

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXI

DICIEMBRE DE 2007

NÚMERO 121

DIRECTOR DE LA REVISTA: PEDRO PRIETO



## CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
<b>Biología (Biology)</b>			
Elementos para la elaboración del Libro Rojo de hongos royas de Colombia [Elements toward a Red Book on rusts of Colombia] <i>Dubnerney García G., Pablo Buriticá C. &amp; Luis Guillermo Henao M.</i> .....	449	[Synthesis and characterization of al-pillared clays: effect of the interlayer charge on the modification by intercalating-pillaring process] <i>Luis Alejandro Galeano, Rafael Molina &amp; Sonia Moreno G.</i> .....	521
New section and new species of a bluing <i>Psilocybe</i> (Fungi, Basidiomycotina, Agaricales) from Colombia [Nueva sección y nueva especie de <i>Psilocybe</i> (Fungi, Basidiomycotina, Agaricales) que se mancha de azul de Colombia] <i>Gastón Guzmán, Ana Esperanza Franco-Molano &amp; Florencia Ramírez-Guillén</i> .....	469	Estudio de las reacciones de hidrólisis y condensación del titanio en presencia de acetilacetona [Study of the hydrolysis and condensation of titanium in the acetylacetone solution] <i>A. M. Guzmán, A. M. Fernández, Y. Franco, J.H. Bautista, &amp; J. E. Rodríguez-Páez</i> .....	529
Análisis fotoquímico y de actividad biológica del musgo <i>Polytrichum juniperinum</i> [Phytochemical analysis and biological activity of moss <i>Polytrichum juniperinum</i> ] <i>Johanna Morantes, Catalina Prieto, Edgar Linares, Javier Rincón &amp; Fabio Aristizábal</i> .....	473	Caracterización fisicoquímica de arcillas del municipio de Guapi – Costa Pacífica Caucana (Colombia) [Physical chemistry characterization of clays From Guapi at Cauca's Pacific Coast] <i>R. A. Muñoz Meneses, J. A. Muñoz Chaves, P. Mancilla &amp; J. E. Rodríguez-Páez</i> .....	537
<b>Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)</b>			
Significado geológico y asociaciones palinológicas de las formaciones Diablo Inferior (Mioceno Tardío) y San Fernando Superior (Mioceno Medio), Piedemonte cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. [Geologic meaning and palynological assemblages of the Diablo Inferior (Late Miocene) and San Fernando Superior (Middle Miocene) Formations. Llanos Orientales Foothills. Colombia] <i>Hernando Dueñas Jiménez &amp; Thomas van der Hammen</i> ....	481	Los óxidos cerámicos como materiales termoelectricos [Oxide ceramics as thermoelectric materials] <i>Julio E. Rodríguez López</i> .....	545
El Albedo Terrestre [Earth Albedo] <i>Joaoquin Pelkowski</i> .....	499	<b>Zoología (Zoology)</b>	
Situación de los invertebrados acuáticos introducidos y transplantados en Colombia: antecedentes, efectos y perspectivas [Situation of the invertebrates introduced and transplanted in Colombia: antecedents, effects and perspectives] <i>Ricardo Álvarez León &amp; Francisco de Paula Gutiérrez-Bonilla</i> .....			
<b>Constitución de la Academia</b> (Members of the Academy) .....			
<b>Publicaciones de la Academia</b> (Publications of the Academy) .....			
<b>Química (Chemistry)</b>			
Síntesis y caracterización de arcillas pilarizadas con aluminio: efecto de la carga interlaminar sobre la modificación por intercalación-pilarización			578

# **ELEMENTOS PARA LA ELABORACIÓN DEL LIBRO ROJO DE HONGOS ROYAS DE COLOMBIA**

**Por**

**Duberney García-G.<sup>1</sup>, Pablo Buriticá-C.<sup>2</sup> & Luis Guillermo Henao-M.<sup>3</sup>**

## **Resumen**

**García-G., D., P. Buriticá-C., & L. Henao-M.:** Elementos para la elaboración del Libro Rojo de hongos royas de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **31**(121): 449-468, 2007. ISSN 0370-3908.

Se realizó una revisión del estado de conocimiento científico de los uredinales, haciendo énfasis en las especies conocidas para Colombia, con una revisión y evaluación, por parte de especialistas botánicos, del grado de amenaza de los hospedantes conocidos, con el fin de iniciar la preparación del libro rojo de hongos royas de Colombia. Los resultados muestran que la mayoría de colecciones se han realizado sobre plantas arvenses, con pocos registros sobre plantas silvestres y amenazadas, debido al tipo de muestreo. Se propone una estrategia para conocer la cantidad real de royas en peligro en Colombia.

**Palabras clave:** royas, libros rojos de hongos, endófitos, uredinales, Colombia.

## **Abstract**

A review of the scientific knowledge of Uredinales was conducted, making emphasis in the registered Colombian species, with a review of the host list and evaluation, by botanical specialists, of the degree of threat of its known hosts in order to prepare the red book of rust fungi of Colombia. The results show how the majority of collections have been performed on weeds, with a few records on wild or endangered plants, what could be ascribed to the sampling types. A strategy to know the real quantity of rusts threatened in Colombia is proposed.

**Key words:** rusts, red books of fungi, endophytes, uredinales, Colombia.

---

1 Biólogo. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

2 Profesor titular. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

3 Director. Fundación Inguedé: Elementos para la elaboración del Libro Rojo de Hongos Royas de Colombia.

### El libro rojo de hongos royas de Colombia

La gestión ambiental orientada a la conservación y uso sostenible de la biodiversidad requiere identificar cuáles especies silvestres están registrando de manera gradual una disminución en sus poblaciones naturales. En el caso de los micromicetos, las royas tienen un especial interés debido a su estrecha relación con sus hospedantes, lo cual permite abordar metodológicamente la tarea del libro rojo buscando la amenaza que se cierne sobre éstos. Se suministró el listado actualizado de royas y hospedantes a botánicos que conocen bien la flora de Colombia, los cuales dieron su criterio sobre el estado de conservación. Se consultó también la base de datos Global Compendium of Weeds

La elaboración de listas rojas de especies convocan muchas organizaciones y al estado; en Europa el ECCF (European Committee for Conservation of Fungi) tiene representantes de casi toda la Unión, para lo cual las listas rojas son una herramienta fundamental. Sin embargo, el esfuerzo alrededor de los micromicetos ha hecho que la Iniciativa Darwin creara un proyecto sólo para éstos (Conservation of Microfungi - a voice for unprotected and vulnerable organisms). Este proyecto de 3 años de duración, comenzado en mayo del 2007, trabaja actualmente para iniciar un movimiento global por la conservación de microhongos, incluyendo a las royas entre sus cuatro líneas de acción << <http://www.cybertruffle.org.uk/darwin-microfungi/index.htm> >>. Por parte de la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN), se creó un Grupo de Especialistas para [1] ascomicetos no formadores de líquenes y hongos conidiales, [2] royas y carbonos y [3] cromistas, quitridios, mixomicetos y zigomicetos. Los miembros de este grupo preparan y publican la evaluación de la conservación global de micromicetos para el Foro de Biodiversidad del Convenio de Biodiversidad CBD 2010. La elaboración de libros rojos de especies amenazadas ha sido emprendida en Colombia por el Comité de Categorización de Especies, con sede en el Ministerio de Medio Ambiente; el listado de royas amenazadas sería la primera contribución sobre hongos que realice el Comité.

Al analizar el listado de hospedantes, se encontró que muchas de las plantas listadas no son nativas de Colombia; otras son malezas o plantas asociadas (las categorías de la UICN fueron diseñadas sólo para poblaciones 'silvestres'), para lo que aplica la categoría LC (preocupación menor), en caso de ser nativas; otras son plantas cultivadas, entonces la categorización es procedente sólo si Colombia es el sitio de origen. Para varios

hospedantes no se tienen aún datos ni categorías, ni siquiera preliminares, vacíos que se espera subsanar en el futuro, a medida que se vayan categorizando los diversos grupos.

