, a través de los dos métodos de síntesis, se caracterizaron con Difracción de Rayos X (DRX) para determinar las fases cristalinas presentes en las muestras; se utilizó para ello un difractómetro Siemens D-5000. Se realizaron análisis térmicos (ATD/TG) de los polvos sintetizados con el fin de conocer los principales fenómenos que ocurren cuando son sometidos a la acción de la temperatura y poder determinar así las temperaturas más adecuadas para la realización de los tratamientos térmicos.

2.4. Estudio de la sinterabilidad de los polvos cerámicos

Los polvos cerámicos obtenidos a través de los métodos de coprecipitación y precursor polimérico, y calcinados a

Tabla I. Diferentes concentraciones de los sistemas $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ y $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2\text{-CoO}$ sintetizadas en este trabajo utilizando los métodos de coprecipitación y Pechini.

MÉTODO \ ÓXIDOS	SnO_2	TiO_2	CoO
PECHINI	90	10	—
	80	20	—
	80	18	2
	80	15	5
COPRECIPITACIÓN	90	10	—
	80	20	—
	80	18	2
	80	15	5

900°C, se conformaron realizando inicialmente un prensado uniaxial (20 Mpa) y luego un prensado isostático a 210 Mpa. La sinterización de estas muestras prensadas se monitoreo utilizando un dilatómetro Netzch 402E a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en aire. La microestructura de las muestras sinterizadas a 1350°C, durante 2 horas, se observaron utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) marca TOPCON Sm-300 SEM.

3. Resultados y discusión

Los polvos cerámicos de los sistemas $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ y SnO_2 - TiO_2 - CoO se obtuvieron siguiendo los procedimientos indicados anteriormente. Una discusión más amplia sobre los fenómenos fisicoquímicos que ocurren durante el desarrollo de los métodos ya se realizó (Ortiz A. et. al. 2001, Ararat C. et. al. 2004).

3.1. Caracterización de los polvos cerámicos sintetizados

En la figura 1 se indican los difractogramas de rayos x que corresponden a muestras de los polvos cerámicos obtenidos por coprecipitación, figuras 1(a) y 1(c), y por Pechini, figuras 1(b) y 1(d), tanto de las muestras obtenidas al final del proceso respectivo como de las que fueron sometidas a tratamientos térmicos a diferentes temperaturas, durante 2 horas. Dependiendo del método de síntesis la evolución de las fases fue diferente.

El polvo obtenido del sistema binario $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$, al final del tratamiento en rotavapor durante el método de coprecipitación, presenta como fases cristalinas importantes oxihidróxidos de estaño, SnO_2 (PDF 41-1445) no muy

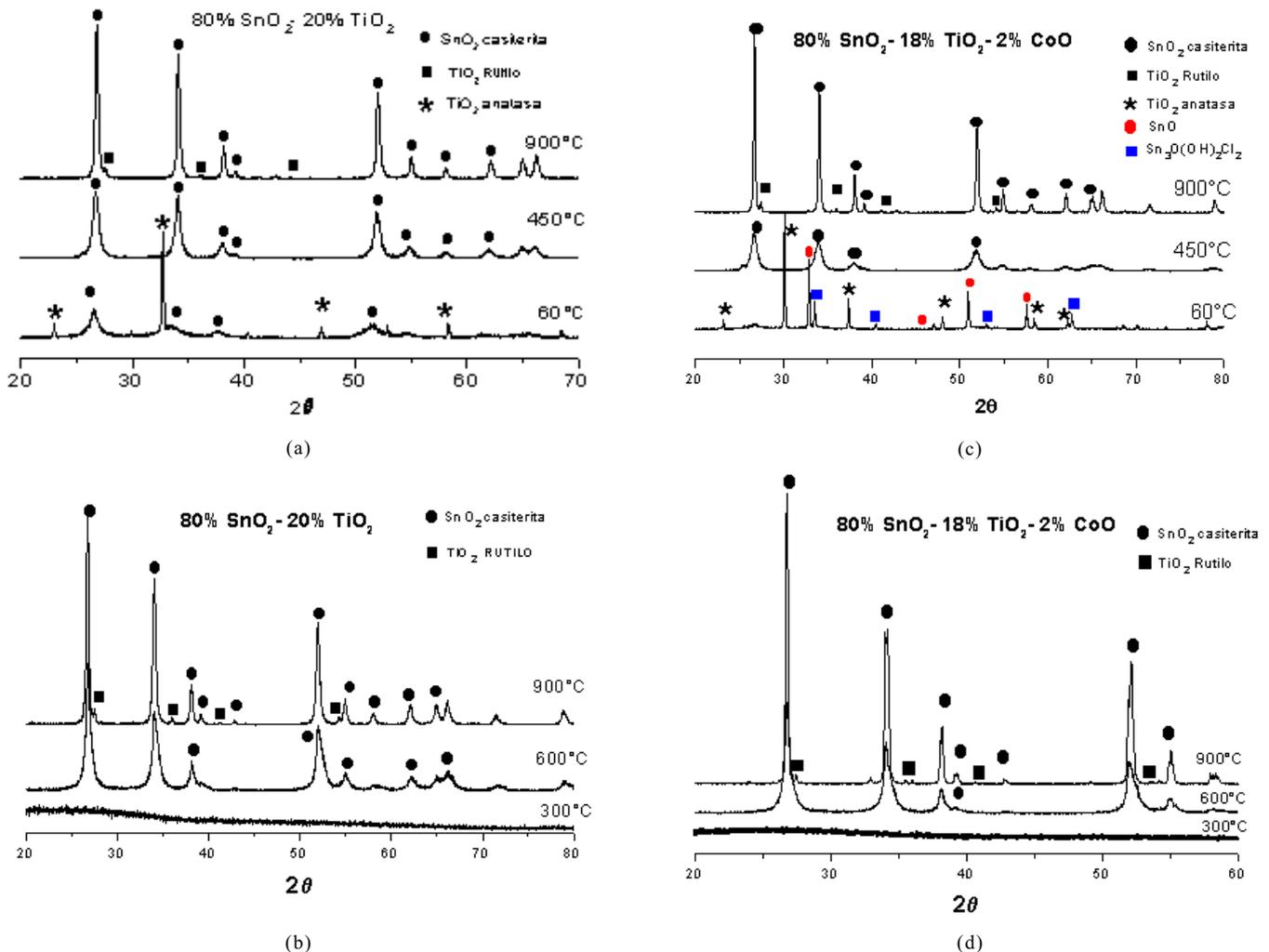


Figura 1. Difractogramas de rayos x de los polvos cerámicos sintetizados por coprecipitación, (a) y (c) y por el método Pechini, (b) y (d), tratados térmicamente a las temperaturas indicadas.

bien cristalizado y TiO_2 (PDF 75-1758). Al tratar el polvo a una temperatura de 450°C la casiterita se constituye en única fase cristalina en la muestra. En el polvo cerámico tratado a 900°C , los picos del SnO_2 son los más destacados pero también se observa la presencia de pequeños picos del TiO_2 ; esto pone en evidencia un proceso de descomposición espinoidal en la muestra. Aunque no se presenta el difractograma correspondiente al sistema binario $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ con composición 90% en moles de SnO_2 y 10% en moles de TiO_2 , en la muestra tratada a 900°C también es evidente este tipo de transformación. Este proceso puede ser debido a gradientes de composición a escala nanométrica (sistemas no uniformes a nanoescala) (DeHoff R. T. 1993). El estudio realizado por Hilliard y Philofsky (Hilliard J. E. 1970) muestra una variación del coeficiente de difusión con la distancia de separación entre los gradientes de composición, disminuyendo el coeficiente al disminuir la distancia de separación. Indudablemente en el sistema se presentarán fluctuaciones de composición a escala nanométrica, dispuestas de una manera estadística al azar, tal que al enfriar el sistema estos gradientes se incrementarían a nivel microestructural ocasionando la descomposición espinoidal (DeHoff R. T. 1993).

El polvo cerámico obtenido por el método Pechini, después de ser calcinado a 300°C , es amorfo tanto para el sistema binario como para el ternario, figuras 1(b) y 1(d). A partir de los 600°C la casiterita es la fase cristalina más importante en los dos sistemas; nuevamente es evidente la descomposición espinoidal en las muestras tratadas a 900°C .

La muestra obtenida por coprecipitación y que tiene cobalto, figura 1(c), al sacarla del rotavapor y secarla a 60°C presenta como fases cristalinas importantes oxiclورو básicos de estaño (PDF 39-0314), TiO_2 en forma de anatasa (PDF 84-1285) y SnO (PDF 06-0395). Al calentar el polvo cerámico a 450°C , el difractograma de rayos x muestra los picos del SnO_2 no muy bien cristalizado. Al tratar el sistema a 900°C de nuevo es evidente una descomposición espinoidal en la muestra.

En la figura 2 se muestran las curvas de ATD/TG correspondientes al sistema binario $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$, con composición 80: 20 de SnO_2 : TiO_2 , y al sistema ternario con composición 80: 18: 2 de SnO_2 : TiO_2 : CoO , obtenidas tanto por coprecipitación como por Pechini. Los polvos obtenidos por coprecipitación, figuras 2(a) y 2(c), presentan una pérdida continua de peso durante todo el intervalo de temperatura estudiado siendo muy pronunciado hasta los $\sim 200^\circ\text{C}$, donde se presenta una pequeña zona de peso constante hasta los 250°C , y luego la pérdida de peso es muy suave debido al desprendimiento de OH^- del sistema

a medida que avanza la cristalización del SnO_2 . En la curva de ATD correspondiente al sistema binario, figura 1(a), aparece un pico endotérmico a una temperatura de $\sim 100^\circ\text{C}$ que corresponde a desprendimiento de agua por parte del sistema. El pico exotérmico a $\sim 220^\circ\text{C}$ debe representar el re-acomodamiento de los átomos que conforman la estructura de los oxihidróxidos de estaño para favorecer la consolidación de la estructura del óxido y su cristalización. Aún a 450°C no hay una buena cristalización del SnO_2 , los picos de la casiterita son anchos tal como lo indican los difractogramas correspondientes, figuras 1(a) y (c); las muestras tratadas térmicamente a 900°C si están bien cristalizadas.

La muestra del sistema SnO_2 - TiO_2 - CoO presenta una curva de ATD, figura 2(c), muy similar al del sistema binario salvo que presenta además un pico a $\sim 320^\circ\text{C}$ que debe representar el desprendimiento del acetato que aún puede estar presente en la muestra y que proviene del precursor de cobalto. Simultáneamente a las reacciones exotérmicas de re-acomodamiento de los átomos en los oxihidróxidos de estaño y desprendimiento de acetato, se debe dar la cristalización de los óxidos de estaño, titanio y cobalto; los resultados de DRX indican que a 450°C la casiterita es la fase cristalina más importante en la muestra. Los cambios que presenta la línea de base del ATD de la figura 2(c) debe indicar variaciones en la conductividad térmica de la muestra en estudio en relación con la muestra de referencia, debido a procesos de sinterización que deben estar ocurriendo en su interior.

Para la muestra de $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ obtenida por Pechini, figura 2(b), se observa una pérdida apreciable de peso a partir de los $\sim 250^\circ\text{C}$ hasta los 600°C ; luego la muestra mantiene su peso constante. En el intervalo de temperatura mencionado se presentan las reacciones de descomposición de los compuestos de carbono del Sn y Ti, y la cristalización de los óxidos tal como lo indican los picos exotérmicos que allí aparecen.

Para el sistema ternario obtenido por el método Pechini, el comportamiento de las curvas de ATD/TG, figura 2(d), es similar al del sistema binario, figura 2(b); gran pérdida de peso entre $\sim 250^\circ\text{C}$ y 600°C donde deben ocurrir las reacciones de oxidación de los compuestos orgánicos de Sn, Ti y Co y la formación de sus óxidos. Según los datos de DRX, figura 1(d), el SnO_2 es la fase cristalina más importante en el polvo cerámico a partir de los 600°C .

3.2. Sinterización de los polvos cerámicos obtenidos

En la figura 3 se muestran las curvas de contracción y velocidad de contracción, en función de la temperatura, de muestras de SnO_2 , $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ y SnO_2 - TiO_2 - CoO obtenidas

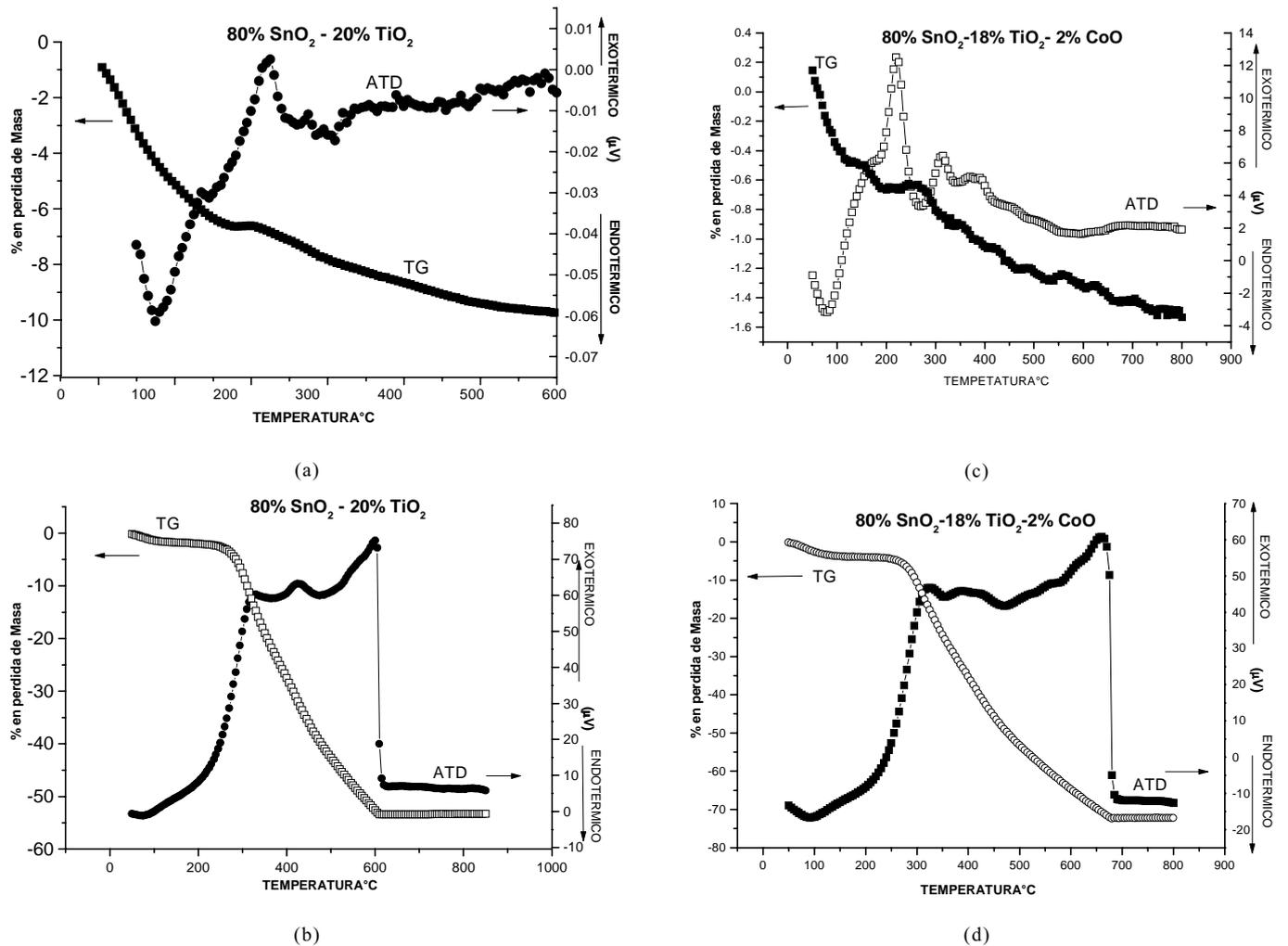


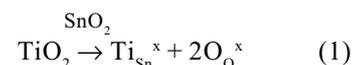
Figura 2. Curvas de ATD/TG de los polvos cerámicos sintetizados por coprecipitación, (a) y (c), y por Pechini, (b) y (d).

tanto por coprecipitación como por Pechini, prensadas uniaxialmente en un troquel cilíndrico y posteriormente vueltas a prensar de manera isostática a 210 Mpa. Como se observa en la figura 3, el SnO₂ no presenta mecanismos de densificación en el rango de temperatura considerado. La presencia de TiO₂ en el sistema favorece la contracción de las muestras, independiente del método de síntesis empleado, pero es mucho más evidente este efecto cuando está presente el CoO; en este último caso las pastillas comienzan a contraer a partir de los 800°C independiente del método de síntesis empleado.

Las curvas de contracción y velocidad de contracción, como función de la temperatura, para el sistema binario con composición 80: 20 de SnO₂ y TiO₂, muestran claramente dos regiones de contracción lineal e indican que

sólo hay un mecanismo de densificación entre 1200 y 1300°C, para los polvos obtenidos por coprecipitación, y entre 1100 y 1200°C, para los sintetizados por el método Pechini. No se observa el mecanismo de densificación a 1000°C señalado por Bueno y colaboradores (**Bueno P. R. et. al.** 2003). Esto puede deberse a que la concentración de TiO₂ en el sistema, 20%, es aún baja para que se haga evidente este mecanismo asociado al óxido de titanio.