El hecho de que sólo se conozca un pequeño porcentaje de las especies de royas de Colombia, debido al bajo nivel de muestreo en zonas de gran diversidad de hospedantes potenciales, nos indica que el grado de amenaza de royas de Colombia está aún lejos de conocerse. Esta situación es común en zonas tropicales, agravada por la falta de definiciones universales, información comprehensiva y terminología de estados esporales y tipos ciclos de vida que sean aceptables a todos los investigadores, incluyendo los de royas tropicales (Hiratsuka, 2005). Aún así, de cada 10 colecciones de campo en Colombia se obtiene un nuevo registro bien de hospedante, localidad o de especie. Estos antecedentes nos impulsaron a conocer sus causas y las posibles soluciones para poder contar con una herramienta que sirva para proteger estos importantes elementos de los socioecosistemas del país.

### Las colecciones de uredinales

Las royas, al igual que otros hongos, han sido abordadas como 'enfermedades' de las plantas cultivadas. El paso lógico para profundizar en su conocimiento ha sido el estudio de las acompañantes de los cultivos, las plantas arvenses, caso similar al de los hongos entomopatógenos, cuyo estudio en poblaciones silvestres ha sido iniciado sólo recientemente (Sanjuán *et al.*, 2001). Al realizar una revisión de los hospedantes de royas que han sido descritas para el país, se ha encontrado que los uredinólogos coleccionan en cultivos y a orillas de las carreteras y sólo ocasionalmente muestrean alguna planta silvestre de fácil acceso, sin que haya una propuesta sistemática de colección en ecosistemas naturales.

### Los Uredinales

Los Uredinales son organismos que pertenecen al Reino Fungi (verdaderos hongos), Phylum Basidiomycota (presenta basidio y basidiósporas), Clase Teliomycetes (tienen fragmobasidio), Orden Uredinales (hipobasidio y basidiósporas sobre esterigmas) (Kirk *et al.*, 2001). Son conocidos como royas o polvillos en el argot popular y constituyen el grupo de hongos más numeroso, uniforme y bien caracterizado, asociado al mayor número de plantas vivas y en activo crecimiento.

Hennen & McCain (1993) calculan que existe una especie de uredinal por cada 16 especies de plantas de la

flora de los Estados Unidos. Una proyección global de este indicador, sobre 270.000 especies de plantas descritas (Swerdlow, 1999) o sobre 320.000 según Prance *et al.* (2000), muestra que deberían existir entre 16.800 y 20.000 especies de Uredinales, más del doble de lo registrado actualmente. Si el número total de especies de plantas fuera 2.700.000, el número de especies de Uredinales sería 43.200. Usando el mismo indicador para la situación colombiana Pardo-Cardona (2001) indica que deberían existir 3.125 especies de Uredinales, es decir sólo se conoce, actualmente, el 10 por ciento de las especies teóricamente presentes.

En Colombia, donde los estudios sobre los Uredinales se han realizado con intensidad en los últimos 10 años, la experiencia indica que se ha doblado el número de especies conocidas desde la década del 50 del siglo XX y se siguen colectando y describiendo nuevas especies con la misma intensidad, siendo el 60 por ciento registros de especies previamente conocidas en otros lugares del globo que estaban presentes, pero no habían sido colectadas o fueron introducidas con las plantas hospedantes, normalmente de cultivo (Buriticá, 2003). Por otro lado, el 40 por ciento son especies nuevas y aún falta por coleccionar en muchas regiones, entre ellas las más ricas en abundancia y diversidad de plantas (al menos el 60% del país), además falta por describir un sinnúmero de plantas (Colombia puede tener el doble de lo registrado actualmente). Es de observar que las especies de Uredinales vivos pueden llegar a decrecer por la desaparición de sus hospedantes.

### ¿Cómo están organizadas?

Como otros hongos, las royas poseen soros morfológicamente distintos en sus diferentes etapas del ciclo de vida, que están separados en el tiempo y en hospedantes distanciados filogenéticamente, además de estar aislados geográficamente o simplemente no conectados con ningún teleomorfo conocido. El anamorfo es el principal estado encontrado, colectado, nocivo a las plantas y, muchas veces, el único que se tiene para una completa determinación taxonómica.

El Código Internacional de Nomenclatura Botánica (McNeill *et al.*, 2007) en sus últimas sesiones ha aceptado que a los anamorfos de los hongos se les provea de una descripción morfológica adecuada y se les den nombres válidos según todas las normas, y recomienda que, una vez se conozca el teleomorfo, éste sea el nombre válido de la especie, instaurándolo al holomorfo.

La descripción morfológica en detalle de los anamorfos, independientemente de la posición que tengan en el

ciclo de vida de la especie uredinal, ha facilitado la comprensión del papel de cada uno de ellos, del ciclo de vida mismo y en especial de los uredinales autoicos, especialmente tropicales, en donde se da la mayor confusión, al presentarse toda una gama de anamorfos similares o distintos morfológicamente, pero con distinta función en el ciclo de vida ("De Bary's morphologic system", de acuerdo con Hennen & Hennen, 2000).

Cummins & Hiratsuka (1983) reconocen 105 géneros de Uredinales, Kirk *et al.* (1996) registran 164 y alrededor de 139 sinónimos. Situación taxonómica normal si se tiene en cuenta que se han publicado algunos nuevos y se ha revisado el *status* de otros a la luz de la introducción de nuevas valoraciones taxonómicas de ciertas estructuras (*i.e.* *Ravenelia* Berkeley y *Kernkampella* Rajendren, disco pateliforme). Las nuevas e intensas colecciones en el Neotrópico (Colombia y Brasil) han permitido conocer al menos diez nuevos géneros en distintas familias y es posible que la lista se incremente. Las revisiones monográficas de las familias Pucciniosiraceae (Buriticá & Hennen, 1980), Phakopsoraceae (Buriticá & Hennen, 1994; Buriticá, 1998, 1999a, 1999b) y Chaconiaceae (Ono & Hennen, 1983) han contribuido a delimitar más consistentemente muchos de los géneros y sus especies. Pero, subsisten algunos puntos de criterio que deben ser estudiados para clarificar la situación de varios géneros.

### ¿Cuál es su origen y de dónde vienen?

Los principales eventos encontrados en los Uredinales respecto a la evolución con sus hospedantes y en la morfología, indican cinco grandes sucesos:

1. Las especies ancestrales sólo son reconocidas por la presencia del basidio y porque son autoincompatibles (ciclo de vida no expandido). Los anamorfos para la reproducción asexual aparecieron posteriormente, lo mismo que las estructuras sexuales definidas, reunidos en el espermogonio y el anamorfo asociado que restituye el heterocarión y da lugar al anamorfo de rápida multiplicación asexual que finalmente termina en el teliomorfo (ciclo de vida expandido, autoico o heteroico), la separación en dos hospedantes dio lugar al fenómeno del heteroicismo, mecanismo de defensa y adaptación al clima (estaciones o invierno-verano muy contrastante), al hábito de crecimiento del hospedante (evidente en Poaceae y Cyperaceae, especialmente). La transición de autoincompatible a autocompatible permitió reducir el ciclo de vida por la vía endofiloide (en especies heteroicas) o aumentar la capacidad de multiplicación de las especies autoicas de ciclo de vida no expandido (no es reconocible el drás-

tico cambio ocurrido, excepto por la alta especificidad en el hospedante y su posición en la escala evolutiva) (**Buriticá, 2001**).

2. La relación parasitaria con los hospedantes es tan antigua como el origen mismo de los Uredinales y del hospedante. Actualmente, el hospedante es parte integral y primaria del ambiente requerido por el uredinal (estrecha coevolución) (**Buriticá, 2001**).

3. La obtención de alimento, la morfología general de las estructuras (soros) y la producción de esporas han estado en función de la genética y del tejido del hospedante, de su forma de liberación, de su producción en alto número y de la facilidad de diseminación para encontrar nuevos hospedantes o seguirlos en su ascenso evolutivo.

4. La evolución funcional de los soros y las esporas ha estado estrechamente ligada al hábito de los hospedantes y en todos los casos ha sido para seguirlos estrechamente, bien en su colonización de ecosistemas o bien en su hábito de crecimiento. El potencial epidémico, evidencia de un desequilibrio, se expresa debido a que el ser humano reúne en un mismo sitio gran cantidad de hospedante al hacer agricultura.

5. La relación de parasitismo obligado de los Uredinales y las plantas debe ser muy antigua y debe suponerse establecida desde el origen mismo de las plantas. De acuerdo con **Buriticá (1995)** el autotrofismo y heterotrofismo nacieron paralelamente en el caldo de la vida en las aguas marinas. Si no hubiera sido así, el experimento de la vida hubiera fracasado en su propia "basura". Muchos organismos y entre ellos algunos protohongos en sus relaciones primarias con las protoplasmas adquirieron un hábito estrecho de convivencia hasta llegar a ser totalmente dependientes (simbiosis, endofitismo, parasitismo obligado): *i.e.* Uredinales en el follaje, endomicorizas en las raíces. La relación ancestral estrecha de la asociación de dependencia dio origen al parasitismo obligado (**Buriticá, 1995**).

Los Uredinales, propiamente dichos, se colocan razonablemente como punto de partida a los que se encuentran sobre Pteridófitos: helechos y *Selaginella* (desafortunadamente no se sabe nada de su teliomorfo). Dos corrientes se han sugerido: la primera que considera el género *Uredinopsis* Magnus sobre *Osmunda* como el más primitivo ("fósil viviente") (**Savile, 1955**) y la segunda que postula el género *Uncol* Buriticá & Rodríguez sobre Polypodiaceae. *Uredinopsis* tiene ciclo de vida expandido heterocariótico (*Osmunda-Abies*) y está presente en climas templados, caracteres derivados antes que ancestrales. Recientemente se ha demostrado mediante técnicas moleculares que *Milesina*

Magnus es más antiguo que *Uredinopsis* y que la familia Polypodiaceae es ancestral respecto a la Osmundaceae, lo que hace que *Uncol* y *Desmella* Sydow sean unos buenos candidatos para establecer el punto de partida de la filogenia de los Uredinales modernos (**Buriticá, 2001**), más si se tiene en cuenta como lo postula **Leppik (1973)** que "Presumiblemente las royas ancestrales vivieron en los trópicos, difiriendo poco de los basidiomicetos ancestrales".

### Siendo parásitos obligados, ¿cómo han logrado asociarse a un gran y diverso grupo de plantas?

En primer lugar, puede mencionarse la relación ancestral con las plantas vía autoicismo y coevolución. La diversidad manifiesta en los distintos grupos de plantas, que ancestralmente han tenido un origen filogenético común, ha permitido que mediante coevolución, los Uredinales las sigan y elaboren su propia diversidad (divergencia y radiación con los hospedantes **Hennen & Buriticá, 1980**). Estudios sobre coevolución de Uredinales y plantas hospedantes se han realizado en varios grupos, demostrándose claramente que han sido fuente de origen de grupos y especies nuevos. Las modificaciones genéticas del hospedante, su adaptación a nuevos ambientes y elaboración de mecanismos de defensa han ejercido la presión externa para que los Uredinales también se adapten, elaboren sus estructuras para las nuevas circunstancias y en últimas se formen nuevas entidades reconocibles como especies.

La evidencia complementaria es derivada del fenómeno de "memoria genética" que recientemente se ha evidenciado y comprobado en varios casos, como el de *Eucalyptus*, género de la familia Myrtaceae que evolucionó en Australasia aislado de otros miembros de la misma familia presentes en Sur América, que una vez introducido al nuevo mundo fue afectado por *Puccinia psidii* Winter, patógeno nativo local sobre gran número de especies de Myrtaceae, especialmente en el género *Psidium*. Asimismo, la especie asiática *Kweilingia divina* (H. Sydow) Buriticá fue introducida al Neotrópico con su hospedante *Bambusa vulgaris* Schrader y en esta localidad encontró hospedantes nativos bambusoides, como *Guadua angustifolia* Kunth. Los dos casos son una clara evidencia de una relación muy antigua con base en ancestros comunes o al menos con una base genética homóloga que el uredinal tiene la capacidad de reconocer independientemente de lo aislada que haya sido la evolución de cada una de las especies de hospedantes.

En segundo lugar se encuentra la amplia diversidad genética de los Uredinales para el parasitismo vía heteroi-

cismo, expuesta para la colonización de distintos hospedantes (salto a nuevos hospedantes no relacionados). **Leppik** (1953) al sustentar su hipótesis de la “escalera hologenética” muestra, en esencia, como los basidiósporas tienen mayor capacidad genética (menos especialización parasítica) para colonizar nuevos hospedantes alejados filogenéticamente del primario que mantiene el telomorfo y en los cuales han desarrollado los órganos sexuales (espermogonio: hifas receptivas y espermacios) y las primeras esporas anamórficas con la nueva carga heterocariótica que reconoce su hospedante ancestral en el cual se originaron y que produce las teliósporas, fenómeno conocido como heteroicismo y de expansión del ciclo de vida, “jumps to new, unrelated hosts” (**Hennen & Buriticá**, 1980). **Arthur** (1934) complementa la hipótesis al postular las “especies correlacionadas” y la “Ley de Tranzschel”, que hacen referencia a las especies (muchas de ellas plenamente reconocidas) de ciclo reducido derivadas de las de ciclo expandido. **Jackson** (1931) analizó críticamente la reducción del ciclo de vida con base en las especies heteroicas y el origen de nuevas especies y **Buriticá & Hennen** (1980) demuestran el origen de las familias Endophyllaceae y Puccinosiraceae en la reducción del ciclo de vida de especies de ciclo de vida completamente expandido. El proceso se explica en las dos etapas por la expansión y reducción del ciclo de vida. Expansión ha significado colonización de nuevos hospedantes, mientras que reducción significa ganancia en la coadaptación con una especie para la conquista de nuevos ecosistemas (**Buriticá**, 2000). La conquista de las grandes alturas en los trópicos ha significado una estrecha relación con los hospedantes y una reducción en el ciclo de vida, géneros como *Baeodromus* Arthur, *Chardonella* Kern, *Chrysopsora* Lagerheim, etc. son una clara evidencia de este fenómeno, aspecto que es consistente cuando se han colonizado ecosistemas de condiciones extremas: corta estación de crecimiento (límite ártico y antártico), zonas desérticas o de climas contrastantes húmedo-seco.

Un poco menos conocido y documentado, para explicar el origen de nuevas especies, es el fenómeno de la plasticidad de la heterocariosis (más de un núcleo haploide en una célula) presente en los hongos. Fenómeno que ha sido estudiado extensivamente en la formación de razas que afectan variedades de los cultivos o que crecen en medios de cultivo con distintos nutrientes. Los hongos en general pasan su mayor parte de la vida en estado heterocariótico (dos o más núcleos haploides por célula), condición que pueden variar rápidamente, de acuerdo con el ambiente en donde se desarrollan o alimentan, simplemente al modificar el balance de los núcleos en el heterocarión (se compor-

tan como un nuevo individuo). El alto número de especies encontradas en ciertos hospedantes, sus variedades y razas es clara insinuación del uso de este mecanismo, como parte de la microcoevolución patógeno-hospedante-ambiente.

### ¿Cuántas plantas afectan?

En el argot de los uredinólogos la frase “...en donde hay una planta hay la probabilidad de encontrar una roya” es de uso frecuente, interpretando el alto número de especies que han seguido a las plantas a todos los sitios de la tierra.

En los dos grandes grupos de plantas Criptógamas y Fanerógamas se encuentran los hospedantes del ciento por ciento de los Uredinales. **Hennen & Buriticá** (1980) sostienen que sus parientes cercanos se encuentran en la familia Platyglloeaceae, géneros *Jola* Moller, *Eocronartium* Atkinson, *Herpobasidium* Lind y *Platycarpa* Couch que son parásitos de las Briófitas, conocidas como musgos.

En las Criptógamas, recientemente **Hennen** (1997) ha registrado la especie *Uredo vetus* Hennen sobre *Selaginella* sp. (Pteridófitos, Lycopsida), es decir los Uredinales han acompañado a las plantas vivas por al menos 395 millones de años (período Devoniano). No se incluyen los fósiles que han sido encontrados y asignados como Uredinales, con los cuales el tiempo de las estrechas relaciones con las plantas sería mucho más antiguo. Este Uredinal y los encontrados en los verdaderos helechos (Pteridófitos, Pteropsida) se consideran primitivos; siendo los que parasitan Polypodiaceae, especialmente los géneros *Uncol* Buriticá & Rodríguez y *Desmella* Sydow (Cyathaceae y Polypodiaceae), los ancestrales según **Buriticá** (2001). Al menos otros tres géneros prevalentes en clima templado: *Uredinopsis* Magnus, *Milesina* Magnus y *Hyalopsora* Magnus y la especie *Puccinia lygodii* Arthur (dudosamente un verdadero *Puccinia*) los parasitan. El número de especies apenas llega al 0,5% del total, mientras el número de géneros (6) son el 5%. Las nuevas expediciones a lugares tropicales están permitiendo encontrar nuevos individuos con características novedosas que permiten nuevas interpretaciones.