El mecanismo de densificación que se activa a temperaturas entre 1100 y 1300°C, en el sistema binario, no se puede justificar por la creación de vacancias de oxígeno a través de la sustitución del Ti por el Sn:



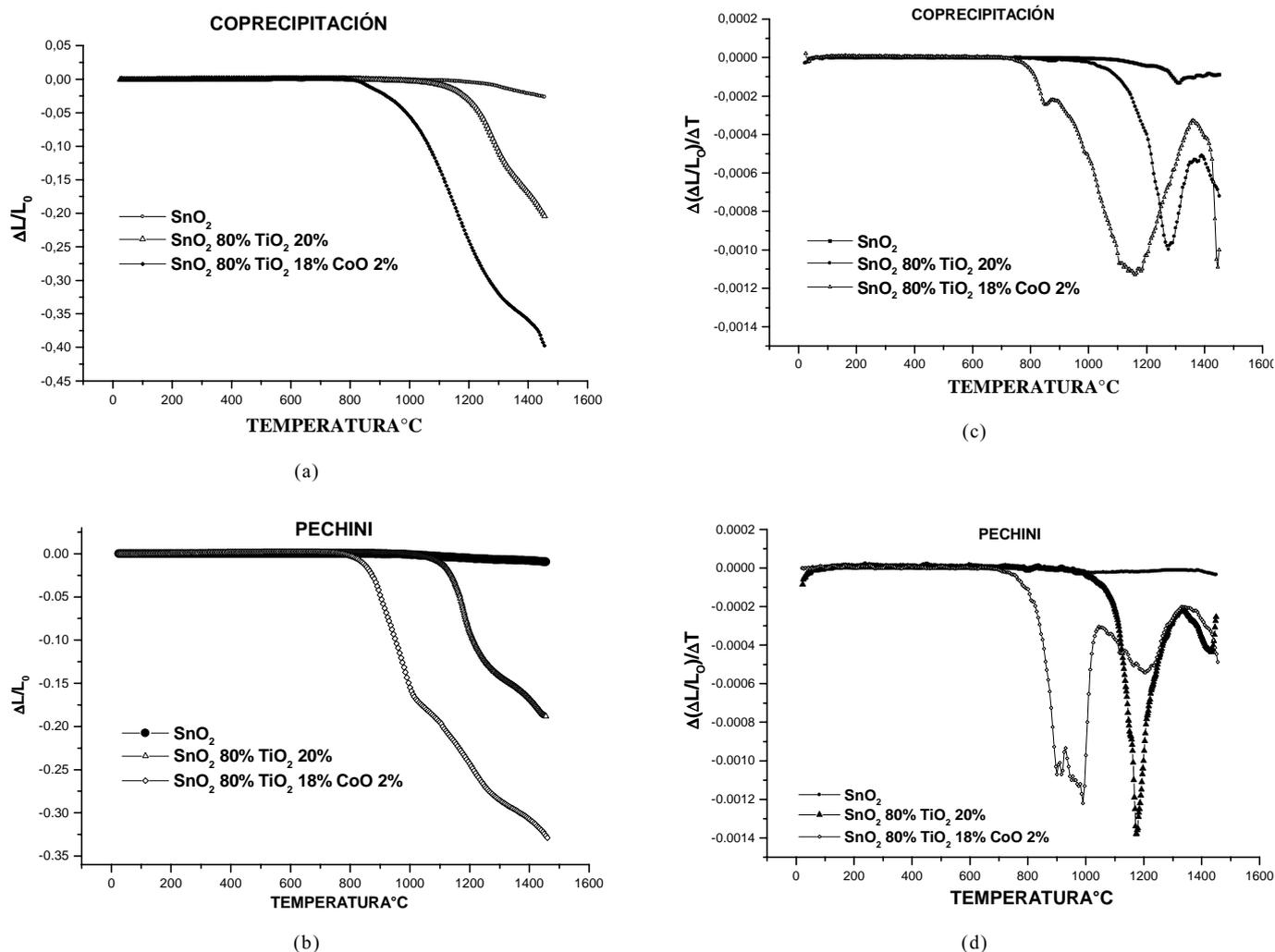
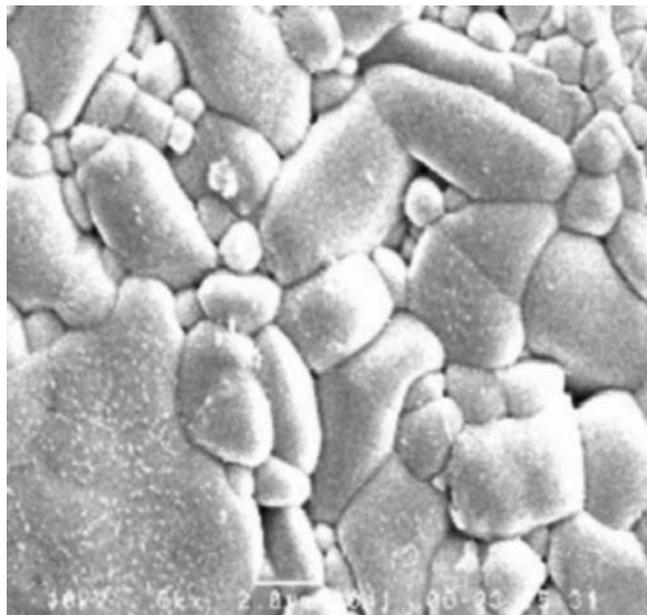


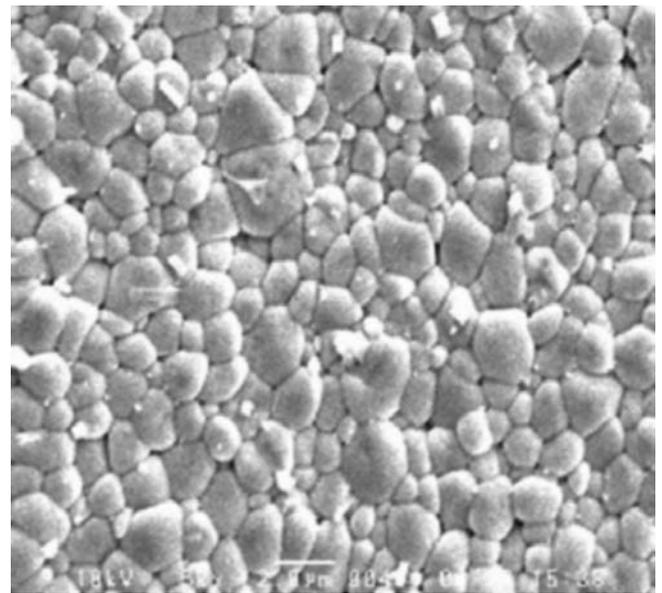
Figura 3. Curvas de contracción y velocidad de contracción, en función de la temperatura, correspondientes a muestras de polvos cerámicos sintetizados por coprecipitación, (a) y (c), y por Pechini, (b) y (d), respectivamente.

Como se indica en la literatura (**Bueno P. R. et. al. 2003**) para entender el mecanismo de transporte de masa que ocurre en el sistema $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ entre 1100 y 1300°C se debe considerar que la fugacidad del oxígeno puede dar origen a vacancias de oxígeno, como defectos intrínsecos, cuya concentración se puede incrementar a altas temperaturas; estas vacancias difundirían rápidamente por los bordes de grano favoreciendo la contracción del sistema binario. Dado que en estas muestras el SnO_2 y el TiO_2 comparten una estructura común, y por lo tanto la sub-red de oxígenos, la difusividad en el sistema $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ debe contener aportes de los mecanismos de transporte de masa más importantes que ocurren en el SnO_2 puro y el TiO_2 puro. Por otro lado, el potencial químico del sistema debe cambiar como consecuencia de la alteración de la naturaleza del enlace químico en la mezcla.

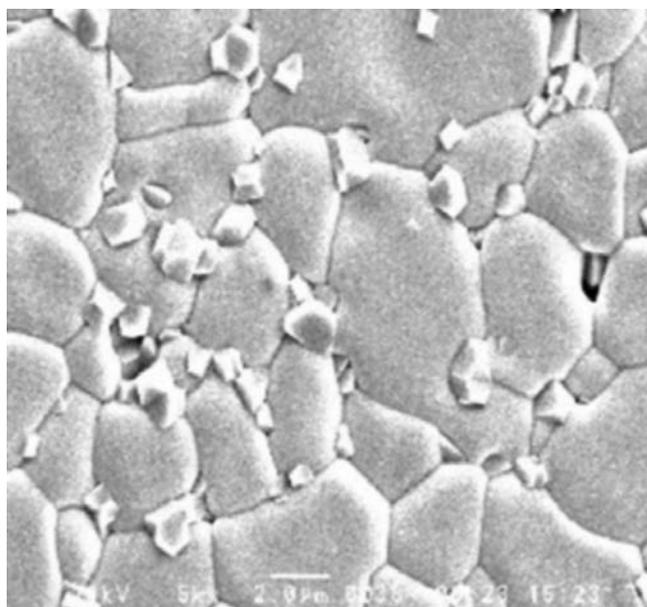
En el SnO_2 predomina el enlace covalente lo que impide la densificación del material durante su sinterización. Los mecanismos de transporte de masa que predominan en este óxido son el de difusión superficial por debajo de los 800°C y la evaporación condensación por encima de esta temperatura (**Bueno P. R. 2003**). Para el caso del TiO_2 el enlace iónico es el más importante lo que facilita la densificación sin adición de dopantes dado que el transporte de masa ocurre por difusión iónica. Es por esto que la adición del TiO_2 a la red de SnO_2 , que origina el desarrollo de una solución sólida sustitucional, debe modificar la naturaleza del enlace químico, y por lo tanto sus propiedades fisicoquímicas, así como los mecanismos de transporte de masa mencionados; lo anterior lleva a considerar la solución sólida como la fuerza conductora de la densificación (**Bueno P. R. et. al. 2003**).



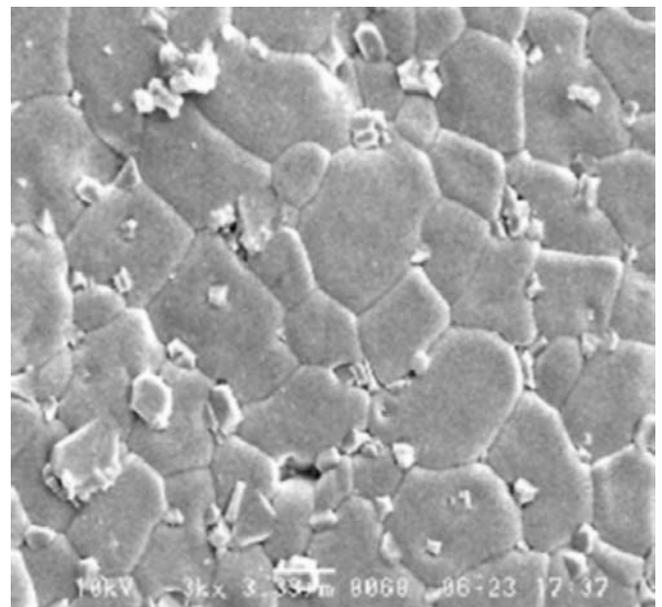
(a)



(c)



(b)



(d)

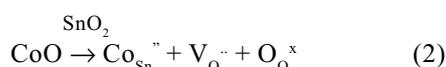
Figura 4. Fotografías obtenidas con MEB de la microestructura de muestras sinterizadas a 1350°C durante 2 horas y que fueron conformadas utilizando polvos cerámicos obtenidos por el método de coprecipitación (a) y (b) y por Pechini (c) y (d). El sistema $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ tiene una composición 80: 20 y el sistema $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2\text{-CoO}$ una composición 80: 18: 2, respectivamente.

Las curvas de contracción y velocidad de contracción, en función de la temperatura, para el sistema ternario de $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2\text{-CoO}$, figuras 3(c) y 3(d), presentan la activación de los mecanismos de densificación a: $\sim 850^\circ\text{C}$ y 1150°C , para las muestras que contienen polvos

obtenidos por coprecipitación, y entre $\sim 900^\circ\text{C}$ y 1000°C y a $\sim 1180^\circ\text{C}$, para las muestras correspondientes a polvos obtenidos por Pechini. El mecanismo de densificación que se activa entre ~ 850 y 1000°C se presenta en el sistema binario $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ y corresponde al aporte del TiO_2 al trans-

porte de masa (Bueno P. R. et. al. 2003). Este mecanismo está relacionado con la alta concentración de defectos predominantes en la estructura a $\sim 1000^\circ\text{C}$ entre los que se destacan vacancias de oxígeno doblemente ionizadas y Ti^{4+} intersticial; la difusión de estos iones intersticiales y las vacancias de titanio pueden ser los responsables de la densificación en este intervalo de temperatura.

La presencia de cobalto es muy importante para la densificación del sistema $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2\text{-CoO}$ tal como se puede observar en las curvas de contracción y velocidad de contracción de la figura 3. La presencia del cobalto favorece la activación del mecanismo de densificación entre ~ 850 y 1000°C , que se considera propio del TiO_2 puro (Bueno P. R. et. al. 2003); en el sistema binario obtenido por coprecipitación ocasiona el desplazamiento hacia bajas temperaturas, $\sim 1150^\circ\text{C}$, del mecanismo que se activa entre 1200 y 1300°C , y reduce la intensidad del mecanismo que se activa entre 1100 y 1200°C en el sistema $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ obtenido por Pechini. La explicación a estos efectos del cobalto hay que buscarla en el comportamiento del sistema $\text{SnO}_2\text{-CoO}$, en el cual se forman vacancias de oxígeno a través de la siguiente reacción (Cerri J. A. et. al. 1996):



En el sistema ternario se deben considerar los aportes al mecanismo de transporte de masa de las vacancias

que se generan por la fugacidad del oxígeno, y su rápida difusión por los bordes de grano, el incremento del flujo de masa debido a las vacancias de oxígeno que se generan a través de la reacción de la ecuación 2 y a la concentración de defectos intrínsecos que predominan en el sistema a $\sim 1000^\circ\text{C}$.

3.3. Densificación de los polvos cerámicos obtenidos

Las pastillas prensadas se sinterizaron a 1350°C durante 2 horas, a una velocidad de calentamiento de $3^\circ\text{C}/\text{min}$; se enfriaron a una velocidad de $2^\circ\text{C}/\text{min}$. Los datos de densidad de las muestras prensadas y sinterizadas, utilizando los polvos cerámicos obtenidos a través de los dos métodos de síntesis, se indican en la tabla II. Ellos muestran que la densificación se favorece con la adición de TiO_2 a la estructura de SnO_2 , y se incrementa con el aumento de la concentración de este óxido en el sistema; esto corrobora los resultados de dilatometría. Lo anterior es un resultado importante si se considera el uso del sistema $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ como sensor de gas donde no se requiere una alta densidad para los dispositivos sinterizados.

Cuando se adiciona cobalto al sistema binario $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2$, las muestras densifican mucho más, alcanzándose densificaciones de $\sim 96\%$ de la densidad teórica. Este resultado está de acuerdo con los datos obtenidos del estudio de dilatometría donde se observó una mayor contracción en muestras que contenían CoO (ver figura 3). Una mayor densidad de las muestras sinterizadas se

Tabla II. Valores de densidad de muestras prensadas y sinterizadas utilizando los polvos cerámicos obtenidos a través de los dos métodos de síntesis empleados: (a) coprecipitación y (b) Pechini.

Coprecipitación			ρ teórica (g/cm^3)	ρ isostática (g/cm^3)	% ρ	ρ sinterizada (g/cm^3)	% ρ
SnO_2	TiO_2	CoO					
100			6,95	2,741	39,94	3,324	47,83
80	20		6,678	2,78	41,63	4,087	61,2
90	10		6,406	2,604	40,65	3,76	58,77
80	15	5	6,4354	2,366	36,76	6,15	95,56
80	18	2	6,4795	2,57	39,66	6,24	96,3

(a)

Pechini			ρ teórica (g/cm^3)	ρ isostática (g/cm^3)	% ρ	ρ sinterizada (g/cm^3)	% ρ
SnO_2	TiO_2	CoO					
100			6,95	2,398	34,5	3,197	46,03
80	20		6,678	2,9643	44,389	4,64	69,6
90	10		6,406	2,4173	37,7335	3,92	61,3
80	15	5	6,4354	2,1229	32,98	6,16	95,72
80	18	2	6,4795	2,4477	37,76	6,16	95,06

(b)

puede lograr haciendo óptimo el tratamiento térmico al que es sometido el polvo cerámico sintetizado con el fin de obtener los óxidos de interés; también se le puede realizar una molienda en atricción para romper los aglomerados que se formen en el sistema. Una alta densificación de las muestras es necesaria cuando se considera el uso del sistema $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2\text{-CoO}$ como varistor.

Es evidente el tamaño de grano pequeño en las muestras conformadas y sinterizadas a partir de los polvos sintetizados por el método Pechini, figuras 4(c) y 4(d). Las fotografías de las muestras correspondientes al sistema binario $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ ilustran las zonas de las mismas que presentan una mayor densificación. Mientras la microestructura de la figura 4(a) muestra heterogeneidad en el tamaño de grano, con crecimiento anormal de grano, la figura 4(c) indica un tamaño de grano más homogéneo (menor de 2 μm) en la muestra obtenida por Pechini.

Para el sistema ternario $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2\text{-CoO}$, las figuras 4(b) y 4(d), los granos crecen más que los del sistema binario y la porosidad disminuye bastante, lo que justifica los altos valores de porcentaje de densificación que presentan las muestras sinterizadas de esta sistema como se puede observar en la tabla II. También es evidente en esta muestras la presencia de precipitados que pueden estar constituidos por compuestos de estaño – cobalto del tipo CoSnO_3 o Co_2SnO_4 como se señala en la literatura (**J. Fayat & M.S. Castro**, 2003). El tamaño de grano de las muestras obtenidas utilizando los polvos cerámicos sintetizados por coprecipitación, $> 10 \mu\text{m}$, es mayor que el correspondiente a la muestra conformada con los polvos sintetizados por Pechini, $< 10 \mu\text{m}$.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones que se pueden extraer del trabajo realizado son:

1. Los métodos químicos utilizados, coprecipitación y método Pechini, permiten obtener polvos cerámicos de tamaño nanométrico de los sistemas $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ y $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2\text{-CoO}$. El control sobre los mecanismos de formación de las partículas permite obtener polvos cerámicos con características pre-determinadas, en tamaño y forma de partícula, y garantiza la reproducibilidad de los métodos de síntesis.
2. Con base en el análisis térmico realizado a los polvos cerámicos sintetizados, y los resultados de DRX, se puede concluir que a partir de los 450°C , para el método de coprecipitación, y los 600°C , para el método Pechini, la única fase presente en las muestras es SnO_2 .

Por lo tanto, con base en estos datos, los trabajos futuros deberán abordar el tema de la determinación de las condiciones adecuadas para el tratamiento térmico, en temperatura y duración, para garantizar la completa conformación de los óxidos en los sistemas binarios, y terciarios, reduciendo la posibilidad de formación de agregados de nanopartículas difíciles de romper.

3. Independiente del método de síntesis, y para las composiciones estudiadas, las muestras tratadas a 900°C durante 2 horas, presentan descomposición espinoidal. Habría que realizar un estudio más cuidadoso para determinar cual es el efecto del proceso de síntesis utilizado sobre las características de la solución sólida que se forma en los sistemas binarios, $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$, y ternario, $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2\text{-CoO}$, y el diagrama de fases de los mismos.
4. La presencia del TiO_2 en los sistemas estudiados ayuda a la densificación del SnO_2 en un grado no tan alto como cuando está presente el CoO en el polvo cerámico. Considerando el uso de los sistemas $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$ como sensores de gas este resultado es importante debido a que estos dispositivos no requieren presentar alta densificación. Por otro lado, está en desarrollo un estudio sobre el comportamiento varistor del sistema $\text{SnO}_2\text{-TiO}_2\text{-CoO}$, que sí requiere de alta densificación,

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al proyecto PROALERTA VIII.13 de la Red CyTED VIII.F de Materiales Electrocerámicos, por la ayuda económica brindada al Sr. C. Ararat para que pudiera realizar su pasantía en el LIEC – Araraquara/Brasil, al proyecto PROSUL-CNPq/Brasil por el aporte en suministros y reactivos para poder realizar la parte experimental y al convenio CIAM por facilitar el desplazamiento de los investigadores.

Bibliografía

- Ahn J. P., Park J. K., Huh M. Y.** 1997, Effect of green density on the subsequent densification and grain growth of ultrafine SnO_2 powder during isochronal sintering, *J. Am. Ceram. Soc.*, **80**: 2165-2167.
- Ararat C., Varela J. A., Rodríguez-Páez J. E.** 2004, Uso de métodos químicos para obtener polvos cerámicos del sistema $(\text{Sn,Ti})\text{O}_2$, *Bol. Soc. Española Ceram. y Vidrio* (aceptado para publicación).
- Brito G. E. S., Pulcinelli S. H., Santilli C. V.** 1996, Anisotropy of crystallite growth during sintering of SnO_2 xerogel, *J. Mater.Sci.*, **31**: 4087-4092.

- Bueno P. R., Pianaro S. A., Pereira E. C., Bulhoes L. O. S., Longo E., Varela J. A.** 1998, Investigation of the electrical properties of SnO₂ varistor system using impedance spectroscopy, *J. Appl. Phys.*, **84**: 3700-3705.
- Bueno P. R., Cassia-Santos M. R., Leite E. R., Longo E., Bisquert J., Garcia-Belmonte G., Fabregat-Santiago F.** 2000, Nature of Schottky-type barrier of highly dense SnO₂ systems displaying non-ohmic behaviour, *J. Appl. Phys.*, **88**: 6545-6548.
- Bueno P. R., Cassia-Santos M. R., Simoes L. G. P., Gomes J. W., Longo E., Varela J. A.** 2002, Low-voltage varistor based on (Sn, Ti)O₂ ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, **85** (1): 282-284.
- Bueno P. R., Leite E. R., Bulhoes L. O. S., Longo E., Paiva-Santos C. O.** 2003, Sintering and mass transport features of (Sn, Ti)O₂ polycrystalline ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **23**: 887-896.
- Cassia-Santos M. R.** 2003, Propiedades microestructurales y eléctricas del sistema (Sn_{1-x}Ti_x)O₂, trabajo de Doctorado Universidad Federal de San Carlos, San Carlos – SP, (en Portugués).
- Castro M. S., Aldao C. M.** 1998, Characterization of SnO₂-varistors with different additives, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **18**: 2233-2239.
- Cerri J. A., Leite E. R., Gouvea D., Longo E.** 1996, Effect of cobalt (II) oxide and manganese (IV) oxide on sintering of tin (IV) oxide, *J. Am. Ceram. Soc.*, **79**: 799 – 804.
- Chopra K. L., Major S., Pandya P. K.** 1983, Transparent conductors – A status review, *Thin Solids Films*, **102**: 1-10.
- Chung W. Y., Lee D. D., Sohn B. K.** 1992, Effects of added TiO₂ on the characteristics of SnO₂ – based thick film gas sensors, *Thin Solid Films*, **221**: 304-310.
- DeHoff R. T.** 1993, *Thermodynamics in materials science*, McGraw Hill Inc., New York.
- Duhn J. G., Jou J. W., Chiou B. S.** 1989, Catalytic and gas characteristic in Pd-doped SnO₂, *J. Electrochem. Soc.*, **136**: 2740-2746.
- Fagan J. G., Amarakon V. R. W.** 1993, Reliability and reproducibility of ceramic sensors – III, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **72**: 119-129.
- Fayat J., Castro M.S.,** 2003, Defect profile and microstructural development in SnO₂ – based varistors, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **23**: 1585 – 1591.
- Finklea H. O.** 1988, *Semiconductor electrodes*, Elsevier, Amstendar.
- Flevaris N. K.** 1987, Spinoidal decomposition in tetragonal system: SnO₂-TiO₂, *J. Am. Ceram. Soc.*, **70**: 301-304.
- Giuntini J. C., Granier W., Zanchetta J. V., Taha A.** 1990, Sol-gel preparation and transport properties of a tin oxide, *J. Mat. Sci. Lett.*, **9**: 1383-1388.
- Gopel W., Shierbaum K. D.** 1995, Current status and future prospects, *Sens. Actuators B*, **26-27**: 1-12.
- Herring C.** 1950, Effect of change of scale on sintering phenomena, *J. Appl. Phys.*, **21** (4): 301-330.
- Hillird J. E.** 1970, Spinodal decomposition, en *Phase transformations*, H. I. Aaronson (Editor), ASM, Materials Park, Ohio, pp 497.
- Jarzebski J. M., Marton J. P.** 1976, Physical properties of SnO₂ materials-II. Electrical properties, *J. Electrochem. Soc.*, **129**: 299C-310C.
- Kimura T., Inada S., Yamaguchi T.** 1989, Microstructure development in SnO₂ with and without additives, *J. Mater. Sci.*, **24**: 220-226.
- Leite E. R., Nascimento A. M., Bueno P. R., Longo E., Varela J. A.** 1999, The influence of sintering process and atmosphere on the non-ohmic properties of SnO₂-based varistor, *J. Mat. Sci. Mater. Electron.*, **10**: 321-327.
- Leite E. R., Gomes J. W., Oliveira M. M., Lee E. J. H., Longo E., Varela J. A. J. A., Paskocimas C. A., Boschi T. M., Lanciotti F., Pizani P. S., Soares P. C.** 2002, Synthesis of SnO₂ nanoribbons by a carbothermal reduction process, *J. nanosci. Nanotechn.*, **2** (2): 125-128.
- Ortiz A., Mendoza M., Rodríguez-Páez J. E.** 2001, Naturaleza y formación de los complejos intermedios del sistema SnCl₂-NH₄OH-H₂O, *Mater. Res.*, **4** (4): 265-272.
- Olivi P., Souza E. C. P., Longo E., Varela J. A., Bulhoes L.O.S.** 1993, Preparation and characterization of a dip-coated SnO₂ film for transparent electrodes for transmissive electrochromic devices, *J. Electrochem. Soc.*, **140**: L81.
- Park M., Mitchell T. E., Heuer A. H.** 1975, Subsolidus equilibria in the TiO₂-SnO₂ system, *J. Am. Ceram. Soc.*, **58**: 43-47.
- Pianaro S. A., Bueno P. R., Longo E., Varela J. A.** 1995, A new SnO₂-based varistor system, *J. Mat. Sci. Lett.*, **14**: 692-694.
- Redecka M., Zakrzewska K., Rekas M.** 1998, SnO₂-TiO₂ solid solutions for gas sensors, *Sens. Actuators B*, **47**: 194-204.
- Redecka M., Pasierb P., Zakrzewska K., Rekas M.** 1999, Transport properties of (Sn,Ti)O₂ polycrystalline ceramics and thin films, *Solid State Ionics*, **119**: 43-48.
- Santilli.- C. V., Pulcinelli S. H., Craievich A. F.** 1995, Porosity evolution in SnO₂ xerogel during sintering under isothermal condition, *Phys. Rev. B*, **51**: 8801-8809.
- Sze S. M.** 1994, *Semiconductor sensors*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Varela J. A., Whittermore O. J., Ball M. J.** 1987, Structural evolution during the sintering of SnO₂ and SnO₂-2 mole % CuO, en *Sintering'85*, G. C. Kuczynski, D. P. Uskokovic, H. Palmour III, M. M. Ristic (Editores), Plenum Press, New York, pp. 259-268.
- Wang Y. J., Wang J. F., Chen H. C., Zhong W. L., Zhang P. L., Dong H., Zhao L. Y.** 2000, Electrical properties of SnO₂-ZnO-Nb₂O₅ varistor system, *J. Phys. D: appl. Phys.*, **33**: 96-99.
- Yamamoto T., Shimizu H.** 1982, Some considerations on stability of electrical resistance of the TiO₂/SnO₂ ceramic moisture sensor, *IEEE Trans. Components, Hybrids&Manuf. Techn.*, **CHMT-5** (2): 238-241.
- Yan M. F., Rhodes W. W.** 1982, Preparation and properties of TiO₂ varistors, *Appl. Phys. Lett.*, **40** (6): 536-537.

Recibido el 14 de mayo de 2004

Aprobado para su publicación el 16 de noviembre de 2004

EFECTO DE LA POSICIÓN DEL ÁCIDO ASPÁRTICO EN LA SOLUBILIDAD Y EN LA ADSORCIÓN SOBRE HIDRÓXIDO DE ALUMINIO DE UNA SERIE DE PÉPTIDOS ANÁLOGOS

por

Mary Trujillo^{1,2}, Luis A. Oviedo², Fanny Guzmán¹ & Julio C. Calvo^{3*}

Resumen

Trujillo, M., L. A., Oviedo, F. Guzmán & J. C. Calvo. Efecto de la posición del ácido aspártico en la solubilidad y en la adsorción sobre hidróxido de aluminio de una serie de péptidos análogos. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **29**(111): 283-288. 2005. ISSN 0370-3908.

Con el fin de analizar el fenómeno de la adsorción física de un péptido sobre hidróxido de aluminio, se sintetizaron dos series de análogos de una secuencia de 20 aminoácidos proveniente del fragmento de 42 kD de la proteína MSP-1 de *Plasmodium falciparum*, sustituyendo cada una de las posiciones por ácido aspártico o por lisina. Los resultados de estas modificaciones no mostraron una tendencia regular en la solubilidad o en la adsorción de los análogos. En la serie de ácido aspártico, el péptido de mayor adsorción es el correspondiente a la sustitución de la posición 6 y el de menor a la posición 5; sin embargo, no se observaron diferencias estructurales significativas entre estos dos análogos. La disminución de la adsorción de los análogos de la serie de lisina respecto a la secuencia original, indica que este fenómeno es dirigido principalmente por efectos electrostáticos.

Palabras claves: Adsorción, Hidróxido de aluminio, Solubilidad, Péptidos análogos, Ácido Aspártico.

Abstract

Two analogue series of a peptide sequence from the 42 kD fragment of *Plasmodium falciparum* MSP-1 protein were synthesized by systematically replacing each one of the positions by aspartic acid or lysine to study the physical adsorption phenomenon. Such modifications showed a non-regular tendency regarding solubility and adsorption data. The aspartic acid best adsorption data was obtained by substituting aspartic acid in position 6, and the worst in position 5; however, no significant structural differences were found between these analogue peptides. Decreasing adsorption values in the lysine analogue series, indicate that adsorption into aluminium hydroxide is predominantly guided by electrostatic effects.

Key words: Adsorption, Aluminium hydroxide, Solubility, Peptide analogues, Aspartic acid.

¹ Fundación Instituto de Inmunología de Colombia, FIDIC, Bogotá, D.C., Colombia.

² Dpto. Química, Fac. Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia.

^{3*} Grupo Proteoma, Lab. Biología-Química, Fac. Ciencias y Educación, Universidad Distrital Fco. José de Caldas, Cra. 4 No. 26-B-54, Bogotá, D.C., Colombia. A quien se debe dirigir la correspondencia: E-mail: deimary@yahoo.com / jccalvom@udistrital.edu.co

Introducción

Los adyuvantes que contienen aluminio, fosfato e hidróxido, son usados desde 1926 como adyuvantes en vacunas, demostrando ampliamente su seguridad; sin embargo, el mecanismo de su actividad inmunoestimuladora ha sido poco estudiado. Actualmente, son los únicos aprobados para formulaciones de uso humano y se considera que su actividad está relacionada con el grado de adsorción del antígeno. En las últimas décadas el grupo de Hem ha desarrollado un excelente trabajo sobre la estructura y las condiciones para la adsorción de proteínas sobre estos adyuvantes (Serna, 1977; Hem, 1984; Shirodkar, 1990; Callahan, 1991; Seeber, 1991-a,b; Al-Shakhshir, 1994, 1995-a,b), señalaron que el hidróxido de aluminio usado en las vacunas es un oxihidróxido de aluminio cristalino conocido como boemita, y el fosfato de aluminio un hidroxifosfato de aluminio amorfo (Rinella, 1995). Las propiedades de estos geles (tales como área superficial, carga superficial, composición química y estructura química) dependen en gran medida de los procesos de producción (Hem, 1995; Serna, 1978). Además, plantearon que las atracciones electrostáticas e hidrofóbicas y el intercambio de ligando representaban los principales mecanismos responsables de la adsorción de antígenos en los adyuvantes que contienen aluminio (Al-Shakhshir, 1995 a,b; Rinella, 1995).

Se ha planteado que conociendo el pI y el pH del antígeno y del adyuvante, se podría predecir el grado de adsorción que tiene lugar cuando se preparan vacunas (Serna, 1977; Seeber, 1991 b); sin embargo, el uso de estos valores puede no ser tan eficaz al predecir las propiedades físicas de una vacuna completa (Matheis, 2002), pues muchos factores pueden influir en el proceso fisicoquímico de adsorción del antígeno en la producción de vacunas adsorbidas. Por ello, ha surgido la necesidad de desarrollar nuevos diseños con el fin de introducir vacunas combinadas; sin embargo, existen vacíos sobre los mecanismos de muchas de las interacciones inmunológicas entre los componentes de estas vacunas. La óptima formulación de vacunas multivalentes puede requerir más de un tipo de adyuvante de aluminio, (Serna, 1977; Chang, 1997) y deben ser preparadas combinando los componentes adsorbidos individualmente, de tal forma que se obtenga una suspensión de la mezcla de adyuvantes (Matheis, 2002). Este procedimiento genera, sin embargo, interrogantes sobre el potencial de distribución de los antígenos y la adsorción de aniones fosfato, así como también sobre la estabilidad del producto.

En este trabajo se sintetizaron dos series de péptidos análogos a partir de la secuencia de un péptido ya registrado, de secuencia EVLYLKPLAGVYRSLKKQLE, del fragmento de 42 kD de la proteína MSP-1 (Espejo, 2001; Blackman, 1992). Las series se generaron al reemplazar sistemáticamente

cada uno de los aminoácidos de la secuencia objeto por ácido aspártico (Asp, D) o por lisina (Lys, K). La solubilidad y la adsorción sobre hidróxido de aluminio fueron analizadas para cada uno de los péptidos análogos obtenidos en ambas series, y no se encontró correlación entre ellas. La serie de análogos de Asp mostró un considerable incremento en la adsorción, en especial los péptidos donde la Lys en la posición 6 (análogo Asp-6) y la arginina de la posición 13 (análogo Asp-13) fueron reemplazados por ácido aspártico. La solubilidad del análogo Asp-5, en donde se reemplazó la Leu de la posición 5, fue mayor que la del análogo Asp-6; sin embargo, el análogo Asp-6 mostró los mejores resultados en el ensayo de adsorción, mientras que al análogo Asp-5 no mostró una apreciable adsorción en las mismas condiciones del ensayo. El análisis estructural por dicroísmo circular (CD) no reveló diferencias estructurales significativas entre estos dos análogos. Estos resultados sugieren que la carga electrostática local es la responsable de este comportamiento.

Materiales y métodos

Síntesis de las series de péptidos análogos. Con base en la secuencia del péptido 1585, EVLYLKPLAGVYRSLKKQLE, del fragmento de 42 kD de la proteína MSP-1 de malaria, se diseñaron dos series de péptidos reemplazando cada una de las posiciones en la secuencia original por Asp (D) en un caso y por Lys (K) en otro caso. La **Tabla 1** muestra las dos series de péptidos análogos obtenidas. El péptido 1585 y los correspondientes análogos de las serie de Asp y de Lys fueron sintetizados usando la metodología de síntesis de péptidos en fase sólida por la estrategia t-Boc (Merrifield, 1963; Houghten, 1985). Los péptidos crudos obtenidos fueron purificados por cromatografía líquida de alta eficiencia en fase reversa (RP-HPLC) usando una columna semipreparativa Vydac 218TP1022. La pureza de los péptidos fue verificada por RP-HPLC en una columna analítica Lichrosorb C18 (MERCK) usando un gradiente de 0%-70% B durante 30 minutos. El solvente A era 0.05% TFA en agua y el solvente B era 0.05% TFA en acetonitrilo. La masa molecular de los productos fue determinada en un espectrómetro de masas Bruker Protein MALDI-TOF.

Ensayo de solubilidad. La solubilidad de los péptidos análogos fue determinada por saturación de 1 mL de solución salina al 0.9% a 25°C y pH 7.0±0.1. El péptido disuelto fue medido en un espectrofotómetro Multicelda Labsystem Spectrofotometer usando ácido bicinónico (Pierce) para análisis de proteínas (Smith, 1985; Wiechelman, 1988; Brown, 1989) siguiendo el protocolo estándar y construyendo curvas de calibración para cada uno de los péptidos análogos.

Adsorción. El tiempo de equilibrio para la adsorción del péptido 1585 sobre hidróxido de aluminio fue determinado

Tabla 1. Péptidos análogos sintetizados del péptido 1585 por la substitución sistemática con ácido aspártico (Asp, D) o con lisina (Lys, K) de cada uno de los aminoácidos de la secuencia original.

PEPTIDO	SECUENCIA
1585	EVLYLKPLAGVYRSLKKQLE
Asp-1	D VLYLKPLAGVYRSLKKQLE
Asp-2	EDLYLKPLAGVYRSLKKQLE
Asp-3	EV D LYLKPLAGVYRSLKKQLE
Asp-4	EVLY D LKPLAGVYRSLKKQLE
Asp-5	EVLYL D KPLAGVYRSLKKQLE
Asp-6	EVLYLKD D PLAGVYRSLKKQLE
Asp-7	EVLYLK D LAGVYRSLKKQLE
Asp-8	EVLYLK P DAGVYRSLKKQLE
Asp-9	EVLYLK P L D GVYRSLKKQLE
Asp-10	EVLYLK P L A DVYRSLKKQLE
Asp-11	EVLYLK P L A G D YRSLKKQLE
Asp-12	EVLYLK P L A G V D R SLKKQLE
Asp-13	EVLYLK P L A G V D S L KKQLE
Asp-14	EVLYLK P L A G V R D L K KQLE
Asp-15	EVLYLK P L A G V R S D K K QLE
Asp-16	EVLYLK P L A G V R S L D K K QLE
Asp-17	EVLYLK P L A G V R S L K D QLE
Asp-18	EVLYLK P L A G V R S L K D L E
Asp-19	EVLYLK P L A G V R S L K K D E
Asp-20	EVLYLK P L A G V R S L K K D L
Lys-1	K VLYLKPLAGVYRSLKKQLE
Lys-2	E K LKPLAGVYRSLKKQLE
Lys-3	EV K YLKPLAGVYRSLKKQLE
Lys-4	EVL K LKPLAGVYRSLKKQLE
Lys-5	EVLY K KPLAGVYRSLKKQLE
Lys-6	EVLYL K PLAGVYRSLKKQLE
Lys-7	EVLYL K KLAGVYRSLKKQLE
Lys-8	EVLYL K P K AGVYRSLKKQLE
Lys-9	EVLYL K P L K GVYRSLKKQLE
Lys-10	EVLYL K P L A K VYRSLKKQLE
Lys-11	EVLYL K P L A G K YRSLKKQLE
Lys-12	EVLYL K P L A G V K RSLKKQLE
Lys-13	EVLYL K P L A G V K S L KKQLE
Lys-14	EVLYL K P L A G V R K LKKQLE
Lys-15	EVLYL K P L A G V R S K KKQLE
Lys-16	EVLYL K P L A G V R S L K KQLE
Lys-17	EVLYL K P L A G V R S L K KQLE
Lys-18	EVLYL K P L A G V R S L K K L E
Lys-19	EVLYL K P L A G V R S L K K Q K E
Lys-20	EVLYL K P L A G V R S L K K Q L K

con 12 muestras de concentración 4 mg de péptido por mL de solución de NaCl al 0.9% y pH 7.0±0.1. La suspensión acuosa de hidróxido de aluminio (ALHYDROGEL) se añadió a cada una de las muestras de péptido en cantidad equivalente a 1.6 mg Al/mL (W.H.O., 1976), a una temperatura constante de 273 K. Las mezclas obtenidas se agitaron suavemente a 150 rpm durante el período de tiempo que duró el experimento. Inicialmente se tomaron muestras cada 10 min, durante la primera hora del ensayo y, posteriormente, cada hora hasta completar 6 horas, para evaluar la adsorción con respecto al tiempo. Las muestras fueron centrifugadas a 8,000 rpm y filtradas a través de una membrana de 0.22 µm para determinar la concentración del péptido antes y después del proceso de adsorción, usando ácido bicinónico (BCA),

tal como se describió en el ensayo de solubilidad. La cantidad adsorbida se determinó en mmol/mg de Aluminio, por la diferencia entre las concentraciones del péptido antes y después del proceso de adsorción.

El ensayo de adsorción para las dos series se llevó a cabo a las condiciones descritas, agitando las mezclas a 273 K por 30 min en un agitador helicoidal. Las isotermas de adsorción fueron graficadas a concentraciones de péptido en un rango entre 0.0 y 3.2 mmol/mL en NaCl al 0.9%, 273 K y pH 7.0±0.1. Cada muestra contenía una cantidad de adsorbente equivalente a 1.6 mg Al/mL. Cantidades conocidas de péptido análogo y de hidróxido de aluminio fueron mezcladas y agitadas por 30 min. Luego de centrifugadas, se determinó la concentración de proteína en el sobrenadante siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. La cantidad de péptido adsorbido se determinó por la diferencia en concentración en la solución antes y después del proceso de adsorción. La cantidad de péptido adsorbido por unidad de área superficial de adsorbente se ubicó gráficamente contra la concentración de péptido en solución después del paso de adsorción.

Dicroísmo circular (DC). Para el ensayo se tomaron volúmenes de 500 µL de muestra de péptido a una concentración de 0.1 mM en una mezcla de TFE-H₂O (3: 7). Los espectros fueron tomados en un espectropolarímetro JASCO J720, entre 190 y 260 nm.

Resultados y discusión

Análisis de los Péptidos. El análisis de los péptidos, después de la purificación, mostró un solo pico por RP-HPLC analítico, indicando una buena pureza, tal como se ilustra para los péptidos análogos Asp-5 y Asp-6 (**Figura 1A** y **1B**). La masa molecular observada en el espectrómetro de masas MALDI-TOF esta en concordancia con los valores teóricos esperados. Los valores obtenidos (PM calculado; PM experimental) para los análogos Asp-5 (2,349.9; 2,354.1) y Asp-6 (2,334.9; 2,335.7) se muestran en la **Figura 1 (Figura 1C y 1D)**.