En las plantas pertenecientes a la Clase Liliopsida, con alrededor de 50.000 especies (**Cronquist**, 1981) que ocupan todos los ecosistemas y son de distribución universal, se presenta alrededor del 15% del total de especies de Uredinales, algunas de las cuales de gran importancia económica al atacar plantas de cultivo, especialmente en la familia Poaceae: cereales y pastos. Respecto a los Uredinales presentes en los órdenes más abundantes y prevalentes: Cyperales (Cyperaceae y Poaceae), Arecales (Arecaceae, palmas) y Orchidales (4 familias, orquídeas),

es interesante observar que mientras el primero tiene alrededor de 700 especies en los otros dos sólo hay un reducido número, dos especies en Arecales y alrededor de 10 en Orchidales. Estas cifras pueden estar muy lejos de lo real, ya que colectar en estos dos últimos órdenes es bastante difícil, en las orquídeas por lo dispersas y aisladas (en efecto, muchas de las especies registradas en orquídeas han sido interceptadas en las aduanas de los Estados Unidos y no coleccionadas directamente en el campo, lo mismo ocurre para la familia Bromeliaceae) y en las palmas por lo altas y dispersas. La mayor concentración de especies de Uredinales se encuentra en la familia Pucciniaceae Chevalier y Phakopsoraceae Cummins & Hirasuka ex Buriticá & Hennen; los géneros: *Stereostromum* Magnus, *Cerradoa* Hennen & Ono, *Sphenospora* Dietel y *Kweilingia* Teng, son prácticamente exclusivos de la Clase Liliopsida.

En la clase Magnoliopsida, con alrededor de 165.000 especies (Cronquist, 1981) y miembros de distribución universal que ocupan todos los ecosistemas, se encuentran alrededor de 7000 especies de Uredinales, en el 80% de las familias. En todas las subclases: Magnoliidae, Hammamelidae, Caryophyllidae, Dilleniidae, Rosidae y Asteridae, se encuentran especies de Uredinales, siendo su mayor número en las subclases más evolucionadas (Rosidae y Asteridae) y que además cuentan con el mayor número de especies.

En la subclase Magnoliidae, que incluye los miembros más primitivos, como la familia Annonaceae, se encuentran Uredinales característicos (géneros: *Hennenia* Buriticá, *Dayspora* Berkeley & Curtis, *Batistopsora* Dianese, Medeiros & Santos) y exclusivos a esta familia por sus formas y ciclos de vida. En el género *Dasyspora* se presenta una relación única con un alga (*Stomatochroom*) y no se tiene una explicación biológica razonable (¿un proto-liquen?).

Algunas familias de los distintos órdenes se pueden considerar “centros de diversificación” dado que sobre ellas se encuentran diversos y particulares géneros específicos; así por ejemplo: en la Familia Asteraceae se encuentran: *Baeodromus* Arthur, *Chrysospora* Lagerheim, *Chardoniella* Kern, *Chrysocyclus* Sydow, *Chrysella* Sydow, *Cionothrix* Arthur (culminación en la familia Pucciniosiraceae); Sobre el orden Fabales (Familias Mimosaceae, Caesalpiniaceae y Fabaceae) se encuentran como típicos varios géneros, entre ellos: *Ravenelia* Berkeley, *Apra* Hennen & Freire, *Diabole* Arthur, *Dicheirinia* Arthur, *Dipyxis* Cummins & Baxter, etc.; en la familia Rosaceae: *Gerwasia* Raciborski, *Hamasporea* Koern, *Phragmidium* Link, *Tranzschelia* Arthur, *Kuehneola* Magnus, *Fromella* Cummins & Hiratsuka, etc.

Otras familias con géneros específicos son: Bignoniaceae (*Prospodium* Arthur), Euphorbiaceae (*Arthuria* Jackson, *Nothoravenelia* Dietel), Boraginaceae (*Alveolaria* Lagerheim, *Trichopsora* Lagerheim), Salicaceae (*Melampsora* Castagne), Rubiaceae (*Hemileia* Berkeley & Broome), Berberidaceae (*Edythea* Jackson), etc.

Algunos géneros de plantas con amplia distribución geográfica tienen un elevado número de especies de Uredinales, siendo algunas particulares a una localidad. En el género *Baccharis* (Asteraceae) se encuentra un buen ejemplo para el Neotrópico y evidencia de la coevolución y de la ley “el rango geográfico de los parásitos es más estrecho que el de sus hospedantes”.

Es evidente entonces, concluir que ningún otro grupo claramente definido de hongos tome tantas y diversas plantas como hospedantes como el orden Uredinales.

### ¿Dónde están?

“Presumiblemente las royas ancestrales vivieron en los trópicos, difiriendo poco de los basidiomicetos ancestrales” (Leppik, 1973) y a partir de allí siguieron a sus hospedantes a todos los ecosistemas ocupados por ellos.

Los Uredinales han seguido las plantas hasta los sitios de condiciones ambientales extremas: desde los sitios más húmedos del globo (el Chocó colombiano, por ejemplo), hasta los desiertos en donde crecen plantas (desierto de Sonora en América, por ejemplo) y desde las regiones tropicales más ardientes hasta las más gélidas (línea de nieves perpetuas en los Andes). Desde la latitud ecuatorial hasta las líneas más septentrional y austral en donde hay plantas; desde plantas terrestres hasta plantas acuáticas; desde plantas terrestres independientes hasta plantas parásitas; desde plantas a libre exposición hasta plantas bajo el dosel. En todos los ambientes, el común denominador es que los Uredinales se encuentran principalmente en las partes aéreas del follaje de las plantas.

Al contabilizar géneros y especies de Uredinales para distintos sitios geográficos se encuentra que hay un gradiente, en número y diversidad, que comienza en el trópico y va disminuyendo hacia los extremos latitudinales.

Es posible distinguir seis grandes zonas de diversidad de uredinales:

1. La encontrada en el trópico bajo y húmedo, en donde se presentan géneros y especies con características de ciclo de vida no expandido o parcialmente expandido, pared de las esporas delgadas, hialinas y sin presencia de estados de reposo. Por el número de géneros representa-

dos se puede considerar como región de la familia Chaconiaceae.

2. La encontrada al ascender en el perfil altitudinal de los Andes o de grandes alturas tropicales, en el cual se van encontrando géneros y especies endémicas (**Buriticá, 2000**) con características únicas especialmente derivadas de la evolución por la línea endofiloide; el endemismo se refleja hasta el punto que cada gran altura tiene su propia uredobiota. Región de la familia Pucciniosiraceae.

3. Se encuentra un centro de diversificación (adaptación previa al desierto para poder avanzar hacia el clima de estaciones) alrededor de la línea de transición entre el trópico y la zona templada. La flora y uredobiota de México, del Sur de los Estados Unidos e islas del Caribe en la misma latitud, contienen evidencias de esta tendencia. Hay una mezcla de elementos tropicales y de regiones templadas y un evidente acondicionamiento previo para sobrevivir y llegar a la región de condiciones de estaciones climáticas.

4. La uredobiota encontrada en regiones semi o desérticas. En ellas, los géneros encontrados contienen esporas compuestas (ravenelioides) y son de paredes gruesas. Región de la familia Raveneliaceae.

5. La uredobiota de las regiones templadas. En ella el patrón de ciclo de vida heteroico es prevalente, los géneros y especies encontrados tienen variaciones y adaptaciones de acuerdo con las estaciones. Las familias más características son Pucciniastraceae, Melampsoraceae (teliósporas cubiertas por el tejido del hospedante) y Cronartiaceae (hibernación en estados de anamorfo asociado con espermogonio, en algunos casos sistémicos). Géneros y especies típicas de los climas templados se encuentran en el trópico a alturas que reproducen, en parte, su clima original (altura en el trópico es equivalente a latitud); sin embargo, los ciclos de vida en estas especies tropicales son desconocidos, probablemente no se den las condiciones para que germinen sus teliósporas o no existen sus hospedantes alternos en condiciones propicias para ser infectados.