Los espectros de dicroísmo circular (DC) presentaron dos mínimos en 209 y 222 nm para todos los péptidos análogos de las dos series analizadas indicando la existencia de una estructura con tendencia helicoidal. En los análogos de las dos series estudiadas no se observó diferencia estructural significativa. Es interesante observar que los análogos Asp-5 y Asp-6, que presentaron comportamientos opuestos en adsorción, muestran la misma tendencia estructural hallada para el conjunto de análogos (**Figura 1E**).

Ensayo de solubilidad. El análisis global de los resultados de los péptidos de la serie de ácido aspártico (Asp-1, Asp-2, etc.) muestra que la substitución produce una disminución

en la solubilidad con respecto a la del péptido 1585 tomado como referencia (**Figura 2A**), y que los aminoácidos de la secuencia original en las posiciones 6, 9, 16 y 17 son críticos para este proceso. Sin embargo, no se pudo hallar correlación alguna entre la carga, el tamaño o la polaridad del aminoácido sustituido y la tendencia decreciente en la solubilidad.

Los péptidos análogos de la serie de lisina (Figura 2B) presentaron un comportamiento poco esperado, pues se suponía que la sustitución de un aminoácido hidrofóbico como Val (análogos Lys-2 y Lys-11) o Leu (análogos Lys-3, -5, -8, -15 y -19) por un aminoácido cargado positivamente como Lys, incrementaría de una manera apreciable su solubilidad. Este efecto solo se cumplió para la valina, pero no para la leucina.

Es interesante destacar que no siempre la sustitución de un aminoácido hidrofóbico como leucina o valina por

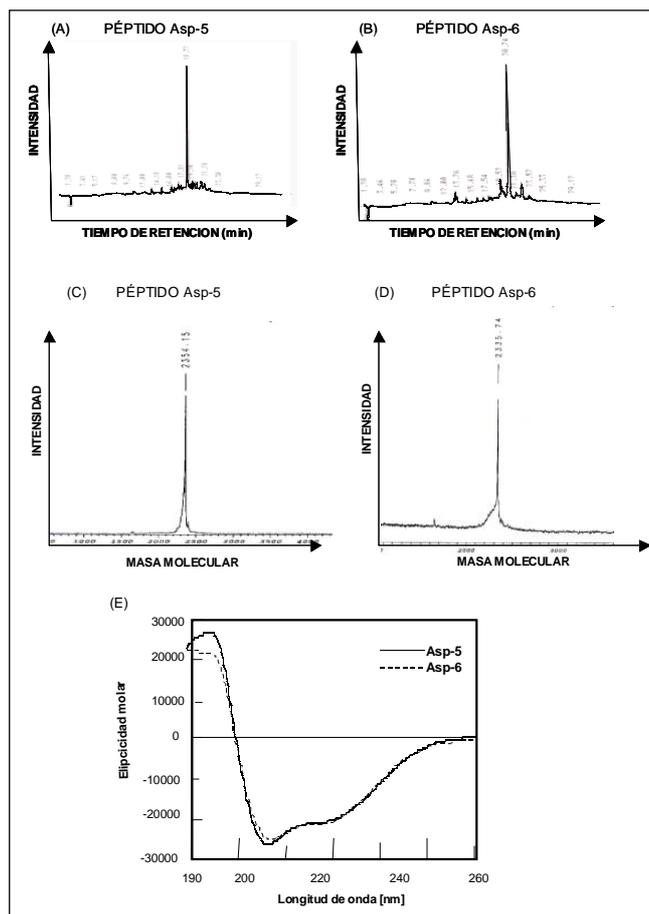


Figura 1. Caracterización de los péptidos análogos Asp-5 y Asp-6: RP-HPLC analítica de los análogos (1-A y 1-B), en una columna Lichrosorb RP-18 usando un gradiente de 0-70% ACN en 30 min; espectros de masas (1-C y 1-D) tomados en un espectrómetro Bruker Protein MALDI-TOF; espectros de dicroísmo circular (1-E), tomados en un espectropolarímetro JASCO J720.

uno hidrofílico como lo es la lisina, produce un incremento en la solubilidad del péptido, ya que en cada caso, es necesario tener en cuenta la masa molecular, la posición del sustituyente y las interacciones entre las cargas de grupos vecinos, donde pueden ocurrir atracciones o repulsiones que inducen efectos en la estructura y en las interacciones intermoleculares. En estas condiciones la falta de tendencia en la solubilidad está relacionada con la naturaleza del microambiente generado en cada sustitución que es característico y es específico y que provoca modificaciones en el comportamiento fisicoquímico del péptido frente al medio de disolución.

Es bien conocido el caso en el cual tres o cuatro moléculas con características estructurales helicoidales se agrupan por la interacción de residuos de leucina y valina, en las posiciones i , $i+3$. En nuestro caso particular, pareciera que las leucinas en las posiciones 3 y 5 estuvieran interactuando para formar y estabilizar grupos poliméricos, los cuales se romperían cuando substituyen dichas leucinas por residuos cargados tales como ácido aspártico y lisina. El comportamiento de los otros péptidos análogos, en donde se substituye valina y leucina en otras posiciones, se explicaría analizando el microambiente generado, tal como se enunció anteriormente.

Ensayo de adsorción. Para determinar el tiempo de equilibrio del proceso de adsorción del péptido 1585 de referencia (EVLYLKPLAGVYRSLKKQLE), se cuantificó la adsorción en función del tiempo (**Figura 3**); de los

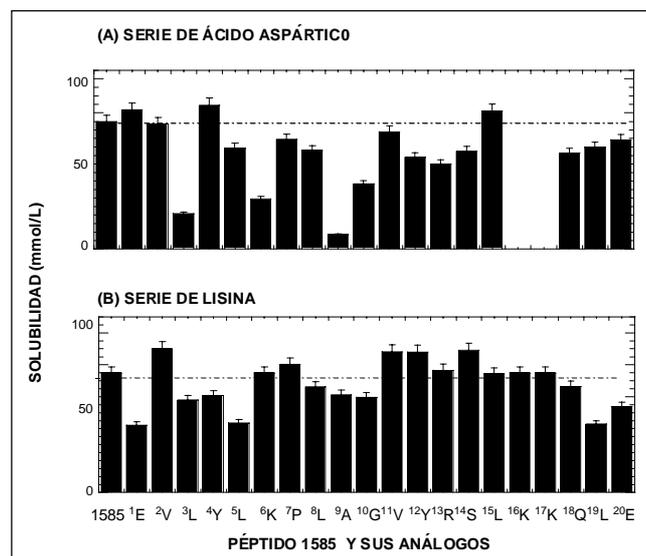


Figura 2. Ensayo de solubilidad de las dos series de análogos en 0.9% NaCl a $\text{pH } 7 \pm 0.1$ y 298 K. En la parte inferior (eje de abscisas) aparece el aminoácido que ha sido reemplazado por Lys (K) o Asp (D) y su posición en la secuencia de original, para cada uno de los péptidos análogos.

valores obtenidos se deduce que el proceso de adsorción fue rápido y alcanzó un valor máximo de concentración de 0.28 mmol/mg aluminio a los 30 min. Este tiempo fue tomado como estándar para los experimentos de adsorción del resto de los péptidos estudiados en las dos series.

Los resultados de la adsorción de los péptidos análogos de la serie de ácido aspártico, sobre hidróxido de aluminio, muestran que la sustitución de la lisina en la posición seis (análogo Asp-6) produce un incremento notable en el valor de su adsorción (**Figura 4A**); el mismo comportamiento, aunque en menor proporción, se observó cuando se sustituyó la arginina en la posición 13 (análogo Asp-13). No fue posible determinar la adsorción de los péptidos análogos donde se reemplazó la lisina en las posiciones 16 y 17 por ácido aspártico (análogos Asp-16 y -17) porque presentaron una solubilidad muy baja (**Figura 4A**); sin embargo, se presume que la adsorción de estos péptidos sobre hidróxido de aluminio también debe estar gobernada predominantemente por efectos electrostáticos.

La adsorción de los péptidos de la serie de análogos de lisina fue diseñada como control negativo y mostró concordancia con lo esperado, por la repulsión que debía existir entre el hidróxido de aluminio y los péptidos cargados ambos positivamente (**Figura 4B**).

Para realizar un análisis más detallado del proceso de adsorción, se escogieron los análogos Asp-6 y Asp-5 de la serie de ácido aspártico que presentan el máximo y el mínimo valor de adsorción, respectivamente. Se determinó adsorción en función de la concentración de la solución de péptido, como se ilustra en las isotermas de la

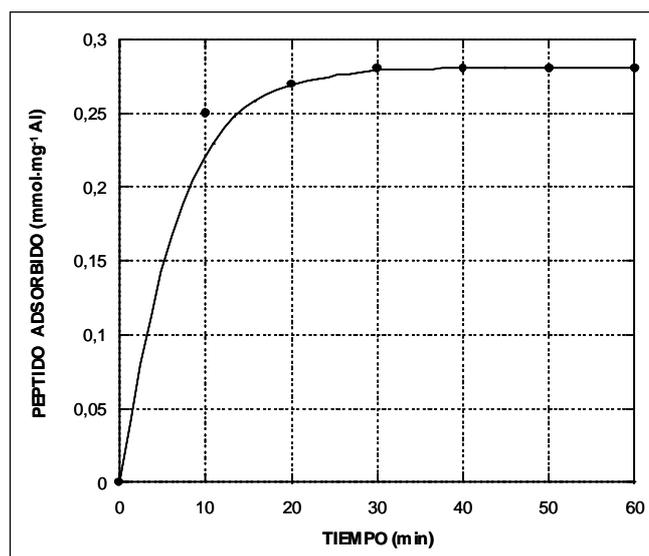


Figura 3. Gráfica del tiempo de equilibrio para la Adsorción del péptido 1585 de referencia sobre hidróxido de aluminio.

Figura 5; los resultados indican que la adsorción del péptido sobre hidróxido de aluminio es compleja y no se puede interpretar en todo el rango de concentraciones estudiadas con la isoterma de Langmuir (**Martin, 1983**). Es posible que el fenómeno de adsorción esté conformado por dos tipos independientes: el primero sobre el hidróxido de aluminio para conformar la monocapa y, a concentraciones mayores, la formación de una segunda capa sobre la monocapa adsorbida.

Conclusiones

Los valores aleatorios en los resultados para la solubilidad y la adsorción en las dos series de péptidos análogos estudiados sugieren que no hay una tendencia regular relacionada con las sustituciones de aminoácidos realizadas. Adicionalmente, se encontró que no hay correlación entre los datos encontrados de solubilidad y adsorción. El análisis estructural por dicroísmo circular mostró que no había diferencias significativas entre los péptidos análogos Asp-6 (de máxima adsorción) y Asp-5 (muy baja adsorción). Estos péptidos análogos no siguieron el patrón de adsorción asociado con la ecuación de Langmuir, en todo el rango de concentración estudiado, sugiriendo un mecanismo de adsorción complejo. Los resultados anteriores, el efecto extraordinario en la adsorción sobre hidróxido de aluminio al reemplazar la lisina en la posición seis por ácido aspártico y la disminución drástica en los valores de adsorción en la serie de análogos de lisina, indican que la adsorción de estos péptidos sobre hidróxido de aluminio esta gobernada predominantemente por efectos electrostáticos; sin embar-

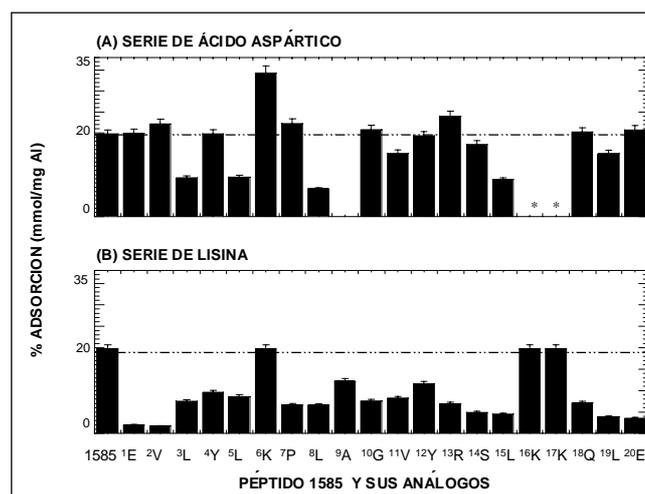


Figura 4. Adsorción sobre hidróxido de aluminio de las dos series de péptidos análogos en 0.9% NaCl a pH 7 ± 0.1 y 298 K.

*No Analizado

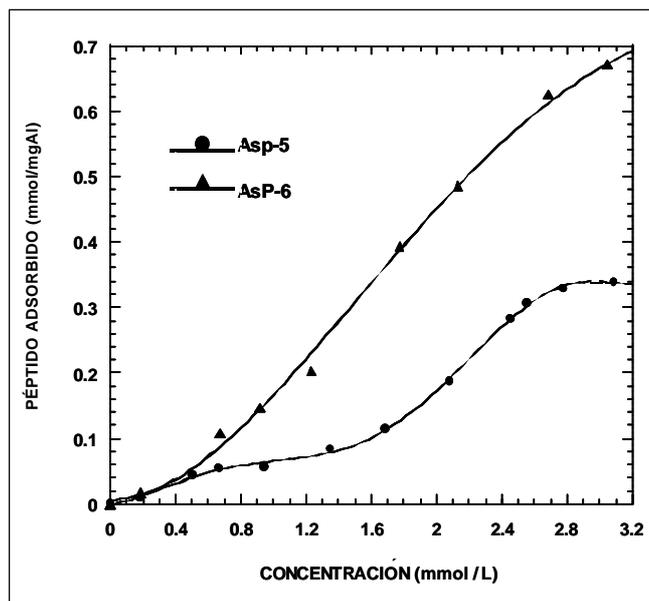


Figura 5. Isoterma de Adsorción de los péptidos Asp-5 y Asp-6 sobre hidróxido de aluminio en 0.9% NaCl a pH 7 ± 0.5 y 298 K.

go, deben existir otros factores que afectan el proceso, tal como lo demuestran los resultados opuestos encontrados para los análogos Asp-5 y Asp-6, que merecen estudios posteriores enfocados en las superficies puntuales de contacto, a través de la secuencia, en el complejo péptido-hidróxido de aluminio.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Oficina de la Presidencia de la República y al Ministerio de Protección Social por la financiación de este proyecto.

Bibliografía

- Al-Shakhshir, R. H., Regnier, F. E., White, J. L., & S. L. Hem. 1994. Contribution of electrostatic and hydrophobic interactions to the adsorption of proteins by aluminium-containing adjuvants. *Vaccine* **12**: 472-474.
- Al-Shakhshir, R. H., Lee, A. L., White, J. L., & S. L. Hem. 1995. Interaction in model vaccines composed of mixtures of aluminium-containing adjuvants. *J. Colloid Interface Sci.* **169**: 197-199.
- Al-Shakhshir, R. H., Regnier, F. E., White, J. L., & S. L. Hem. 1995b. Contribution of electrostatic and hydrophobic interactions to the adsorption of proteins by aluminium-containing adjuvants. *Vaccine* **13**: 41-44.
- Blackman, M. J. & A. A. Holder. 1992. Secondary processing of the *Plasmodium falciparum* merozoite surface protein by a calcium-dependent membrane-bound serine protease shedding of MSP as a noncovalently associated complex with other fragments of the MSP-1. *Molec. And. Biochem. Parasitol.*, **49**: 29-34

- Brown, R. E., Jarvis, K. L. & K. J. Hyland, K. 1989. Protein measurement using Bicinchoninic acid: Elimination of interfering substances. *Anal. Biochem.* **180**: 136-139
- Callahan, P. M., Shorter, A. L., & S. L. Hem. 1991. The importance of surface charge characteristics of aluminum-containing adjuvants. *Vaccine* **12**: 472-474.
- Chang, M., White, J. L., Nail S. L. & S. L. Hem. 1997. Role of the electrostatic attractive force in the adsorption of proteins by aluminium hydroxide adjuvant. *PDA J. Pharm. Sci. & Tech.* **51(1)**: 25-29
- Espejo, B. F., Cubillos, M., Salazar, L. M., Guzmán, F., Urquiza, M., Ocampo, M., Silva, Y., Rodríguez, R., Lyoi, E. & M. E. Patarroyo. 2001. Structure, Immunogenicity, and Protectivity relationship for the 1585 malarial peptide and its substitution analogues. *Angew. Chem. Int. Ed.* **40**: 4654-4657
- Hem, S. L. & J. L. White. 1984. Characterization of aluminium hydroxide for use as an adjuvant in parenteral vaccines. *J. Parenteral Sc. And Tech.* **38(1)**: 1-10
- Hem, S. L. & J. L. White. En: Powell M.F, Newman M.J., and Burdman J.R. editors. 1995. *Vaccine design-the subunit and adjuvant approach*. New York: Plenum Press, 249-75.
- Houghten, R. 1985. General method for the rapid solid-phase synthesis of large number of peptides: specificity of antigen-antibody interaction at the level of individual amino acids. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **82**: 5131-5.
- Martin, A., Swarbrick, J. & A. Camarata. 1983. *A Physical Pharmacy*, 3rd edition, Lea & Febiger (Eds.), Philadelphia.
- Matheis, W., Zott, A. & M. Schwanig. 2002. The role of the adsorption process for production and control combined adsorbed bacines. *Vaccine* **20**: 67-73.
- Merrifield, R. B. 1963. Solid phase peptide synthesis I. The synthesis of a tetrapeptide. *J. Am.Chem. Soc.* **85**: 2149-2154
- Rinella, J. V,jr., White, J. L., & S. L. Hem. 1995. Effect of anions on model aluminium adjuvant containing vaccines. *J. Colloid Interface Sci.* **172**: 121-130.
- Seeber, S. J., White, J. L., & S. L. Hem. 1991a. Solubilization of aluminium-containing adjuvants by constituents of interstitial fluid. *J. Parenteral Sci. Tech.* **45**: 156-159
- Seeber, S. J., White, J. L., & S. L. Hem. 1991b. Predicting the adsorption of proteins by aluminum-containing adjuvants. *Vaccine* **9**: 201-203.
- Serna, C. J., White, J. L. & S. L. Hem. 1977. Anion-aluminium hydroxide gel interactions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **41**: 1009-1013.
- Serna, C. J., White, J. L., & S. L. Hem. 1978. Factors affecting homogeneous precipitation of aluminium hydroxide gel. *J. Pharm. Sci.* **67(8)**: 1179-1181.
- Shirodkar, S., Hutchinson, R. L., Perry, D. L., White, J. L., & S. L. Hem. 1990. Aluminum compounds used as adjuvants in vaccines, *Pharm. Res.* **2**: 1282-1288.
- Smith, P. K., Krohn, R., Hermanson, A., Mallia, K., Gartner, F., Provenzano, M., Fujimoto, E., Goetze, N., Olson, B., & D. Klenk. 1985. Measurement of protein using Bicinchoninic acid. *Anal. Biochem.* **150**: 76-85
- Wiechelman, K., Braun, R. & J. Fitzpatrick. 1988. Investigation of the Bicinchoninic acid protein assay: identification of the groups responsible for color formation. *Anal. Biochem.* **175**: 231-237.
- World Health Organization (W.H.O.). 1976. Immunological adjuvants. World Health Organization Technical Report Series No. 595. Geneva: WHO, pp.6-8.

Recibido el 25 de agosto de 2004

Aprobado para su publicación el 4 de abril de 2005

PRODUCCIÓN DE MATERIALES ELÁSTICOS POR POLIMERIZACIÓN DE α,ω -DIENOS ACÍCLICOS VÍA METÁTESIS

por

Fabio Zuluaga¹, Kenneth B. Wagener² & Piotr Matloka²

Resumen

Zuleta, F., K. B. Wagener & P. Matloka. Producción de materiales elásticos por polimerización de α,ω -dienos acíclicos vía metátesis. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 289-294. 2005. ISSN 0370-3908.

Los elastómeros son macromoléculas cuya longitud puede incrementarse hasta un 400 % cuando son sometidos a una fuerza externa, pero que regresan a su longitud inicial una vez ésta cesa de actuar. En este artículo se describe la aplicación de una reacción de polimerización recientemente descubierta, metátesis, en la obtención de materiales elásticos. Efectivamente, el uso de los principios básicos que explican el fenómeno de la elasticidad, en la polimerización de α, ω -dienos acíclicos, mediante la reacción de metátesis, dio lugar a la transformación de materiales inicialmente frágiles al estiramiento, en materiales crecientemente elásticos.

Palabras clave: Polímeros elásticos, metátesis, dienos acíclicos.

Abstract

Elastomers are macromolecules whose length increases up to 400% upon stress, but return to their initial length once this stress is released. The application of a recently discovered polymerization reaction, metathesis, in the obtention of elastomeric materials is described here. As a matter of fact, the use of the basic principles explaining the phenomenon of elasticity, in the polymerization of α, ω -acyclic dienes via metathesis, ADMET, allowed the transformation of materials with no elastic properties in materials increasingly elastic.

Key words: elastomeric polymers, methathesis, ADMET, acyclic dienes.

¹ Grupo de Síntesis y Mecanismos de Reacción en Química Orgánica, Departamento de Química, Universidad del Valle, A.A. 25360, Cali, Colombia

² The George and Josephine Butler Laboratories, Department of Chemistry, University of Florida, Gainesville, USA

1. Introducción

Metátesis, del griego meta (cambio) y tithemi (lugar) se ha aplicado en química para indicar una reacción en donde dos alquenos se combinan, en presencia de un catalizador metálico, para intercambiar los carbonos involucrados en sus enlaces dobles, como se ilustra en la figura 1.

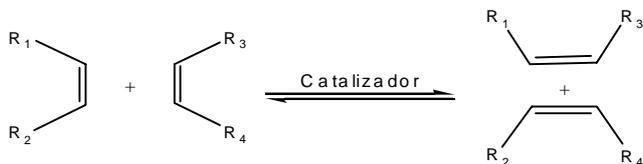


Figura 1. Reacción de metátesis

Esta reacción fue mencionada por primera vez en una patente¹, y fue registrada en algunos procesos industriales,^{2,3} en los años sesenta. Calderón y colaboradores^{4,5} descubrieron una serie de catalizadores tipo Ziegler capaces de producir metátesis y fueron quienes acuñaron este término. La reacción es un verdadero equilibrio cuyo sentido depende de factores termodinámicos y cinéticos. Su aplicación en la síntesis de compuestos cíclicos y acíclicos como monómeros y polímeros especiales, productos naturales y en química fina, ha demostrado su gran versatilidad.

En el campo de los polímeros se han aprovechado dos tipos de metátesis, una, la polimerización vía metátesis por apertura de anillos (Ring Opening Metathesis Polymerization, ROMP) y la polimerización de α , ω -dienos acíclicos (Acyclic Diene Metathesis Polymerization, ADMET). En la figura 2 se presentan los esquemas para estas dos reacciones las cuales, de ahora en adelante, vamos a identificar con sus siglas en inglés. Una diferencia fundamental entre estos dos métodos de polimerización radica en que, mientras ROMP se propaga por una reacción en cadena cuya fuerza motriz es la liberación de las tensiones del monómero cíclico, ADMET es una policondensación en donde la liberación de etileno conduce la reacción hacia la formación completa de productos.

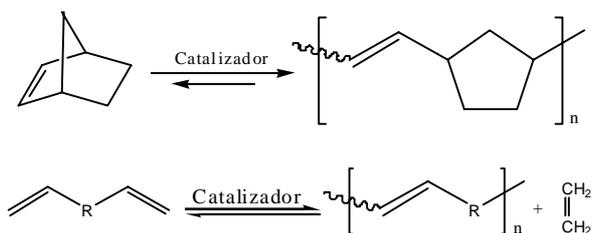


Figura 2. Polimerización por apertura de anillo vía metátesis, ROMP, (arriba) y Polimerización de dienos acíclicos vía metátesis, ADMET (abajo).

Tanto ROMP como ADMET han sido ampliamente estudiadas como se puede apreciar en diferentes recopilaciones⁶⁻⁹.

El éxito de estas polimerizaciones ha sido posible gracias a la síntesis de catalizadores organometálicos, ver figura 3, en la cual han sido pioneros Richard R. Shrock y Robert H. Grubbs, a tal punto que los respectivos catalizadores se conocen con el nombre de estos investigadores.

Aunque se conocían sugerencias sobre la posibilidad de policondensaciones por metátesis¹⁰, la polimerización de dienos acíclicos por la vía exclusiva de la metátesis, ADMET, fue alcanzada por primera vez en el grupo del profesor Kenneth B. Wagener en la Universidad de Florida. Inicialmente se llevó a cabo la polimerización de 1,5-hexadieno y 1,9-decadieno¹¹, utilizando como catalizador una mezcla 1:4 de hexacloruro de tungsteno y dicloruro de etil Aluminio, obteniéndose además de etileno, polioctenamero y polibutadieno, respectivamente.

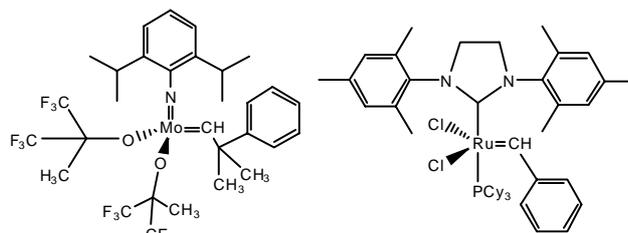


Figura 3. Catalizadores de Grubbs y de Schrock.

Sin embargo, los pesos moleculares de estos polímeros fueron menores de 5000 (VPO) y adicionalmente se obtuvo un producto no identificado. La hipótesis más plausible, que la reacción colateral fuera la polimerización vinílica vía carbocationes promovida por el ácido de Lewis, fue apoyada por un experimento en donde se utilizó estireno como compuesto modelo.¹² En vez del esperado compuesto de metátesis, estilbena, se obtuvo únicamente el producto de polimerización vinílica, poliestireno, lo cual es explicable dada la estabilidad del respectivo carbocatión bencílico generado por el ácido de Lewis. El paso siguiente fue el empleo de catalizadores organometálicos libres de ácidos de Lewis, afortunadamente disponibles gracias al trabajo de **Shrock**¹³. Efectivamente el uso de estos catalizadores dio lugar exclusivamente a la polimerización por metátesis de 1,9 decadieno y de butadieno generando polímeros con grados de polimerización cercanos a 500.¹⁴ Este hallazgo abrió la puerta a un campo muy interesante de investigación que ha dado muy buenos frutos en los últimos 12 años.

Mecanismo de Admet

El mecanismo para la polimerización via ADMET es semejante al propuesto por **Chauvin & Herrison**¹⁵ en 1971 para la llamada metátesis de intercambio. La especie activa es un carbeno metálico (un compuesto organometálico que contiene un doble enlace metal-carbono) el cual participa en la unión de las dos olefinas a través de un metalociclobutano intermediario. En la figura 4 se ilustra el mecanismo para ADMET. Un alquilideno metálico representado por L_nM (1), en donde L_n representa los ligandos unidos al metal M , interacciona con uno de los enlaces dobles del dieno (2) para generar un complejo π (3) el cual da lugar al metalociclobutano (4). Este se rompe para eliminar un alqueno y producir un monómero activado en donde el metal de transición está situado al final de la cadena (5). Este nuevo alquilideno interacciona con una molécula de monómero para dar otro metalociclobutano

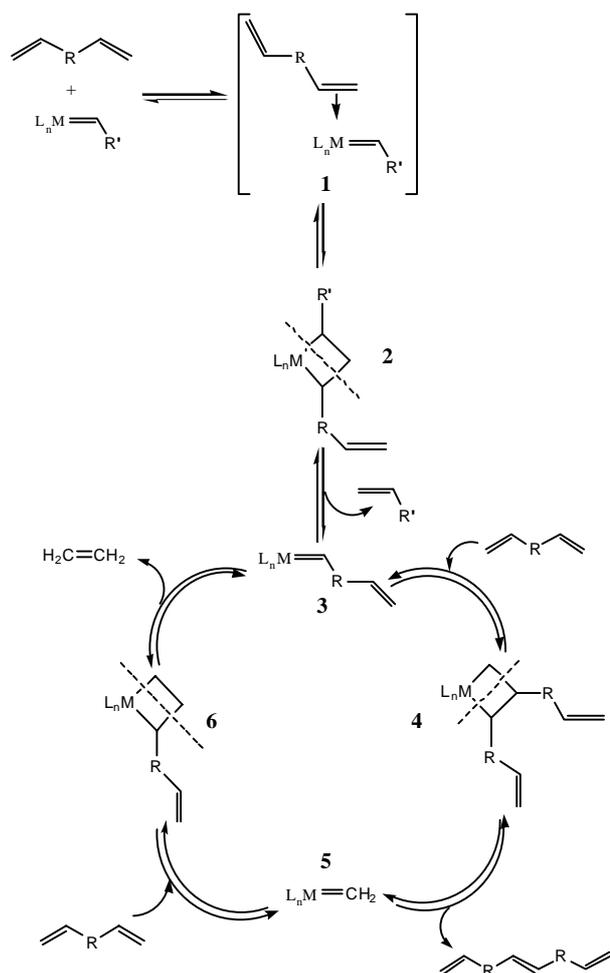


Figura 4. Mecanismo propuesto para ADMET.

Versatilidad de Admet

Se ha demostrado que tanto los catalizadores de Grubbs como los de Shrock, son tolerantes a diferentes funcionalidades, incluyendo heteroátomos como azufre, nitrógeno, oxígeno, silicio y grupos funcionales como ésteres, éteres y carbonatos, ver figura 5.

En principio, cualquier dieno terminal puede ser sujeto de homo o copolimerización vía ADMET. Sin embargo se ha descubierto que la funcionalidad introducida debe estar separada de los dobles enlaces por 3 metilenos al menos, en lo que se ha denominado el efecto negativo del grupo vecino (negative neighbouring group effect)¹⁶, ya que podría haber interacciones ácido-base entre el heteroátomo y el metal.

Otro punto importante es la pureza del monómero ya que ADMET es una polimerización por etapas. La presencia de impurezas, que puedan coordinarse con el metal, o de monoenos o alquinos que darían lugar a la reacción de metátesis, tendrían efectos en el peso molecular del polímero.

Se han polimerizado muchos hidrocarburos con alquenos terminales tanto alifáticos como aromáticos. El 1,9-decadieno se puede obtener comercialmente con alto grado de pureza y por lo tanto se ha utilizado como patrón de comparación en estudios de reactividad de otros monómeros. Entre otros polímeros derivados de hidrocar-

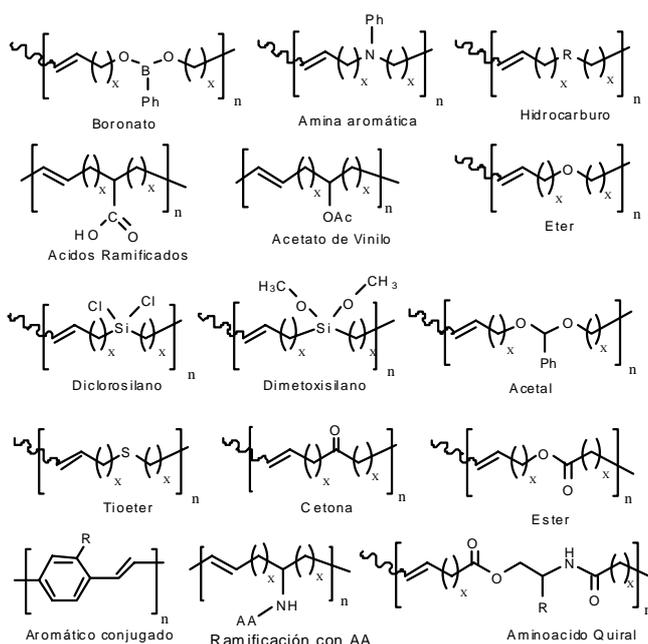


Figura 5. Algunas de las funcionalidades polimerizables por ADMET.

buros podemos mencionar polibutadieno, poliacetileno,¹⁷ poly(p-fenileno)octileno, y poli(1,4-parafenilenvinileno).¹⁸

Arquitectura molecular y estudios de modelación

El diseño de nuevos materiales requiere una escogencia muy cuidadosa de los monómeros con el objeto de obtener las propiedades deseadas como separación de microfase (elastómeros termoplásticos), comportamiento anfifílico, o compatibilidad para polímeros mezclados (blends). Se han sintetizado oligómeros terminados en dobles enlaces que pueden ser copolimerizados con otros dienos. Por ejemplo se han utilizado politetrahidrofurano y poliisobutileno con dobles enlaces terminales, los cuales tienen bajas temperaturas de transición vítrea, para combinarlos con segmentos “duros” como poliésteres y poliuretanos.^{19,20}

Por otro lado, la incorporación de metales en medio de la cadena hidrocarbonada del monómero ha sido objeto de trabajos recientes. Es así como se han preparado policarbostannanos y policarbogermanos.²¹ La modelación del comportamiento de cristalización de poliolefinas mediante ADMET es un área de mucha actividad. Polioctenileno obtenido por ADMET de 1,9-decadieno, tiene una estructura lineal que contiene un doble enlace en cada unidad monomérica, separado del siguiente doble enlace por seis grupos metilenos. La hidrogenación de este polímero produce polietileno perfectamente lineal, una estructura obtenida por policondensación, que puede ser utilizada para modelar polímeros obtenidos por poliadición. La polimerización de dienos simétricos ramificados (con grupos metilos) y su posterior hidrogenación produce polietileno “perfectamente imperfecto”, es decir con ramificaciones situadas en sitios preestablecidos, el cual se puede utilizar como un modelo para copolímeros obtenidos por copolimerización de etileno y propileno.

Como se mencionó antes, ADMET es una reacción en equilibrio lo cual puede ser aprovechado para promover reacciones de depolimerización mediante el mismo mecanismo si se encuentran las condiciones apropiadas. Efectivamente se ha reportado la depolimerización de polímeros insaturados por adición de alilsilanos²², y etileno.^{23, 24}

Elastómeros vía Admet

Con el objeto de preparar elastómeros termoplásticos que por posterior exposición a la atmósfera se entrecruzarán, dando lugar a polímeros termofijos, ver figura 6, se

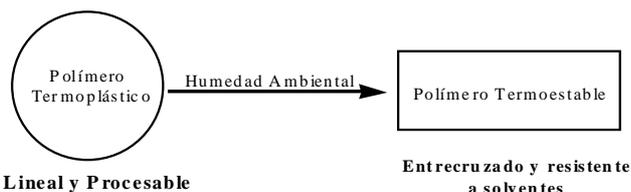


Figura 6. Obtención de un polímero termoestable a partir de un termoplástico, por hidrólisis de los grupos metoxi.

copolimerizaron 6,6,9,9-Tetrametoxi-6,9-disilatetradeca-1,13-dieno (carbosisilano) con 7,7,9,9-Tetrametil-8-oxa-7,9-disilapentadeca-1,4-dieno (carbosisiloxano).²⁵

Los grupos metoxi unidos al silicio en el carbosisilano, constituyen grupos reactivos latentes, que se hidrolizan lentamente al ser expuestos a la humedad del medio ambiente dando lugar al entrecruzamiento de las cadenas a través de enlaces tipo siloxano. Los copolímeros entrecruzados obtenidos produjeron películas estables que pueden doblarse fácilmente pero con poca elongación.

Una de las posibles causas de la baja elongación fue atribuida a un insuficiente grado de entrecruzamiento. La adición de trialilsilano como agente entrecruzante en la polimerización dio lugar a películas con mayor grado de elongación.

Tratando de mejorar la elasticidad de las películas, se propuso incrementar la longitud del segmento central flexible del dieno ya sea por un polisiloxano o por polietilenglicol. En la selección de estos segmentos se tuvo en cuenta la baja temperatura de transición vítrea: $T_g = -123^\circ\text{C}$ para el polisiloxano y $T_g = -90^\circ\text{C}$ a -50°C para el polietilenglicol, dependiendo de su grado de polimerización.

La síntesis de α, ω -Poli(etilenglicol)-dieno se presenta en la figura 7, e implicó la reacción del polietilenglicol con una base fuerte para producir la sal binaria la cual combinada con 11-bromo-1-undeceno daría el monómero deseado. Cuando se utilizó polietilenglicol de peso

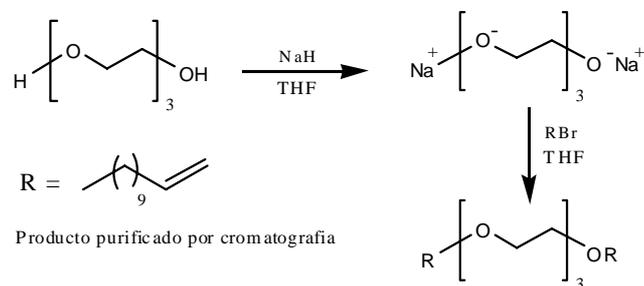


Figura 7. Síntesis del monómero.

molecular 1000 y 3000, y se adicionó butil-Litio, la sal respectiva precipitó inmediatamente impidiendo su posterior reacción con el bromuro de alqueno. La síntesis fue posible usando trietilenglicol y tetraetilenglicol los cuales mezclados con hidruro de sodio dieron sales binarias solubles, que con el bromuro de alqueno produjeron el monómero deseado.

La copolimerización de éste con el carbosilano, en presencia del catalizador de Grubbs y de un agente entrecruzante, permitió obtener materiales aún mas elásticos y se presenta en la figura 8.

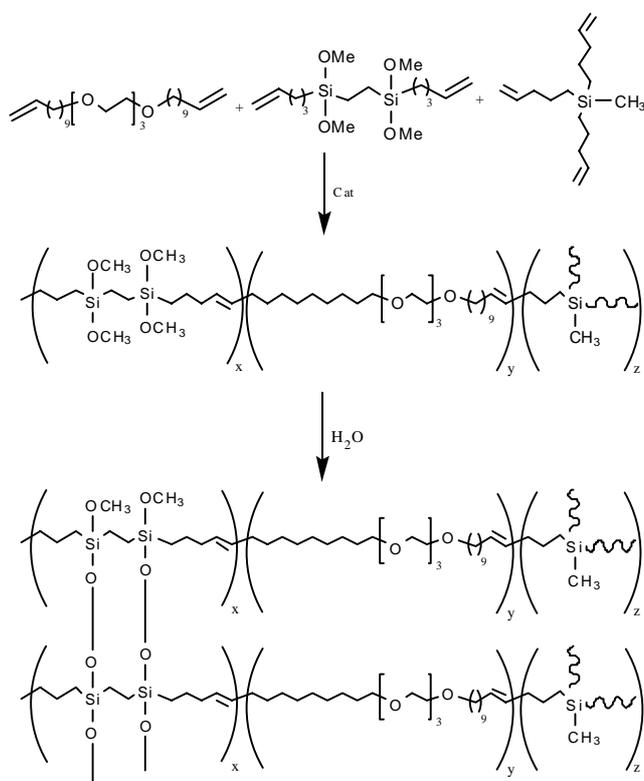


Figura 8. Polimerización con agente entrecruzante

Conclusiones

La polimerización de α ... ω -dienos acíclicos vía metátesis ADMET, puede emplearse para obtener materiales elásticos por medio de la utilización de dos monómeros, uno que contiene un espaciador flexible, segmento blando, y otro que contiene un segmento rígido. La copolimerización de dienos conteniendo un carbosilano y un carbosiloxano, produjo materiales flexibles pero con poca elongación. La adición de un agente entrecruzante,

trialilsilano, permitió mayor elongación. El reemplazo del espaciador flexible por trietilenglicol, conjuntamente con la adición del agente entrecruzante dio lugar a películas estables con mayor elongación aún.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de Florida y a la agencia ARO por la financiación de este trabajo, a los integrantes de The George and Josephine Butler Laboratories, especialmente a John Sworen y Krystina Brzezinska, ahora en la Universidad de California, por su colaboración en valiosas discusiones. Fabio Zuluaga agradece a la Universidad del Valle por su año sabático y a COLCIENCIAS por su aporte financiero a través de los grupos de excelencia en la investigación.

Bibliografía

1. Banks, R. L.; Bailey, G. C. *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.* 1964, 3,170.
2. Brzezinska, K. R.; Schitter, R.; Wagener, K. B. *J. Polym. Sci.: Part A: Polym. Chem.*, 2000, 38, 1544.
3. Calderón, N.; Chen, H. Y.; Scott, K. W. *Tetrahedron Lett.* 1967, 3327.
4. Calderón, N.; Offstead, E. A.; Judy, W. A. *J. Polym. Sci. A-1* 1967, 5, 2209
5. Davidson, T. A.; Wagener, K. B. Acyclic Diene Metathesis (ADMET) Polymerization. En *Synthesis of Polymers*; Schluter, A. D. Ed.; Materials Science and Technology Series; Wiley-VCH: Weinheim, 1999, p. 105.
6. Doyle, G. J. *Catal.* 1973, 30, 118. Dall'Asta, G.; Stigliani, G. Greco, A.; Matta, L. *Chim. Ind.* 1973, 55, 142. Korshak Y. V.; Teinkpochchev, M. A.; Dologoplosk, B. A.; Avdekina, E. G.; Kutepov, D. F. *J. Mol. Catal.* 1982, 15, 207
7. Eleuterio, H. S. US Patent No 3,074,918; 1957.
8. Gómez, F. G.; Wagener, K. B. En *Ring Opening Metathesis Polymerization and Related Chemistry*, Khosravi, E.; Szymanska-Buzar, T. Eds. Kluwer Acad. Publish. The Netherlands, 2002, p 285
9. Grubbs, R. H.; Khosravi, E. Ring Opening Metathesis Polymerization (ROMP) and Related Processes. En *Synthesis of Polymers*; Schluter, A. D. Ed. Materials Science and Technology Series; Wiley-VCH: Weinheim, 1999, p 65.
10. Lindmark-Hamberg, M.; Wagener, K. B. *Macromolecules*, 1987, 20, 2949.
11. Marmo, J. C.; Wagener, K. B. *Macromolecules*, 1993, 26, 2137.
12. Marmo, J. C.; Wagener, K. B. *Macromolecules*, 1995, 28, 2602.
13. Schaverien, C. J.; Dewan, J. C.; Shrock, R. J. *Amer. Soc.*, 1986, 108, 2771.

14. **Shrock, R.** Ring Opening Metathesis Polymerization. En *Ring Opening Metathesis Polymerization*; Bruneile, D. J. Ed.; Hanser: Munich, 1993, p. 129.
15. **Tao, D.; Wagener, K. B.** *Macromolecules*, 1994, 27, 1281.
16. **Thorn-Csanyi, E.; Klockman, O.** *Synth. Met.* 1999, 101, 664.
17. **Tindall, D.; Pawlow, J. H.; Wagener, K. B.** Recent Advances in ADMET Chemistry. En *Alkene Metathesis in Organic Synthesis*; Furstner, A. Ed.; Springer-Verlag: Berlin, 1998, p 183.
18. **Truett, W. L.; Johnson, D. R.; Robinson, I. M.; Montague, B. A.** *J. Am. Chem. Soc.* 1960, 82, 2337.
19. **Wagener, K. B.; Boncella, J. M.; Nel, J. G.; Duttweiler, R. P.; Hillmyer, M. A.** *Makromol. Chem.* 1990, 191, 365.
20. **Wagener, K. B.; Nel, J. G.; Duttweiler, R. P.; Hillmyer, M. A.; Boncella, J. M.; Konzelman, J.; Smith, D. W.; Puts, R.; Willoughby, L.** *Rubber Chem. & Tech.* 1991, 64 (1), 83.
21. **Chauvin, Y.; Herrison, J. L.** *Makromol. Chem.* 1970, 141, 161.
22. **Wagener, K. B.; Brzezinska, K. R.; Anderson, J. D.; Younkin, T. R.; Steppe, K.; DeBoer, W.** *Macromolecules*, 1997, 30, 7363.
23. **Wagener, K. B.; Brzezinska, K. R.; Anderson, J. D.; Dilocker, S.** *J. Poly. Sci. A: Polym. Chem.* 1997, 35, 3441.
24. **Tindall, D.; Wagener, K. B.; Brzezinska, K. R.** *Polym. Prepr. (Am. Chem. Soc. Div. Polym. Chem.)* 1999, 218 (2), 413.
25. **Watson, M. D.; Wagener, K. B.,** *J. Polym. Sci: Part A: Polym. Chem.*, 1999, 37, 1857.

Recibido el 22 de octubre de 2004

Aprobado para su publicación el 4 de abril de 2005

***Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Girard, 1852),
(Crustacea: Decapoda: Cambaridae).
Una langostilla no nativa en Colombia**

por

Martha R. Campos¹

Resumen

Martha R. Campos: *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii*, (Crustacea: Decapoda: Cambaridae). Una langostilla no nativa en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 295-302, 2005. ISSN 0370-3908.

La langostilla *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Girard, 1852) se registra para la Sabana de Bogotá, Colombia. Esta especie se diferencia de otras especies del género por algunas características morfológicas en el caparazón y en el primer gonopodo del macho. La especie *P. (S.) clarkii* es originaria de la región nor-oriental de México y de las regiones central y sur de los Estados Unidos. La distribución actual incluye todos los continentes, con excepción de Australia y la Antártica. Posiblemente en Colombia esta especie fue introducida para cultivo en la década de 1980, pero no hay evidencia de que se hayan cumplido con las formalidades de ley que protegen las comunidades nativas.

Palabras clave: Decápoda, Cambaridae, langostilla, especie no nativa.

Abstract

The crayfish *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Girard, 1852) is reported for Colombia. This species is distinguished from other species within the genus by some features on the carapace, and the male first gonopod. The species *P. (S.) clarkii* is native of north-eastern Mexico and the south and central USA. Actually, the distribution comprises all the continents with exception of Australia and the Antarctic. In Colombia this species of crayfish was introduced possibly for cultivation in the 1980s, but without the knowledge and permission of the authorities.

Key words: Decapoda, Cambaridae, crayfish, nonindigenous species.

¹Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. E-mail: mhrochad@unal.edu.co

1. Introducción

El 20 de noviembre de 2004, ocho especímenes adultos (6 machos, 2 hembras) y un juvenil de *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Girard, 1852) fueron capturados en Cundinamarca en un lago artificial, en el km 14 de la carretera central Bogotá - Briceño. Esta especie es originaria de la región nor-oriental de México y de las regiones central y sur de los Estados Unidos. Se trata del primer registro para la Sabana de Bogotá, Colombia. **Hobbs** (1989) menciona sin detalle alguno que se estaban iniciando cultivos limitados en Colombia.

Vale la pena destacar que *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* es considerada la especie de mayor expansión intercontinental, ya que hay registros de casi todos los continentes, a excepción de Australia y la Antártica.

Esta especie se considera en los Estados Unidos una "Delikatess", se cultiva con fines comerciales a gran escala y se menciona que en las últimas décadas es la especie con mayor éxito en cultivos. Por ejemplo, en Louisiana (Estados Unidos) hay una multimillonaria industria con más de 50,000 hectáreas destinadas a su cultivo. La especie se introdujo hacia los años 1970 y 1980 en países europeos, tales como Italia, España y Francia (**Holdich et al.**, 1999). España, en particular, ha desarrollado mediante su cultivo una industria productiva y dinámica.

Rodríguez & Suárez (2001) registran la introducción de esta especie en Venezuela, especialmente con fines ornamentales; en Caracas se consiguen en almacenes de mascotas.

Procambarus (S.) clarkii es una especie con mucho éxito en la colonización de nuevos ambientes, en virtud del empleo de la estrategia-r que consiste en un ciclo de vida corto y una alta tasa de fecundidad. Esta característica le ha merecido el ser considerada como la especie con mayor plasticidad ecológica de todos los Decapoda. Su plasticidad le permite adaptarse a nuevos ambientes, ser tolerante a niveles bajos de oxígeno, resistente a altas temperaturas, tolerante a períodos prolongados de sequía, al permanecer en galerías subterráneas; es además una de las pocas especies de langostilla que puede sobrevivir en agua salada. Si a esto se suma la resistencia de *P. (S.) clarkii* frente al hongo *Aphanomyces astaci*, se concluye que tiene grandes ventajas frente a las especies nativas, como es el caso de la especie europea *Astacus astacus* (Linnée, 1758) que presenta una alta susceptibilidad al hongo mencionado (**Holdich et al.**, 1999).

La introducción de especies en nuevos ecosistemas es un tema que se ha debatido ampliamente en la literatura en virtud del efecto negativo que tienen sobre las especies nativas. En el caso particular de *Procambarus clarkii*, la especie

está asociada a ambientes lóticos y lénticos tales como ríos, quebradas, lagunas, estanques, sistemas de irrigación. Su introducción puede causar cambios a nivel de las comunidades de plantas y organismos nativos: por una parte, su presencia genera una fuerte competencia interespecífica con especies nativas relacionadas y altera la cadena trófica por el alto consumo de invertebrados y macrofitas; por otra, puede actuar también como vector de parásitos que afectan a otros organismos de la comunidad. Adicionalmente, debido a su constante actividad excavadora, afecta el fondo de quebradas, lagunas, estanques, al igual que disminuye considerablemente la disponibilidad de oxígeno disuelto en el agua; es decir que por su actividad se alteran las características del ecosistema y este hecho podría ir en detrimento de las poblaciones nativas.

La determinación taxonómica se realiza con base en la clave de **Hobbs** (1972). En este trabajo se incluye los principales caracteres diagnósticos e ilustraciones de la especie.

El material está depositado en el Instituto de Ciencias Naturales, Museo de Historia Natural, de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, (ICN-MHN). Las abreviaciones PCL y TCL corresponden a la longitud del caparazón medida a partir de la órbita y a la longitud total medida a partir del extremo distal del rostro, respectivamente. La nomenclatura de color se basa en **Smithe** (1975).

2. Aspectos taxonómicos

Familia Cambaridae

Procambarus (Scapulicambarus) clarkii (Girard, 1852)

Figuras 1, 2 A - E

Cambarus clarkii Girard, 1852 : 91.

Tipos. Destruídos en el incendio de Chicago en 1871.

Localidad típica. Entre San Antonio y El Paso, Texas.

2.1. Diagnósis

Caparazón y ojos pigmentados; rostro acuminado, cóncavo, con márgenes elevados, ligeramente engrosados y con una serie de tubérculos (Fig. 1, 2 A); espina cervical pequeña; areola reducida (1.90 cm × 0.25 cm), equivalente a 15.2 veces la relación largo/ancho (Fig. 1, 2 A); palma de la quela moderadamente abultada, con una hilera de tubérculos a lo largo del margen mesial, la quela elongada (Fig. 1, 2 B); el isquio del tercer y cuarto par de pereopodos, cada uno con una espina prominente en forma de gancho. Primer gonopodo del macho con una saliente angular desde la porción media hasta subdistal de la superficie cefálica, con hileras de setas muy



Figura 1: *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Girard, 1852), macho, ICN-MHN-CR 2194: vista total dorsal.

conspicuas sobre la superficie mesial, las cuales continúan hasta la porción distal (Fig. 2 C, D); el ápice del gonopodo conformado por 4 estructuras: (a) la proyección central lobulada, semicircular, con un ángulo agudo en el margen caudo-distal (Fig. 2 C E), (b) el proceso mesial prominente, triangular, con el extremo distal agudo, dirigido distalmente (Fig. C, D), (c) una protuberancia, en la porción distal de la superficie caudo-lateral del gonopodo, la cual forma una cresta elíptica distal (Fig. 2 C - E), (d) un proceso triangular, situado entre la proyección central y la cresta elíptica, con el extremo distal terminado en una espina aguda, dirigida caudalmente y ligeramente de mayor tamaño que la cresta elíptica (Fig. 2 C - E).

2.2. Material examinado

Cundinamarca, km 14, carretera Central Bogotá – Briceño, en lago artificial, alt. 1600 m, 20 Noviembre 2004, leg. *E. Guerra*, 4 machos, TCL 10.2, 10.1, 9.4 y 8.4 cm, PCL 4.1, 4.0, 3.6 y 3.3 cm, ICN-MHN-CR 2194. Cundinamarca, km 14 carretera Central Bogotá – Briceño, en lago artificial, alt. 1600 m, 20 Noviembre 2004, leg. *E. Guerra*, 2 machos, TCL 9.9 y 9.4 cm, PCL 3.9 y 3.8 cm, 2 hembras, TCL 9.2 y 8.9 cm, PCL 3.6 y 3.3 cm, ICN-MHN-CR 2195.

2.3. Coloración

El color del caparazón (Fig. 1) en su superficie dorsal y ventral es rojo carmín (Carmine, 8). Los segmentos abdominales, presentan dorsalmente franjas de color rojo oscuro, que alternan con las del color básico (rojo carmín). Las quelas presentan hileras de tubérculos y espinas de color rojo brillante (Geranium, 12), que resalta frente al color rojo carmín del caparazón (Fig.1). Para la descripción de colores se sigue a **Smithe** (1975).

2.4. Aspectos biológicos

Estos organismos son omnívoros, pero también pueden ser saprófagos, aunque solamente consumen presas sin avanzado estado de descomposición. Dentro de su comida favorita se encuentran gusanos (Annelidos), insectos, larvas de insectos, huevos de peces, de ranas y de salamandras. Su crecimiento está determinado por factores tales como la disponibilidad de alimento, calidad del agua y la temperatura (temperatura óptima 21 – 27°C); a mayor temperatura más rápido es su crecimiento. Los adultos pueden alcanzar una longitud total de 20 cm.

Después del apareamiento, la hembra porta los huevos adheridos a sus apéndices abdominales (pleopodos) por un

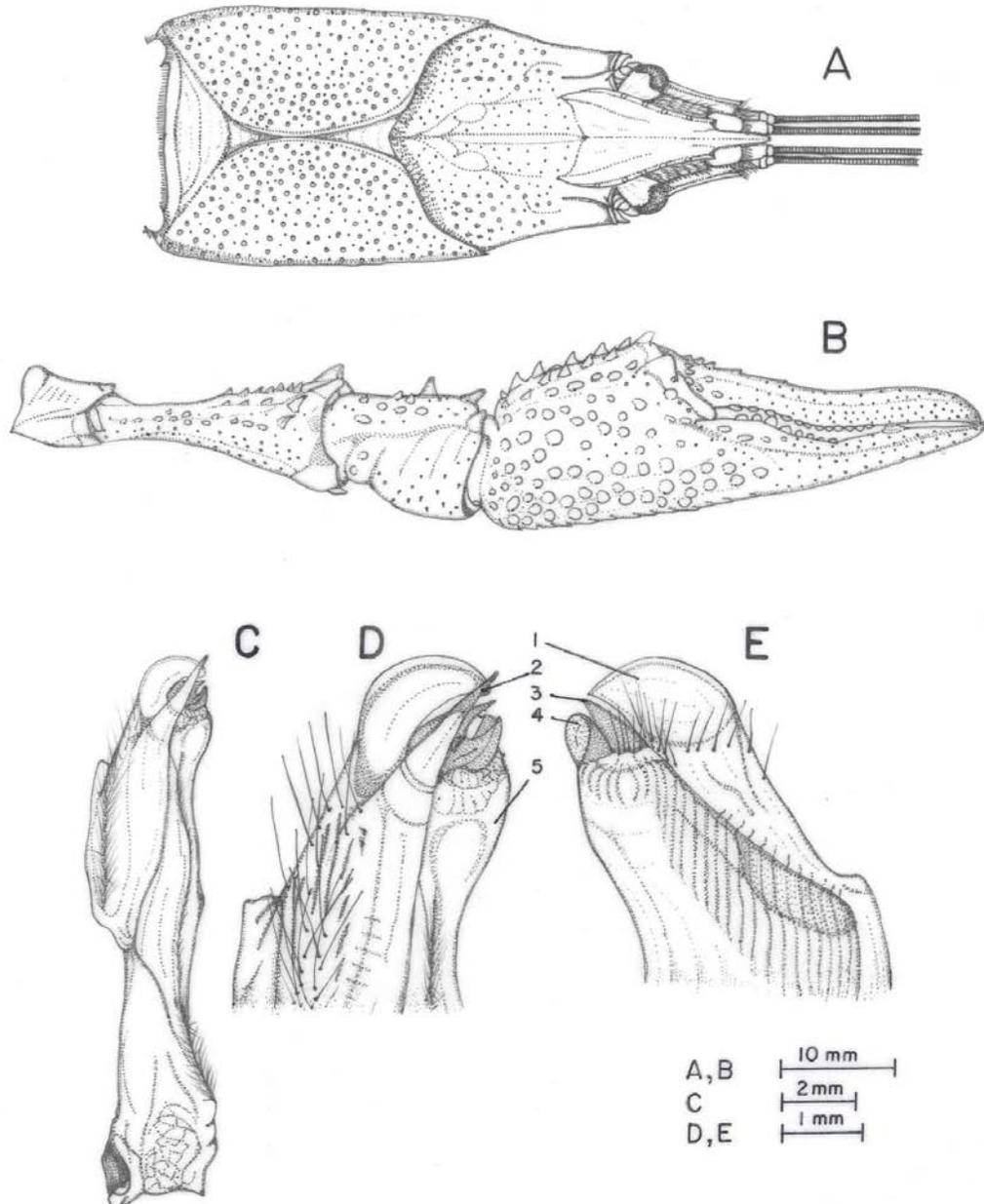


Figura 2: *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Girard, 1852), macho, ICN-MHN-CR 2194: **A**, caparazón, vista dorsal; **B**, primer pereopodo, quelado, vista dorsal; **C**, primer gonopodo del macho, vista mesial; **D**, detalle del ápice, vista mesial; **E**, detalle del ápice, vista lateral. **1**, proyección central; **2**, proceso mesial; **3**, proceso triangular; **4**, cresta elíptica **5**, protuberancia.

período aproximado de 28 días. Al cabo de éstos eclosionan versiones en miniatura del adulto, sin órganos reproductivos; se desarrollan rápidamente y permanecen adheridos al cuerpo de la madre alrededor de 30 días, lapso en el que alcanzan la independencia para valerse por sí mismos. Los juveniles tienen una coloración verde-grisácea, muy diferente a la de los adultos, la que cambia cuando alcanzan la madurez sexual (**Holdich et al.**, 1999).

2.5. Método de captura

Los especímenes quedaron expuestos en un pastizal adyacente a un lago artificial, como consecuencia de una fuerte lluvia. Es importante señalar que el lago no está conectado con ningún sistema hídrico de la zona, por lo tanto la población se encuentra bastante aislada.

2.6. Distribución

Especie originaria del norte de México hasta Escambia County (Florida). La distribución actual incluye los Estados Unidos y el resto de continentes, a excepción de Australia y la Antártica (**Holdich et al.**, 1999).

3. Decápodos de agua dulce en Colombia

Los Crustáceos, decápodos de agua dulce en Colombia están representados por las familias: Atyidae de Haan, 1849, Palaemonidae Rafinesque, 1815, Trichodactylidae H. Milne Edwards, 1853 y Pseudothelphusidae Rathbun, 1893.

La familia Atyidae está representada por dos géneros: *Atya* Leach, 1816 y *Potimirim* Holthuis, 1954; el primero con cinco especies y el segundo con una especie registradas para Colombia.

La familia Palaemonidae está compuesta por 280 especies, distribuidas en 17 géneros, 9 de los cuales se encuentran representados en América. El género *Macrobrachium* Bate, 1868 se considera el más numeroso dentro de la familia Palaemonidae, con aproximadamente 180 especies. Para Colombia se conocen registros de 17 especies.

La familia Trichodactylidae, que incluye 48 especies, se caracteriza por presentar una distribución en las cuencas más importantes de Sudamérica a altitudes inferiores a 100 m sobre el nivel del mar, aunque algunas especies pueden alcanzar hasta los 900 m en el piedemonte andino.

Sobre la familia Trichodactylidae se pueden consultar contribuciones tales como: **Bott**(1969); **Magalhães & Türkay** (1996a, 1996b, 1996c); **Manning & Hobbs** (1977); **Pretzmann** (1968); **Rodríguez** (1992); **Smalley & Rodríguez** (1972).

Campos (2005) presenta el estudio taxonómico y el análisis de la distribución de las 14 especies de esta familia con registros para Colombia.

La familia Pseudothelphusidae está conformada por 230 especies, con una distribución que va desde el Estado de Sonora en México hasta Perú, incluidas las Guayanas, las Antillas Menores y Mayores, con excepción de Jamaica. La familia no presenta una distribución uniforme de los taxones, sino que hay dos áreas de concentración de especies: México y Colombia. México con registros para 10 géneros y 34 especies, 12 de los cuales endémicos. Colombia con 13 géneros, 79 especies y 4 subespecies registradas, 74 especies y 3 subespecies endémicas (**Campos**, 2005).

Sobre la familia Pseudothelphusidae se pueden consultar diversas contribuciones: **Campos** (1985, 1989, 1992, 1994, 1995, 1997a, 1997b, 1998, 1999, 2000, 2001, 2003a, 2003b, 2004, 2005); **Campos & Lemaitre** (1998, 2002); **Campos & Magalhães** (2005); **Campos, Magalhães & Rodríguez** (2002); **Campos & Rodríguez** (1984, 1985, 1988, 1993, 1995); **Campos & Valencia** (2004); **Rodríguez & Campos** (1989, 1998); **Rodríguez, Campos & López** (2002).

4. Introducción de especies de decápodos

Rodríguez & Suárez (2001) señalan que de aproximadamente 10.000 especies de crustáceos descritas en el mundo, sólo 86 especies han sido registradas como emigrantes: 58 especies corresponden a ambientes marinos, 8 a estuarinos y 20 a dulceacuícolas. Estas especies han emigrado a través de canales de navegación, han sido transportadas accidentalmente en barcos o con productos pesqueros, o han sido introducidas con fines ornamentales o para el establecimiento de cultivos.

Para Colombia, se señala en la literatura la emigración de un cangrejo marino de la familia Portunidae, *Charybdis hellerii* (A. Milne Edwards, 1867), presente en el área de Santa Marta (**Lemaitre**, 1995). El Biólogo Francisco Gutierrez me informó (com. pers., 2005) sobre la existencia de un estudio que había realizado en los últimos años tendiente a establecer el número real de especies introducidas en Colombia, en el cual concluye que 163 especies han sido introducidas, en gran parte para cultivos.

La baja tasa de emigración contrasta con el hecho de que los decápodos están particularmente adaptados para migraciones a grandes distancias, lo que les permite colonizar nuevos ambientes: (i) Su exoesqueleto es un elemento a favor ya que los protege parcialmente de la deshidratación. (ii) Las diferencias osmóticas se compensan debido a que el transporte del agua y de electrolitos se lleva a cabo a través de las bran-

quias y de las membranas inter-segmentales (Green, 1961). (iii) Su fecundidad, representada en un gran número de larvas y regulada en su ambiente nativo por una alta tasa de predación, en un nuevo ambiente podría conllevar a una alta tasa de supervivencia.

Agradecimientos

Este trabajo fue preparado especialmente con motivo de mi posesión como *Miembro Correspondiente* de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Ilustraciones elaboradas por Carlos Bernal y fotografía por Rodrigo Díaz.

Referencias

- Bate, C. S.** 1868. On a new Genus, with four new Species, of freshwater Prawns. Proc. Zool. Soc. London **1868**: 363 – 368.
- Bott R.** 1969. Die Süßwasserkrabben Süd-Amerikas und ihre Stammesgeschichte. Eine Revision der Trichodactylidae und der Pseudothelphusidae östlich der Anden (Crustacea, Decapoda). Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft (Frankfurt am Main), **518**: 1 – 94.
- Campos, M. R.** 1985. Decápodos de agua dulce del Suborden Brachyura reportados para Colombia. - *Caldasia*, **14** (67): 265 – 284.
- Campos, M. R.** 1989. Nuevas especies de cangrejos de agua dulce del género *Hypolobocera* (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae) para Colombia. *Trianea*, **3**: 143 – 147.
- Campos, M. R.** 1992. New species of fresh-water crabs of the genus *Neostrengeria* Pretzmann, 1965 (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae) from Colombia. Proceedings of the Biological Society of Washington, **105**: 540 – 554.
- Campos, M. R.** 1994. Diversidad en Colombia de los cangrejos del género *Neostrengeria*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Col. Jorge Alvarez Lleras, No. **5**: 1 – 143.
- Campos, M. R.** 1995. A new species of fresh-water crab of the genus *Strengeriana* from Colombia (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae) from Colombia. Proceedings of the Biological Society of Washington, **108**: 98 – 101.
- Campos, M. R.** 1997a. Primeros registros de la tribu Kingsleyini Bott, 1970 (Crustacea: Decapoda: Pseudo-thelphusidae). *Caldasia*, **19** (1 - 2): 269 - 277.
- Campos, M. R.** 1997b. Crustáceos, Decápodos. In Zonificación Ambiental para el Plan Modelo Colombo-Brasilero (Eje Apaporis-Tabatinga: PAT). Edit. Linotipia Bolivar. 1 410.
- Campos, M. R.** 1998. A new species of freshwater crab of the genus *Phallangothelphusa* Pretzmann, 1965 from Colombia (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae). Proceedings of the Biological Society of Washington, **111**: 92 – 96.
- Campos, M. R.** 1999. A new species of freshwater crab of the genus *Strengeriana* Pretzmann, 1971, from Colombia (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae). Proceedings of the Biological Society of Washington, **112**: 405 – 409.
- Campos, M. R.** 2000. *Neostrengeria binderi*, a new species of pseudothelphusid crab from the eastern Andes of Colombia (Crustacea: Decapoda: Brachyura). Proceedings of the Biological Society of Washington, **113**: 401 – 405.
- Campos, M. R.** 2001. A new genus and species of freshwater crab from Colombia (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae). Proceedings of the Biological Society of Washington, **114**: 938 – 943.
- Campos, M. R.** 2003a. A review of the freshwater crabs of the genus *Hypolobocera* Ortmann, 1897, from Colombia (Crustacea: Decapoda: Brachyura: Pseudothelphusidae). Proceedings of the Biological Society of Washington, **116**: 754 – 802.
- Campos, M. R.** 2003b. A new species of freshwater crab of the genus *Potamocarcinus* H. Milne Edwards, 1853 (Crustacea: Decapoda: Brachyura: Pseudothelphusidae), from Colombia. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales: **27** (103): 283 – 286.
- Campos, M. R.** 2004. *Neostrengeria lemaitrei*, a new species of freshwater crab from Colombia (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae), and the vertical distribution of the genus. Proceedings of the Biological Society of Washington, **117**: 377 – 381.
- Campos, M. R.** 2005. Freshwater crabs from Colombia: A Taxonomic and Distributional study. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Col. Jorge Alvarez Lleras No. **24**: 1 – 363.
- Campos, M. R. & R. Lemaitre** 1998. A new freshwater crab of the genus *Neostrengeria* Pretzmann, 1965, from Colombia (Crustacea: Decapoda: Brachyura: Pseudothelphusidae), with a key to the species of the genus. Proceedings of the Biological Society of Washington, **111**: 899 – 907.
- Campos, M. R. & R. Lemaitre** 2002. A new species of freshwater crab of the genus *Potamocarcinus* H. Milne Edwards, 1853 (Crustacea: Decapoda: Brachyura: Pseudothelphusidae), from Panamá. Proceedings of the Biological Society of Washington, **115**: 600 – 604.
- Campos, M. R. & C. Magalhães** 2005. *Achagua* Campos, 2001, a new synonym of *Eudaniela* Pretzmann, 1971, and the introduction of *Rodriguezus* gen. nov. (Decapoda: Brachyura: Pseudothelphusidae). Nauplius (en prensa).
- Campos, M. R. & C. Magalhães & G. Rodríguez** 2002. The freshwater crabs of southern Colombia and their biogeographical affinities (Brachyura: Pseudothelphusidae). Nauplius, **10**: 15 – 25.

- Campos, M. R. & G. Rodríguez** 1984. New species of freshwater crabs (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae) from Colombia. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, **97**: 538 – 543.
- Campos, M. R. & G. Rodríguez** 1985. A new species of *Neostrengeria* (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae) with notes on geographical distribution of the genus. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, **98**: 718 – 727.
- Campos, M. R. & G. Rodríguez** 1988. Notes on the freshwater crabs of the genus *Moritschus* Pretzmann, 1965 (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae) with description of *M. narinnensis* from Southern Colombia. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, **101**: 640 – 643.
- Campos, M. R. & G. Rodríguez** 1993. Three new species of *Strengeria* from Colombia (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae). *Proceedings of the Biological Society of Washington*, **106**: 508 – 513.
- Campos, M. R. & G. Rodríguez** 1995. Two new species of freshwater crabs of the genus *Hypolobocera* from Colombia (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae). *Proceedings of the Biological Society of Washington*, **108**: 649 – 655.
- Campos, M. R. & D. M. Valencia** 2004. Two new species of freshwater crabs of the genus *Chaceus* Pretzmann, 1965 from the Serrana de Perijá of Colombia (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae). *Proceedings of the Biological Society of Washington*, **117**: 35 – 41.
- Girard, C.** 1852. A revision of the North American Astaci, with observations on their habits and geographical distribution. *Proc. Acad. of Nat. Sci. Philadelphia* **6**: 87 – 91.
- Green, J.** 1961. *A Biology of Crustacea*. HFG Whitherby, London, 1 – 180.
- Hobbs, H. H. Jr.** 1972. *Biota of freshwater Ecosystems: Identification manual No. 9. Crayfishes (Astacidae) of North and Middle America, for the Environmental Protection Agency, Project 18050 ELD*.
- Hobbs, H. H. Jr.** 1989. An illustrated checklist of the American crayfishes (Decapoda: Astacidae, Cambaridae, and Parastacidae). *Smithsonian Contribution to Zoology*, **480**: 1 – 236.
- Holdich, D. M., R. Gydemo & W. D. Rogers.** 1999. A review of possible methods for controlling nuisance populations of alien crayfish. In Gherardi, F. & D. M. Holdich. (eds.) *Crustacean Issues 11: Crayfish in Europe as Alien Species (How to make the best of a bad situation?)* A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands: 245 – 270.
- Holthuis, L. B.** 1950. Preliminary Descriptions of twelve new Species of Palemonid Prawns from American Waters (Crustacea Decapoda). *Proc. Kon. Nederl. Akad. Wetensch.* **53**: 93 – 99.
- Holthuis, L. B.** 1954. On a collection of decapod Crustacea from the Republic of El Salvador (Central America). *Zool. Verh. Leiden*, **23**: 1 – 43.
- Leach, W. E.** 1816. *Atya*. En: *Encyclopaedia Britannica*. Supplement to the fourth, fifth and sixth ed. Edinburgh. Archibald Constable Co. **1**: 1 – 421.
- Lemaitre, R.** 1995. *Charybdis helleri* (Milne Edwards, 1867), a non-indigenous portunid crab (Crustacea: Decapoda: Brachyura) discovered in the Indian River lagoon system of Florida. *Proceedings of the Biological Society of Washington* **108**: 643 – 648.
- Linné, C.**, 1758. *Systema Naturae per Regna tria Naturae, secundum classes, Ordines, Genera, Species, cum Characteribus, differentiis, Synonymis, Locis*, ed. **10. 1**: 1 – 824.
- Magalhães, C. & M. Türkay**, 1996a. Taxonomy of the Neotropical freshwater crab family Trichodactylidae I. The generic system with description of some new genera (Crustacea: Decapoda: Brachyura). *Senckenbergiana biologica, Frankfurt am Main*, **75** (1/2): 63 – 95.
- Magalhães, C. & M. Türkay**, 1996b. Taxonomy of the Neotropical freshwater crab family Trichodactylidae II. The genera Forsteria, Melocarcinus, Sylviocarcinus, and Zilchiopsis (Crustacea: Decapoda: Brachyura). *Senckenbergiana biologica, Frankfurt am Main*, **75** (1/2): 97 – 130.
- Magalhães, C. & M. Türkay**, 1996c. Taxonomy of the Neotropical freshwater crab family Trichodactylidae II. The genera Fredilocarcinus and Goyazana (Crustacea: Decapoda: Brachyura). *Senckenbergiana biologica, Frankfurt am Main*, **75** (1/2): 131 – 142.
- Manning, R. G. & H. H. Hobbs**, 1977. Decapoda. In Hurlbert D. H. *Biota acuatica de Sudamerica austral*. San Diego State University, San Diego, California: 157 – 162. *Südbrasilische Süss- und Brackwasser-Crustaceen nach Sammlungen des Dr. Reinh. Hensel*. *Archiv von Naturgesellschaft*, **35**: 1 – 37.
- Milne Edwards, A.** 1867. Description de quelques espèces nouvelles de Crustacés Brachyures. *Annales de la Société Entomologique de France*, series **4, 7**: 263 – 288.
- Milne Edwards, H.** 1853. Mémoire sur la famille des ocyropodiens. *Annales des Sciences Naturelle, Zoologie*, **20**: 163 – 228.
- Pretzmann, G.**, 1968. Die Familie Trichodactylidae (Milne Edwards, 1853) Smith. (Vorläufige Mitteilung) *Entomologisches Nachrichtenblatt, Wien*, **15** (7–8): 70 – 76.
- Rafinesque, L. S.** 1815. *Analyse de la Nature ou tableau de l'univers et des corps organisés*. 1 – 224.
- Rathbun, M. J.** 1893. Descriptions of new species of American freshwater crabs. *Proceedings of the United States National Museum*, **16** (959): 649 – 661.
- Rodríguez, G.**, 1992. The freshwater crabs of America. Family Trichodactylidae and supplement to the family Pseudothelphusidae. *Fauna Tropicale*, **31**: 1 – 189.
- Rodríguez G. & Campos, M. R.** 1989. Cladistic relationships of

freshwater crabs of the tribe Strengerianini (Decapoda: Pseudothelphusidae) from the northern Andes, with comments on their Biogeography and descriptions of new species. *Journal of Crustacean Biology*, **9**: 141 – 156.

Rodríguez G. & Campos, M. R. 1998. A cladistic revision of the genus *Fredius* (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae) and its significance to the biogeography of the Guianan lowlands of South America. *Journal of Natural History*, **32**: 673 – 775.

Rodríguez G. & Campos, M. R. & B. López 2002. New species and records of pseudothelphusid crabs (Crustacea, Brachyura) from Colombia in the Tulane Natural History Museum. *Tulane Studies in Zoology and Botany*, **31**: 1 – 17.

Rodríguez, G. & H. Suárez 2001. Anthropogenic dispersal of Decapod Crustaceans in aquatic environment. *Interciencia*, **26** (7): 282 – 288.

Smalley, A. & G. Rodríguez, 1972. Trichodactylidae from Venezuela, Colombia and Ecuador (Crustacea, Brachyura). *Tulane Studies in Zoology and Botany*, **17**: 41 – 55.

Smithe, F. B. 1975. Naturalist's color guide. The American Museum of Natural History, New York. Part I: unnumbered pages.

Recibido el 23 de febrero de 2005.

Aceptado para su publicación el 9 de marzo de 2005.

CRÍTICA A LA ASIGNACIÓN DE LA CATEGORÍA DE AMENAZA DE *GASTROTHECA RUIZI* (AMPHIBIA: ANURA: HYLIDAE).

por

Jonh Jairo Mueses-Cisneros*

Resumen

Mueses-Cisneros, J.J.: Crítica a la asignación de la categoría de amenaza de *Gastrotheca ruizi* (Amphibia: Anura: Hylidae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 303-308, 2005. ISSN 0370-3908.

Gastrotheca ruizi ha sido considerada por **Estupiñán** (2004) como una especie En Peligro (EN) de acuerdo con las categorías de amenaza de la UICN por presentar un areal pequeño, fragmentado o fluctuante: B1 ab (iii); sin embargo a partir de colecciones y observaciones de campo actuales realizadas en el Valle de Sibundoy, departamento del Putumayo - Colombia (localidad típica de la especie), se obtuvo información suficiente para rechazar su asignación anterior y reasignarla dentro de la categoría de Casi Amenazado (NT). Se plantea además como una medida fundamental para la protección de esta especie endémica, incluir los hábitats donde vive dentro del Sistema de Áreas Protegidas de Colombia.

Palabras clave. Colombia, Anfibios amenazados, *Gastrotheca ruizi*.

Abstract

Gastrotheca ruizi is considered by **Estupiñán** (2004) as an Endangered Species (EN), using the threat category of the UICN because it has a small area of distribution, broken into fragments or fluctuating: B1 ab (iii); however, recent collections and field observations in the Valle de Sibundoy, Putumayo Department, Colombia (type locality of the species) provide sufficient information to reject the previous classification and propose the reassignment in the Nearly Threatened (NT) category. Lastly, as a fundamental measure for the protection of this endemic species, it is proposed to include the habitats where the species lives in the Sistema de Áreas Protegidas de Colombia.

Key words. Colombia, Threatened Amphibians, *Gastrotheca ruizi*.

* Biólogo. Laboratorio de anfibios, Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia. E-mail: jjmueses@hotmail.com, jjmueses@yahoo.com

Introducción

Gastrotheca ruizi es una especie endémica del Valle de Sibundoy el cual se localiza al oriente del Nudo de los Pastos en el departamento del Putumayo - Colombia a 1° 05' - 1° 12' N y 76° 53' - 77° 00' W. entre 2000 – 3500 m.; en él, están presentes además *Gastrotheca andaquiensis* y *G. nicefori* (Duellman, 1989; Mueses-Cisneros, 2004), de quienes se diferencia por la ausencia de desarrollo directo, la ausencia de coosificación craneal (presente en *G. nicefori*) y ausencia de calcares y procesos supraciliares (presentes en *G. andaquiensis*).

Desde 1984 (anterior a la fecha de su descripción) hasta ahora, no se tenía ningún registro de la especie por lo que se presumía que actualmente sus poblaciones estaban en declive; esto sumado a su endemidad, la llevó inmediatamente a ser propuesta como posible especie en amenaza; sin embargo, y pese a la escasez de información con que se contaba y luego de realizar un viaje a la localidad donde habita *G. ruizi* para determinar el estado actual de sus poblaciones, Estupiñán (2004) propone que la especie se debe asignar a la categoría de En Peligro (EN) por presentar un areal pequeño, fragmentado o fluctuante: B1 ab (iii).

Materiales y Métodos

Entre diciembre de 2003 y febrero de 2004 (época seca), se llevan a cabo muestreos nocturnos con un mínimo de tres horas y un máximo de cinco horas diarias en seis localidades ubicadas en la parte plana del Valle de Sibundoy, donde se sabía habitaba *Gastrotheca ruizi* hasta 1984; se hizo además un recorrido de 5 kilómetros aproximadamente a lo largo del cauce viejo del río Putumayo efectuando registros auditivos.

En julio de 2004 (época lluviosa) se realizan muestreos adicionales en seis localidades más, capturando adultos y renacuajos, pero principalmente realizando registros auditivos. A esta información de campo se suma la obtenida a partir de la bibliografía disponible.

Las categorías de amenaza son las mismas empleadas por Rueda-Almonacid *et al.* (2004), (IUCN Red List Categories, versión 3.1". [IUCN, 2001]) y se sigue el procedimiento por ellos propuesto.

Los ejemplares examinados hacen parte de la colección de anfibios del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (ICN).

Se presenta además una estimación del número de machos que fueron escuchados cantando, en cada una de las localidades muestreadas.

Resultados y Discusión

Gastrotheca ruizi Duellman and Burrowes, 1986.

· *Gastrotheca ruizi* Duellman and Burrowes, 1986, Occas. Pap. Mus. Nat. Hist. Univ. Kansas, 120: 2. Holotipo: KU 200000. Localidad típica: Santiago, Municipio de Mocoa, Intendencia [= Departamento] del Putumayo, Colombia (77°00'W, 01°05'N, 2250 m).

Material examinado. (32) COLOMBIA. Putumayo. Valle de Sibundoy, Municipio de Colón, Vereda El Carmelo, 2060 m (ICN 48003-22); Municipio de Sibundoy, 2220 m. (ICN 2891-2, 1633-5, 1637, 2611, 4736-7); Municipio de Sibundoy, Vereda Leandro Agreda, cauce viejo Río Putumayo, frente a la finca del señor Alberto Juajibioy, 2060 m. (ICN 48023-5); Municipio de Sibundoy, Canal C, 500 metros después del Instituto Tecnológico del Putumayo (ITP) vía Colón - Sibundoy, 2060m. (ICN 48026; renacuajos).

Localidades muestreadas (Capturas y/o registros auditivos).

COLOMBIA. Putumayo. Valle de Sibundoy (Figura 1):

1. Municipio de Colón, Vereda El Carmelo, 2060 m.

El lugar se caracteriza por presentar un cuerpo de aguas relativamente quietas de 40 centímetros de profundidad y 2 metros de ancho (en época seca), con predominio de platanillo (*Hedychium coronarium*) hacia sus bordes. A lo largo de este cauce existen potreros utilizados para ganadería, cultivos y algunas viviendas.

Número estimado de machos cantando: 50–100. (en época lluviosa fueron escuchados únicamente entre 5-10 machos).

2. Municipio de Santiago, límite con Colón, por “La Troncal”. Finca del señor Braulio Muriel, 2060 m.

Siguiendo el cuerpo de agua de la localidad anterior en dirección sudoccidental hasta su unión con el cauce viejo del río Putumayo se llega a esta localidad; abundan los totorales que son sitios encharcados con predominio de *Eleocharis sp.* y *Scirpus californicus* (Cyperaceae) de hasta 3 metros de altura.

Número estimado de machos cantando: 100 – 200.

3. Municipio de Santiago, Vereda San Andrés, 2100 m.

Saliendo de la vereda San Andrés en dirección al Municipio de Santiago, se encuentra un totoral de *Scirpus*

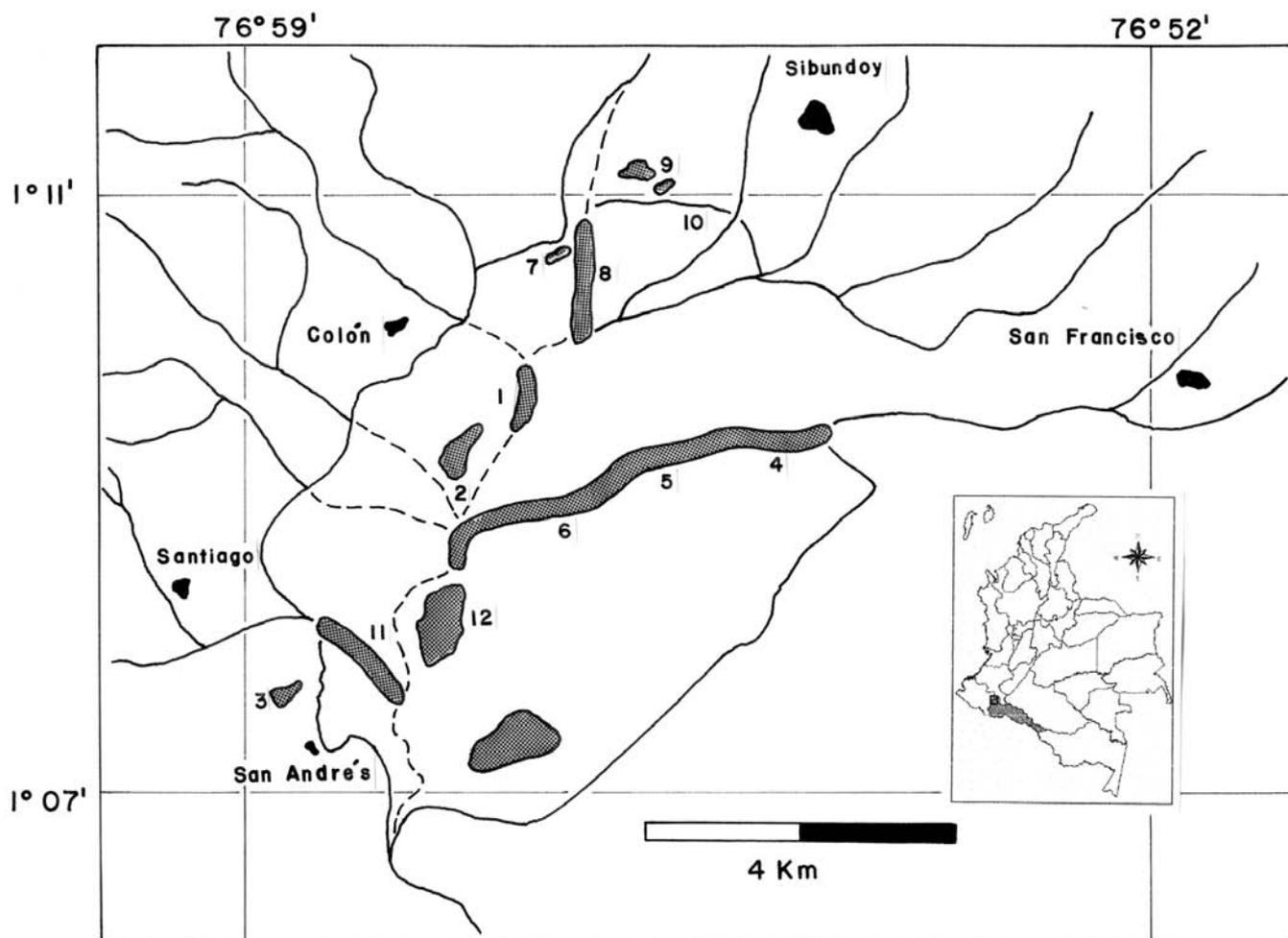


Figura 1. Localidades muestreadas y algunas de las zonas de la parte plana del Valle de Sibundoy propuestas para ser incluidas dentro del sistema de áreas protegidas de Colombia. Los números representan las localidades muestreadas (ver texto para explicación); Cauces actuales de los ríos en líneas continuas; Cauces antiguos en línea interrumpida; Áreas sombreadas: zonas propuestas para conservación.

californicus de hasta 2 metros de altura, rodeado por potreros y cultivos de frijol.

Número estimado de machos cantando: 100 – 200.

4-6. Recorrido desde Sibundoy, Vereda “Las Planadas” por el cauce viejo del río Putumayo hasta el límite entre Colón y Santiago por “La Troncal”, 2060 m. (Figura 1).

Antiguamente el río Putumayo atravesaba el Valle de Sibundoy aproximadamente por la mitad en dirección nororiente - sudoccidente; pero su cauce fue cambiado (conduciéndolo por el sur, cercano a las faldas de las cordilleras) debido a la canalización que se llevó a cabo en los años 50's - 60's con el fin de adecuar estas tierras para

la agricultura y la ganadería; el cauce antiguo es lo que hoy en día conocemos como cauce viejo del río Putumayo. Tal cauce está constituido por un cuerpo de aguas quietas con algunas interrupciones debido a la construcción de caminos que conducen hasta algunas fincas. De acuerdo con las observaciones de campo se identificaron como mínimo tres poblaciones bien definidas; aunque según Lynch (conv. pers.) en un cauce continuo se podrían reconocer poblaciones cada 200 metros; por lo tanto, queda en disputa la existencia de tres o más poblaciones en esta “localidad”.

Aunque los registros fueron auditivos, de manera inicial se realizó una recolección en la siguiente localidad, la cual está incluida en el recorrido:

Municipio de Sibundoy, Vereda Leandro Agreda, cauce viejo río Putumayo, frente a la finca del señor Alberto Juajibioy, 2060 m. (Figura 1).

El lugar está compuesto por aguas quietas con mucha materia orgánica en descomposición sobre las que crecen *Scirpus californicus* y varias especies de la familia Asteraceae y Poaceae.

Número estimado de machos cantando: 1000 - 1500.

7. Municipio de Colón, Vereda “Las Palmas”, cerca al Canal, 2060 m. (Figura 1).

Es un humedal en el que crece de manera predominante *Scirpus californicus* de aproximadamente 1.5 metros de altura; se localiza cerca a la carretera junto al canal y se encuentra rodeado de potreros los cuales son utilizados para ganadería.

Número estimado de machos cantando: 80 – 100.

8. Municipio de Colón, cauce viejo del río San Pedro, 2060 m. (Figura 1).

El lugar presenta características similares al cauce viejo del río Putumayo, con potreros para uso ganadero a los márgenes.

Número estimado de machos cantando: 300 – 500.

9. Municipio de Colón, Corregimiento de San Pedro, entre el corregimiento y la carretera que conduce al Instituto Tecnológico del Putumayo (ITP), 2060 m. (Figura 1).

Son unos pequeños parches de *Scirpus californicus* y zanjas en medio de potreros y cultivos de frijol.

Número estimado de machos cantando: 50.

10. Municipio de Sibundoy, Canal C., 500 metros después del Instituto Tecnológico del Putumayo (ITP) vía Colón - Sibundoy, 2060m. (Figura 1).

A lo largo del camino existe una zanja de aproximadamente 3 metros de ancho en la que crece *Scirpus californicus* de hasta 3 metros de altura. Estas zanjas limitan con algunas casas, potreros y cultivos en toda su extensión.

Número estimado de machos cantando: 100 – 150.

11. Municipio de Santiago, cauce viejo río Quinchoa, 2040 m. (Figura 1).

Ambiente similar a los cauces anteriormente mencionados; en un pequeño tramo, la vegetación ha sido reem-

plazada por potreros los cuales se encuentran parcelados y con uso para ganadería.

Número de machos cantando: 200 – 300.

12. Municipio de Santiago, vereda San Agustín. 2060 m. (Figura 1).

Es una extensión bastante conservada en la que predomina *Scirpus californicus* de hasta 2.5 metros de altura., limita con potreros que son utilizados para ganadería.

Número de machos cantando: 300 – 500.

Distribución. Conocida únicamente en Colombia, departamento del Putumayo, Valle de Sibundoy. Se amplía su rango de distribución altitudinal inferior (*sensu Mueses - Cisneros*, 2004) a 2040 m.

Historia Natural. *Gastrotheca ruizi* habita en áreas abiertas de la parte plana del Valle donde existen cuerpos de aguas quietas (como zanjas de drenaje y en algunos tramos de los llamados “cauces viejos”), en cuerpos de agua con algo más de movimiento con vegetación en sus bordes o también en los llamados “totorales” que son humedales con predominio de *Scirpus californicus* de hasta 2.5-3 metros de altura y de *Eleocharis sp.*

Contrario con **Estupiñán** (2004), la especie no es arborícola, pues la vegetación existente en los bordes de los cuerpos de agua donde *G. ruizi* habita, está constituida por hierbas y pequeños arbustos, no árboles.

La especie es simpátrica en todas las localidades con *Eleutherodactylus unistrigatus*.

Situación actual y amenazas. Lastimosamente el que no se hayan encontrado ejemplares de la especie desde la fecha de su descripción no significa que esta haya desaparecido, que sea inminente su desaparición o contrario a lo que afirma **Estupiñán** (2004) que *Gastrotheca ruizi* sea rara, o que la especie posiblemente se encontraba en franca declinación incluso antes de ser descrita. A pesar de que la UICN acepta estimaciones, inferencias y proyecciones, no se debe asignar una categoría a un taxón con suposiciones o con datos no confirmados; en realidad el problema que existía para el caso de esta especie, es que desde su descripción nadie había realizado recolecciones en el Valle de Sibundoy, pues de hacerlo hubieran comprobado que *G. ruizi* es muy abundante, a pesar de que tal abundancia es difícil de estimar por la dificultad de su captura y por la cantidad de machos que cantan a la vez.

Si bien es cierto que hasta el momento *Gastrotheca ruizi* es endémica del Valle de Sibundoy, que su areal es

pequeño (aproximadamente 17 x 12 km., cerca de 200 km²) y que se ha observado una disminución a través del tiempo relacionada con su área de ocupación; al ser evaluada, la especie no cumple con las condiciones planteadas para ser asignada dentro de la categoría de En Peligro (EN) ya que solamente se cumple uno de los dos subcriterios mínimos exigidos, por lo tanto la categoría no es válida.

Con la información real obtenida se hizo la evaluación respectiva proponiendo así su reasignación a la categoría de Casi Amenazado (NT) ya que para la especie, no se satisfacen los criterios para las categorías de “En Peligro Crítico”, “En Peligro” ni “Vulnerable”, pero está cercana a calificar como Vulnerable o podría entrar en esta categoría en un futuro cercano.

Contrario con **Estupiñán** (2004), la potrerización o sabanización ha sido un fenómeno presente en el Valle de Sibundoy incluso desde antes de que la especie fuese encontrada por primera vez, lo que significa que *Gastrotheca ruizi* “siempre” ha estado sujeta a este fenómeno; quizá a esta razón se deba su simpatria con *Eleutherodactylus unistrigatus* y el que los hábitats que ellas prefieren sean no boscosos, muy intervenidos y cercanos a lugares donde habita la gente.

El problema que actualmente enfrenta la especie es que *G. ruizi* habita en la parte plana del Valle donde predominan los cultivos y/o potreros para ganadería, que dicha actividad continúa en incremento y con ella, el uso inadecuado y excesivo de agroquímicos para la fumigación. A esto se suma la limpieza de zanjas y cuerpos de agua adyacentes a los cultivos y/o potreros, eliminando los arbustos y hierbas los cuales son fundamentales para el establecimiento de la especie. Este hecho se observa claramente en la localidad uno, donde *Gastrotheca ruizi* únicamente habita en la pequeña extensión del cauce de agua donde la vegetación adyacente no ha sido tumbada, mientras que en el resto del cauce la especie no está presente.

Para el caso del cauce viejo del río Putumayo y del río Quinchoa se le suma un problema leve de contaminación, pero que igualmente debe ser frenado.

Otro hecho que podría dificultar el establecimiento futuro de las poblaciones de *Gastrotheca ruizi* es la parcelación y destrucción de los humedales (Totorales) para uso de la agricultura y/o ganadería, actividades que son realizadas por sus dueños de forma acelerada cuando existe una buena oferta para cultivar; de esta manera, lo que hoy es un “totoral” con vegetación de ciperáceas de hasta 2.5 metros de altura, perfectamente en 20 días puede ser una

extensión lista para ser cultivada; por esta razón se plantea desde ahora (y no después cuando la especie en realidad esté amenazada), la posibilidad de que estos humedales sean incluidos dentro del sistema de áreas protegidas de Colombia (ver adelante).

Medidas de conservación tomadas. Contrario con **Estupiñán** (2004), la sospecha de que la especie probablemente se encuentre en el Parque Nacional Natural Alto Fragua - Indi Wasi, no es ninguna medida de conservación tomada sino una medida a tomar en el caso de que esto fuera real; por lo tanto, hay que ser sensatos y aceptar que hasta el momento ni esta, ni ninguna otra especie de anfibios del Valle de Sibundoy ha tenido un trato especial ni una medida destinada a su conservación.

En julio de 2004 se realizó la primera divulgación y socialización de este proyecto con resultados muy favorables; ahora el objetivo es vincular a más personas y entidades en campañas para el conocimiento y protección de esta y de las otras especies de anuros encontradas en este lugar.

Medidas de conservación propuestas. Si bien es cierto que actualmente los peligros de amenaza para las poblaciones de *Gastrotheca ruizi* son menores y que para los conservacionistas es mucho más conveniente el que la especie esté catalogada como “En Peligro” antes que en “Casi Amenazado”, también es cierto que esta asignación se debe hacer con información real; sin embargo, el compromiso como investigador es informar que existe una especie endémica, que su área de ocupación es pequeña y que si la comunidad local desconoce esto, ni se toman medidas desde ahora, probablemente en un futuro el establecimiento de *Gastrotheca ruizi* podría estar en peligro. Por esta razón se plantea como medidas el incluir a los humedales y cauces viejos de los ríos dentro del sistema de áreas protegidas de Colombia (Figura 1); la cual debe ser estudiada con representantes del gobierno, ONG’s, administraciones municipales, cabildos indígenas, investigadores y dueños de los predios. A esto se debe sumar una verdadera campaña informativa y participativa con los habitantes de la región.

Queda entonces en consideración esta propuesta que de hecho favorecería tanto a *G. ruizi* como también a muchas otras especies e incluso de otros grupos animales (principalmente de aves) y vegetales que hasta el momento todavía no han sido caracterizadas.

Agradecimientos

Al Dr. John D. Lynch, por su asesoría, sus aportes y correcciones, su ayuda en la construcción del mapa, por

su dirección durante el proyecto y por todo lo que me ha enseñado.

A toda mi familia por su inmenso apoyo y logística durante la fase de campo.

A David Antonio Sánchez, Camilo Barrera y Pablo Jamioy, por su colaboración y compañía en algunos de los muestreos; por ayudarme a demostrar la presencia actual de *Gastrotheca ruizi* en el Valle de Sibundoy.

Al profesor Julio Betancur, por su ayuda en la determinación botánica.

A Conservación Internacional-Colombia que mediante el programa de Becas para la Iniciativa de Especies Amenazadas Jorge Ignacio Hernández-Camacho financió el proyecto: "Evaluación del estado poblacional de *Atelopus aff. ignescens* y *Gastrotheca ruizi* en el Valle de Sibundoy, Alto Putumayo - Colombia".

Literatura Citada

- Duellman, W. E.** 1989. Lista Anotada y Clave de los Sapos Marsupiales (Anura: Hylidae: *Gastrotheca*) de Colombia. *Caldasia* **16** (76): 105-111.
- Duellman, W. E. & P. A. Burrowes.** 1986. A new species of Marsupial Frog (Hylidae: *Gastrotheca*) from the Andes of southern Colombia. *Occ. Pap. Mus. Nat. Hist. Univ. Kansas*. 120: 1-11.
- Duellman, W. E. & D. Hillis.** 1987. Marsupial Frogs (Anura: Hylidae: *Gastrotheca*) of the Ecuadorian Andes: Resolution of Taxonomic Problems and Phylogenetic Relationships. *Herpetologica*, **43** (2): 141-173.
- Estupiñán, R. A.** 2004. Rana Marsupial de Ruiz. *Gastrotheca ruizi*. pp. 278-282 en **Rueda-Almonacid, J. V., J. D. Lynch & A. Amézquita** (Eds.). 2004. Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservación Internacional Colombia, Instituto de Ciencias Naturales - Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia.
- Mueses-Cisneros, J. J.** 2004. Estudio Preliminar de la Fauna Amphibia del Valle de Sibundoy, Alto Putumayo - Colombia. Trabajo de Grado, Inédito. Universidad Nacional de Colombia, 170.
- Rueda-Almonacid, J. V., J. D. Lynch & A. Amézquita** (Eds.). 2004. Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservación Internacional Colombia, Instituto de Ciencias Naturales - Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia, 7-98.

Recibido el 15 de septiembre de 2004

Aceptado para su publicación el 1° de marzo de 2005