6. La uredobiota de sitios aislados que ha evolucionado debido a las influencias propias del lugar. *Uromycladium* McAlpine en Australia, *Diabole* Arthur en Cuba.

Es bien conocida y aplicable, a los Uredinales, la regla biológica: “el rango biogeográfico de los parásitos es más estrecho que el de sus hospedantes”. El maíz es parasitado por tres Uredinales (2 *Puccinia*, 1 *Phakopsora*); en el perfil altitudinal de los Andes donde se cultiva este cereal, desde el nivel del mar hasta los 3.000 metros de altitud, *Phakopsora zae* Buriticá se encuentra desde el

nivel del mar hasta los 1500 metros, *Puccinia sorghii* Schweinitz en las regiones bajas y *Puccinia polysora* Underwood en las regiones altas.

Para conquistar los distintos lugares del globo, los Uredinales han seguido sus hospedantes y en cada lugar han desarrollado sus propias estructuras para la adaptación climática y búsqueda de nuevos hospedantes.

### ¿Cómo sobreviven?

El problema biológico más importante que los Uredinales han debido superar es encontrar su hospedante. Para ello han desarrollado una alta capacidad de producción de esporas de distinto tipo (dos anamorfos, una telióspora y 4 basidiósporas) que aumentan la posibilidad de encontrarlos. El medio principal para la diseminación, de todos los tipos de esporas, son las corrientes de aire, estando algunas especies dotadas estructural y aerodinámicamente para la diseminación a larga distancia, ej. *Puccinia graminis* (diseminación horizontal). Para especies que parasitan hospedantes perennes, la tendencia ha sido manifiesta en favor de las esporas con un diseño aerodinámico para ascender hacia los tejidos nuevos del hospedante (diseminación vertical), circunstancia evidente en *Hemileia* (esporas de forma arriñonada) y *Prospodium* (esporas aladas en su ornamentación). Se ha sugerido que algunas formas de *Ravenelia* reproducen la forma y el tamaño de los granos de polen de las plantas hospedantes (subfamilia Mimosoideae) para ser llevados por los mismos vectores de ellos (**Savile, 1976**).

Casi todas las especies parásitas sobre especies de cultivos han sido diseminadas por el hombre en el material asexual de propagación (*Puccinia horiana* Hennings, roya blanca del crisantemo, en esquejes), sus vestiduras (*Hemileia vastatrix* por los cosecheros dentro de Colombia) o porque ha hecho cultivos “salteados” que permiten que los Uredinales que los afectan encuentren una vía continua para estar en todos los sitios en donde se localizan los cultivos, caso evidente con la caña de azúcar en el Caribe y la dispersión de *Puccinia melanocephala* Sydow.

### Especies de royas registradas para Colombia

A continuación se presenta una lista de las especies de royas registradas para Colombia con sus respectivos hospedantes, de acuerdo con la revisión realizada por **Buriticá & Pardo-Cardona (1996)** y posteriores registros (**Salazar y Buriticá 2004, Buriticá y Salazar 2007**).



**Tabla 1.** Lista de royas registradas para Colombia con sus hospedantes (Modificado de Buriticá y Pardo-Cardona, 1996)

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
Pucciniaceae	<i>Puccinia lantanae</i> Parl.	<i>Elytraria acaulis</i> Lindau	Acanthaceae
	<i>Puccinia lateripes</i> Berk. & Ravenel	<i>Blechum pyramidatum</i> (Lam.) Urban	
		<i>Blechum brownii</i> Juss	
	<i>Puccinia paranahybae</i> Henn.	<i>Justicia</i> aff. <i>secunda</i> Vahl.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia bomareae</i> Henn.	<i>Bomarea</i> aff. <i>caldasii</i> (Kunth) Asch. & Graebn.	Alstroemeriaceae
		<i>Bomarea patacocensis</i> Herb.	
	<i>Puccinia pallor</i> Arthur & Holw.	<i>Bomarea caldasii</i> (Kunth) Asch. & Graebn.	
		<i>Bomarea patacocensis</i> Herb.	
Anamorfos	<i>Uredo cyathulae</i> Mayor	<i>Cyathula achyranthoides</i> (Kunth) Moq.	Amaranthaceae
Pucciniaceae	<i>Puccinia macropoda</i> Speg.	<i>Iresine</i> sp.	
	<i>Uromyces iresines</i> Lagerh.	<i>Iresine diffusa</i> Humb. Bonpl. ex Willd.	
Anamorfos	<i>Uredo hypoxidis</i> (Bres.) Henn.	<i>Hypoxis decumbens</i> L.	Amaryllidaceae
		<i>Hypoxis</i> sp.	
Uropixidaceae	<i>Dasyscypha gregaria</i> (Kunze) Henn.	<i>Xylopi</i> sp.	Annonaceae
Sphaerophragmiaceae	<i>Hennelia ditelia</i> Buriticá	<i>Annona</i> sp.	
Phakopsoraceae	<i>Phakopsora neocheimoliae</i> (Cummins) Buriticá & Henn.	<i>Annona cherimola</i> Mill.	
Coleosporiaceae	<i>Coleosporium plumierae</i> Pat.	<i>Plumiera alba</i> L.	Apocynaceae
		<i>Plumiera rubra</i> L.	
		<i>Plumiera</i> sp.	
Chaconiaceae	<i>Hemileia colombiana</i> Buriticá	Apocinaceae indet.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia obliqua</i> Berk. & M.A. Curtis	<i>Mesechites trifida</i> Jacq.) Mull. Arg.	
Phakopsoraceae	<i>Crossospora stevensii</i> Syd.	<i>Mandevilla</i> aff. <i>mollissima</i> (Kunth) K. Schum	
Anamorfos	<i>Uredo anthurii</i> Har.	<i>Anthurium</i> sp.	Araceae
Pucciniaceae	<i>Cerradoa palmae</i> Hennen & Ono	Areceaceae indet.	Areceaceae
Anamorfos	<i>Uredo calotropsidis</i> Cummins	<i>Calotropis procera</i> (Aiton) W.T. Aiton	Asclepiadaceae
Phakopsoraceae	<i>Crossospora mateleae</i> Dale	<i>Matelea</i> sp.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia obliqua</i> Berk. & M.A. Curtis	<i>Exolobus</i> sp.	
	<i>Uromyces asclepiadis</i> Cooke	<i>Asclepias curassavica</i> L.	
Anamorfos	<i>Uredo cundinamarcensis</i> Mayor	<i>Apium ternatum</i> Thell.	Apiaceae
Pucciniaceae	<i>Puccinia arracachae</i> Lagerh. & Lindr.	<i>Arracacia xanthorrhiza</i> Bancr.	
	<i>Puccinia hydrocotyles</i> Cooke	<i>Hydrocotyle asiatica</i> L.	
		<i>Hydrocotyle humboldtii</i> A. Rich.	
	<i>N. ternata</i> (Willd. ex Schult.) Mathias & Constance	<i>Hydrocotyle leucocephala</i> Cham. & Schldl.	
		<i>Hydrocotyle quinqueloba</i> Ruiz & Pav.	
		<i>Hydrocotyle umbellata</i> L.	
		<i>Hydrocotyle</i> sp.	
	<i>Puccinia ruizensis</i> Mayor	<i>Oreomyrhis andicola</i> (Kunth) Hook.	
	<i>Trichobasis pimpinellae</i> (F. Strauss) Cooke	<i>Pimpinella anisum</i> L.	
Anamorfos	<i>Aecidium liabi</i> Mayor	<i>Liabum igniarium</i> (Bonpl.) Less	Asteraceae
		<i>Liabum melastomoides</i> (Kunth) Less.	
	<i>Aecidium parmense</i> Mayor	<i>Eupatorium obscurifolium</i> Hieron	
	<i>Aecidium spagazzinii</i> De Toni	<i>Erigeron bonariensis</i> L.	
	<i>Uredo anisoderma</i> Syd.	<i>Vernonia</i> aff. <i>mollis</i> Kunth	
	<i>Uredo baccharidis-anomala</i> Mayor	<i>Baccharis anomala</i> D.C.	
	<i>Uredo diplostephii</i> F. Kern & Thurst.	<i>Diplostephium eriophorum</i> Wedd.	
		<i>Eupatorium densum</i> Benth	
		<i>Eupatorium guadalupense</i> Spreng	
		<i>Eupatorium iresinoides</i> Kunth	
		<i>Eupatorium vargassianum</i> DC.	
	<i>Uredo gynoxidis</i> H.S. Jacks. & Holw.,	<i>Gynoxys</i> aff. <i>sancti-antonii</i> Cuatrec.	
Coleosporiaceae	<i>Coleosporium eupatorii</i> Arthur	<i>Eupatorium macrophyllum</i> L.	
	<i>Coleosporium vernoniae</i> Berk. & M.A. Curtis	<i>Elephantopus mollis</i> H.B.K.	
		<i>Elephantopus scaber</i> L.	
		<i>Elephantopus</i> sp.	
		<i>Pseudoelephantopus spicatus</i> (Juss.) Vahl	
		<i>Vernonia mollis</i> Kunth	

Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
Endophyllaceae	<i>Endophyllum decoloratum</i> (Schwein.) Whetzel & Olive	<i>Clibadium surinamense</i> L.	
		<i>Clibadium zarucchi</i> H. Rob.	
		<i>Wedelia carnososa</i> Rich. ex Pers.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia tenacetii</i> DC var. <i>dracunculina</i> (Fahr.) Cummins	<i>Artemisa dracunculus</i> L.	
	<i>Chrysopsora gynoxidis</i> Lagerh.	<i>Gynoxys</i> sp.	
	<i>Puccinia ancizari</i> Mayor	<i>Baccharis nitida</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	
	<i>Puccinia baccharidis-rhexioides</i> Mayor	<i>Baccharis rhexioides</i> Kunth	
	<i>Puccinia barranquillae</i> Mayor	<i>Spilanthes urens</i> Jacq.	
	<i>Puccinia beckii</i> Mayor	<i>Vernonia cotoneaster</i> (Willd. ex Spreng.) Less.	
	<i>Puccinia bimbergi</i> Mayor	<i>Heliopsis oppositifolia</i> (L.) Druce	
	<i>Puccinia caeomatiformis</i> Lagerh.	<i>Baccharis floribunda</i> Kunth	
		<i>Baccharis latifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	
		<i>Baccharis pululahuensis</i> Hieron.	
	<i>Puccinia calae</i> Arthur	<i>Calea glomerata</i> Klatt.	
	<i>Puccinia cnicio-oleracei</i> Pers.	<i>Erigeron uliginosus</i> Benth.	
		<i>Sonchus oleraceus</i> L.	
	<i>Puccinia conoclinii</i> Seym.	<i>Ageratum ballotaefolium</i> (Maguire, Steyerf. & Wurdack) R.M. King & H. Rob.	
		<i>Ageratum conyzoides</i> L.	
	<i>Puccinia chrysanthemi</i> Roze	<i>Chrysanthemum</i> sp.	
	<i>Puccinia enceliae</i> Dietel & Holw.	<i>Eupatorium pycnocephalum</i> Less.	
		<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl.) A. Gray	
	<i>Puccinia eupatorii-columbiani</i> Mayor	<i>Eupatorium columbianum</i> Heering	
	<i>Puccinia eupatoriicola</i> Mayor	<i>Eupatorium vargassianum</i> DC.	
	<i>Puccinia evadens</i> Harkn.	<i>Baccharis cassinifolia</i> DC.	
	<i>Puccinia ferox</i> Dietel & Holw.	<i>Verbesina nudipes</i> S.F. Blake	
		<i>Verbesina verbascifolia</i> Walp.	
		<i>Verbesina</i> sp.	
	<i>Puccinia garcilassae</i> Pardo-Card.	<i>Garcilassa rivularis</i> Poepp.	
	<i>Puccinia gnaphaliicola</i> Henn.	<i>Gnaphalium spicatum</i> Lam.	
	<i>Puccinia helianthi</i> Schwein.	<i>Helianthus annuus</i> L.	
	<i>Puccinia hieracii</i> (Röhl.) H. Mart.	<i>Hieracium</i> sp.	
	<i>Puccinia horiana</i> Henn.	<i>Chrysanthemum</i> sp.	
	<i>Puccinia immensispora</i> F. Kern & Thurst.	<i>Diplostephium</i> sp.	
	<i>Puccinia interjecta</i> H.S. Jacks.	<i>Baccharis latifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	
	<i>Puccinia irregularis</i> Dietel	<i>Verbesina arborea</i> Kunth	
	<i>Puccinia liabi</i> Mayor	<i>Liabum hastatum</i> Britton	
	<i>Puccinia liabicola</i> F. Kern & Thurst.	<i>Liabum</i> sp.	
	<i>Puccinia majuscula</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Senecio</i> sp.	
	<i>Puccinia maverhansi</i> Mayor	<i>Baccharis nitida</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	
		<i>Baccharis orinocensis</i> DC.	
	<i>Puccinia melampodii</i> Dietel & Holw.	<i>Acmella cf. mutisii</i> (Kunth) Cass.	
		<i>Calendula officinalis</i> L.	
		<i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.	
		<i>Eleutheranthera rudelaris</i> (Sw.) Sch. Bip.	
		<i>Emilia coccinea</i> (Sims.) G. Don	
		<i>Eupatorium turbacense</i> Hieron	
		<i>Spilanthes ciliata</i> Kunth	
		<i>Synedrella nodiflora</i> (L.) Gaertn.	
		<i>Wedelia caracasana</i> DC.	
		<i>Wedelia jacquinii</i> O.E. Schulz	
		<i>Wedelia trichostephia</i> DC.	
	<i>Puccinia montoyae</i> Mayor	<i>Baccharis floribunda</i> Kunth	
	<i>Puccinia montserrates</i> Mayor	<i>Baccharis bogotensis</i> Kunth	
	<i>Puccinia mutisiae</i> Lagerh.	<i>Jungia</i> sp.	
	<i>Puccinia nariuensis</i> F. Kern & Whetzel	<i>Eupatorium</i> sp.	

Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
	<i>Puccinia neorotundata</i> Cummins	<i>Vernonia brasiliiana</i> (L.) Druce	
		<i>Vernonia patens</i> Kunth	
		<i>Vernonia scabra</i> Pers.	
		<i>Vernonia</i> sp.	
	<i>Puccinia ovedaeae</i> Mayor	<i>Ovedaea</i> aff. <i>buphthalmoides</i> D.C.	
	<i>Puccinia polymniae</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Polymnia pyramidalis</i> Triana	
		<i>Polymnia riparia</i> Kunth	
	<i>Puccinia samperi</i> Mayor	<i>Chaenocephalus arboreus</i> (Kunth) O. Hoffm.	
	<i>Puccinia schistocarphae</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Schistocarpha eupatoroides</i> (Fenzl.) Kuntze	
		<i>Schistocarpha</i> sp.	
	<i>Puccinia spegazzinii</i> De Toni	<i>Mikania cordifolia</i> (L. F.) Willd.	
		<i>Mikania micrantha</i> Kunth	
		<i>Mikania scandens</i> (L.) Willd.	
		<i>Mikania</i> sp.	
	<i>Puccinia spilanthisicola</i> Mayor	<i>Spilanthes americana</i> Hieron	
		<i>Spilanthes ciliata</i> Kunth	
	<i>Puccinia steiractinia</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Steiractinia klatti</i> (B.L. Rob. & Greenm.) S.F. Blake	
		<i>Steiractinia</i> sp.	
		<i>Steiractinia rosei</i> S.F. Blake	
	<i>Puccinia tageticola</i> Dietel & Holw.	<i>Tagetes microglossa</i> Benth.	
		<i>Tagetes patula</i> L.	
	<i>Puccinia tolimensis</i> Mayor	<i>Eupatorium turbacense</i> Hieron	
		<i>Eupatorium</i> sp.	
	<i>Puccinia variabilis</i> Grev.	<i>Taraxacum officinale</i> Weber ex F.H. Wigg.	
	<i>Puccinia vernoniae-mollis</i> Mayor	<i>Vernonia mollis</i> Kunth	
		<i>Vernonia</i> sp.	
	<i>Puccinia xanthii</i> Schwein.	<i>Xanthium cavanillesii</i> Schouw	
		<i>Xanthium</i> sp.	
	<i>Puccinia zexmenicola</i> F. Kern, Cif. & Thurst.	<i>Zexmenia iners</i> S.F. Blake	
	<i>Uromyces bidenticola</i> Arthur	<i>Bidens bipinnata</i> L.	
		<i>Bidens cynapiifolia</i> Kunth	
		<i>Bidens pilosa</i> L.	
		<i>Bidens squarrosa</i> Kunth	
	<i>Uromyces bidentis</i> Lagerh.	<i>Bidens pilosa</i> L.	
	<i>Uromyces columbianus</i> Mayor	<i>Melanthera aspera</i> (Jacq.) Steud. ex Small	
	<i>Uromyces megalosporus</i> Spig.	<i>Tessaria integrifolia</i> Ruiz & Pav.	
	<i>Uromyces polymniae</i> (Henn.) Dietel & Holw.	<i>Polymnia glabrata</i> DC.	
Puccinosiraceae	<i>Cionothrix praelonga</i> (G. Winter) Arthur	<i>Eupatorium conyzoides</i> Mill.	
		<i>Eupatorium inulaefolium</i> Kunth	
		<i>Eupatorium morifolium</i> Mill.	
		<i>Eupatorium odoratum</i> L.	
		<i>Eupatorium pomaderrifolium</i> Benth.	
		<i>Eupatorium popayanense</i> Hieron.	
		<i>Eupatorium tacotanum</i> Klatt.	
		<i>Eupatorium tequendemense</i> Hieron.	
		<i>Eupatorium thyrigerum</i> Hieron	
		<i>Eupatorium</i> sp.	
	<i>Chardonella gynoxidis</i> F. Kern	<i>Eupatorium pomaderrifolium</i> Benth.	
		<i>Eupatorium</i> sp.	
		<i>Gynoxys</i> sp.	
	<i>Dietelia portoricensis</i> (Whetzel & L.S. Olive) Buriticá & J.F. Hennen	<i>Mikania guaco</i> Bonpl.	
	<i>Puccinosira arthurii</i> Buriticá & J.F. Hennen	<i>Eupatorium gracile</i> Kunth	
		<i>Eupatorium macrophyllum</i> L.	
		<i>Eupatorium</i> sp.	
Anamorfos	<i>Aecidium andinum</i> Dietel & Neger	<i>Berberis rigidifolia</i> Kunth ex DC.	Berberidaceae
Pucciniaceae	<i>Edythea berberidis</i> (Lagerh.) H.S. Jacks.	<i>Berberis glauca</i> DC	
	<i>Edythea tenella</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Berberis goudotti</i> Triana & Planch	

Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
Pucciniastraceae	<i>Melampsorium hiratsukanum</i> S. Ito ex Hirats. f.	<i>Alnus acuminata</i> Kunth	Betulaceae
Anamorfos	<i>Uredo garcesii</i> (F. Kern & Thurst.) Buriticá	<i>Arrabidaea magnifica</i> Sprague ex Steenis	Bignoniaceae
Phakopsoraceae	<i>Phragmidiella holwayi</i> (H.S. Jacks.) Buriticá	<i>Arrabidaea magnifica</i> Sprague ex Steenis	
Uropixidiaceae	<i>Prosopidm appendiculatum</i> (G. Winter) Arthur	<i>Tecoma stans</i> (L.) C. Juss. ex Kunth	
Phakopsoraceae	<i>Crossopora bixae</i> Buriticá	<i>Bixa orellana</i> L.	Bixaceae
Pucciniaceae	<i>Puccinia bombacis</i> Dietel	<i>Bombax sp.</i>	Bombacaceae
Anamorfos	<i>Aecidium tournefortiae</i> Henn.	<i>Tournefortia bicolor</i> Sw.	Boraginaceae
	<i>Uredo cordiarum</i> F. Kern & Whetzel	<i>Cordia cylindrostachya</i> (Ruiz & Pav.) Roem. & Schult.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia heliotropii</i> F. Kern & Kellerm.	<i>Heliotropium indicum</i> L.	
Puccinosiraceae	<i>Alveolaria cordiae</i> Lagerh.	<i>Cordia acuta</i> Pittier	
		<i>Cordia ferruginea</i> (Lam.) Roem. & Schult.	
		<i>Cordia laxiflora</i> Kunth	
		<i>Cordia sp.</i>	
Anamorfos	<i>Uredo nidularii</i> Henn.	<i>Guzmania sp.</i>	Bromeliaceae
Pucciniaceae	<i>Puccinia thaliae</i> Dietel	<i>Canna coccinea</i> Mill.	Cannaceae
		<i>Canna edulis</i> Ker Gawl	
		<i>Canna indica</i> L.	
		<i>Canna sp.</i>	
Pucciniaceae	<i>Uromyces dianthi</i> (Pers.) Niessl	<i>Dianthus caryophyllus</i> L.	Carvophyllaceae
	<i>Puccinia arenariae</i> (Schum.) Winter	<i>Dianthus caryophyllus</i> L.	
Pucciniaceae	<i>Uromyces betae</i> (Pers.) J.G. Kühn	<i>Beta vulgaris</i> L.	Chenopodiaceae
Anamorfos	<i>Uredo clusiae</i> Arthur	<i>Clusia sp.</i>	Clusiaceae
Phakopsoraceae	<i>Phakopsora tecta</i> H.S. Jacks. & Holw.	Commelinaceae indet.	
Pucciniaceae	<i>Uromyces commelinae</i> Cooke	Commelinaceae indet.	
	<i>Uredo commelinae</i> Speg.	<i>Callisia repens</i> (Jacq.) L.	
		<i>Commelina diffusa</i> Burm. f.	
		<i>Commelina elegans</i> Kunth	
		<i>Tradescantia cumanensis</i> Kunth	
		<i>Tradescantia gracilis</i> Kunth	
		<i>Tradescantia multiflora</i> L.	
Coleosporiaceae	<i>Coleosporium ipomoeae</i> (Schwein.) Burrill	<i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.	Convolvulaceae
		<i>Ipomoea carnea</i> Jacq.	
		<i>Ipomoea tiliacea</i> (Willd.) Choisy.	
		<i>Ipomoea sp.</i>	
		<i>Jacquemontia sp.</i>	
		<i>Quamoclit angulata</i> (Lam.) Bojer.	
		<i>Quamoclit coccinea</i> (L.) Moench.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia crassipes</i> Berk. & M.A. Curtis	<i>Ipomoea batatas</i> L. Lam.	
		<i>Ipomoea tiliacea</i> (Willd.) Choisy.	
		<i>Ipomoea sp.</i>	
	<i>Puccinia lithospermi</i> Ellis & Kellerm.	<i>Evolvulus villosus</i> Ruiz & Pav.	
		<i>Evolvulus sp.</i>	
	<i>Puccinia puta</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Ipomoea carnea</i> Jacq.	
Pucciniaceae	<i>Uromyces guraniae</i> Mayor	<i>Gurania sp.</i>	Cucurbitaceae
	<i>Uromyces novissimus</i> Speg.	Cucurbitaceae indet.	
		<i>Melothria guadalupensis</i> (Spreng.) Cogn.	
Anamorfos	<i>Uredo nociviola</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Cyperus ferax</i> Rich.	Cyperaceae
	<i>Uredo torulini</i> Henn.	<i>Torulinum ferax</i> (Rich.) Urb.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia abrepta</i> F. Kern	<i>Cyperus aff. caracasanus</i> Kunth.	
		<i>Cyperus sp.</i>	
	<i>Puccinia canaliculata</i> (Schwein.) Lagerh.	<i>Cyperus ferax</i> Rich.	
		<i>Cyperus sp.</i>	
	<i>Puccinia cyperi</i> Arthur	<i>Cyperus caracasanus</i> Kunth.	
		<i>Cyperus globulosus</i> Aubl.	
		<i>Cyperus mutisii</i> (Kunth) Andersson	
		<i>Erigeron bonariensis</i> L.	
	<i>Puccinia dichromenae</i> H.S. Jacks.	<i>Dichromena ciliata</i> Pers.	
		<i>Dichromena polystachys</i> Turill.	
		<i>Dichromena radicans</i> Schltdl. & Cham.	
		<i>Dichromena sp.</i>	

Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
	<i>Puccinia fimbriatylidis</i> Arthur	<i>Fimbriatylis annua</i> (All.) Roem. & Schult.	
	<i>Puccinia kyllingae-brevifoliae</i> Miura	<i>Kyllinga brevifolia</i> Rottb.	
		<i>Kyllinga odorata</i> Vahl.	
		<i>Kyllinga sp.</i>	
	<i>Puccinia marisci</i> Mayor	<i>Mariscus flavus</i> Vahl.	
		<i>Mariscus hermaphoroditus</i> (Jacq.) Urb.	
	<i>Puccinia oblongula</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Rynchospora sp.</i>	
	<i>Puccinia scleriae</i> (Pazschke) Arthur	<i>Scleria melaleuca</i> Rchb. ex Schldtl. & Cham.-	
		<i>Scleria neogranatensis</i> C.B. Clarke	
		<i>Scleria sp.</i>	
	<i>Puccinia subcoronata</i> Henn.	<i>Cyperus diffusus</i> Vahl.	
	<i>Uromyces antioquiensis</i> Mayor	<i>Rhynchospora polyphylla</i> (Vahl.) Vahl.	
	<i>Puccinia scleriae</i> (Pazschke) Arthur	<i>Scleria melaleuca</i> Rchb. ex Schldtl. & Cham.-	
Phakopsoraceae	<i>Phakopsora coca</i> Buriticá & J.F. Hennen	<i>Erythroxyllum sp.</i>	Erythroxylaceae
Anamorfos	<i>Aecidium detritum</i> Thüm.	<i>Phyllanthus salviifolius</i> Kunth	Euphorbiaceae
Melampsoraceae	<i>Melampsora euphorbiae</i> (C. Schub.) Castagne	<i>Euphorbia peplus</i> L.	
Chaoniaceae	<i>Olivea capituliformis</i> (Henn.) Arthur	<i>Alchornea sp.</i>	
Phakopsoraceae	<i>Arthuria columbiana</i> (F. Kern & Whetzel) Cummins	<i>Croton gossypifolius</i> Vahl.	
	<i>Phakopsora arthuriana</i> Buriticá & Henn.	<i>Jatropha curcas</i> L.	
		<i>Jatropha gossypifolia</i> L.	
Pucciniaceae	<i>Uromyces euphorbiae</i> (Schwein.) Cooke & Peck	<i>Chamaesyce brasiliensis</i> (Lam.) Small	
		<i>Chamaesyce hirta</i> (L.) Millsp.	
		<i>Chamaesyce hypericifolia</i> (L.) Millsp.	
		<i>Euphorbia pilulifera</i> L.	
	<i>Uromyces jatrophae</i> Dietel & Holw.	<i>Manihot esculenta</i> Crantz.	
	<i>Uromyces manihotis</i> Henn.	<i>Manihot esculenta</i> Crantz.	
	<i>Uromyces mayorii</i> Tranzschel	<i>Euphorbia orbiculata</i> Kunth	
Puccinosiraceae	<i>Puccinosira umanensis</i> Buriticá	<i>Acalypha sp.</i>	
Anamorfos	<i>Aecidium desmodii</i> Henn.	<i>Desmodium uncinatum</i> (Jacq.) DC.	Fabaceae
	<i>Uredo diocleicola</i> F. Kern & Thurst.	<i>Dioclea columbiana</i> Killip	
	<i>Uredo famelica</i> Arthur & Cummins	<i>Mucuna sp.</i>	
	<i>Uredo ingae</i> Henn.	<i>Inga sp.</i>	
	<i>Uredo mimosae-pudicae</i> (F. Kern, Thurst. & Whetzel) Buriticá	<i>Mimosa floribunda</i> Vent.	
		<i>Mimosa pudica</i> L.	
	<i>Uredo theresiae</i> Neger	<i>Crotalaria anagyroides</i> Kunth	
Chaoniaceae	<i>Chaconia ingae</i> (Syd.) Cummins	<i>Inga adenophylla</i> Pittier	
		<i>Inga edulis</i> Mart.	
		<i>Inga ingoides</i> (Rich.) Willd.	
		<i>Inga spuria</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	
		<i>Inga vera</i> Willd.	
		<i>Inga sp.</i>	
	<i>Chrysocelis lupini</i> Lagerh. & Dietel	<i>Lupinus bogotensis</i> Benth.	
		<i>Lupinus aff. mutabilis</i> Sweet.	
		<i>Lupinus sp.</i>	
Phakopsoraceae	<i>Crossopsora hymenaeae</i> Buriticá & J.F. Hennen	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	
		<i>Hymenaea sp.</i>	
	<i>Phakopsora meibomiaae</i> (Arthur) Arthur	<i>Aeschynomene americana</i> L.	
		<i>Aeschynomene ciliata</i> Vogel	
		<i>Aeschynomene sensitiva</i> Sw.	
		<i>Crotalaria incana</i> L.	
		<i>Crotalaria sp.</i>	

Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
		<i>Glycine max</i> (L.) Merr.	
		<i>Phaseolus coccineus</i> L.	
		<i>Phaseolus lunatus</i> L.	
		<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	
		<i>Phaseolus sp.</i>	
		<i>Teramnus uncinatus</i> (L.) Sw.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia arachidis</i> Speg. var. <i>arachidis</i> Speg.	<i>Arachis hypogaea</i> L.	
	<i>Uromyces appendiculatus</i> (Pers.) Link	<i>Phaseolus lunatus</i> L.	
		<i>Phaseolus vestitus</i> Hook.	
		<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	
		<i>Phaseolus sp.</i>	
	<i>Uromyces dolicholi</i> Arthur	<i>Cajanus cajan</i> (L.) Huth	
		<i>Cajanus indicus</i> Spreng	
		<i>Rhynchosia aff. longeracemosa</i> M. Martens & Galeotti	
		<i>Rhynchosia minima</i> (L.) DC.	
	<i>Uromyces hedysari-paniculati</i> (Schwein.) Farl.	<i>Desmodium mexicanum</i> Sweet.	
		<i>Desmodium scorpiurus</i> (Sw.) Desv.	
		<i>Desmodium tortuosum</i> (Sw.) DC.	
		<i>Desmodium sp.</i>	
	<i>Uromyces neurocarpi</i> Dietel	<i>Clitoria sp.</i>	
		<i>Martusia rubiginosa</i> (Juss. ex Pers.) Britton	
	<i>Uromyces striatus</i> J. Schröt.	<i>Medicago hispida</i> Gaertn.	
		<i>Medicago sativa</i> L.	
	<i>Uromyces trifolii</i> (R. Hedw.) Lév.	<i>Trifolium repens</i> L.	
	<i>Uromyces viciae-fabae</i> (Pers.) J. Schröt.	<i>Vicia faba</i> L.	
	<i>Uromyces vignae</i> Barclay	<i>Vigna luteola</i> (Jacq.) Benth.	
Raveneliaceae	<i>Dicheirinia binata</i> (Berk.) Arthur	<i>Erythrina glauca</i> Willd.	
		<i>Erythrina poeppigiana</i> (Walp.) O.F. Cook	
	<i>Dicheirinia manaosensis</i> (Henn.) Cummins	<i>Lonchocarpus sp.</i>	
	<i>Ravenelia indigoferae</i> Tranzschel & Dietel	<i>Indigofera subulata</i> Vahl. ex Poir.	
		<i>Indigofera suffruticosa</i> Mill.	
	<i>Ravenelia mainsiana</i> Arthur & Holw.	<i>Mimosa albida</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	
	<i>Ravenelia mimosae-sensitivae</i> Henn.	<i>Mimosa sensitiva</i> L.	
		<i>Mimosa sp.</i>	
	<i>Ravenelia pithecolobii</i> Arthur	<i>Pithecolobium lanceolatum</i> Benth.	
Cronartiaceae	<i>Cronartium quercuum</i> (Berk.) Miyabe ex Shirai	<i>Quercus sp.</i>	Fagaceae
Anamorfos	<i>Aecidium bogotense</i> Mayor	<i>Geranium multiceps</i> Turcz.	Geraniaceae
Pucciniaceae	<i>Polioma unilateralis</i> (Arthur) J.W. Baxter & Cummins	<i>Geranium caucense</i> R. Knuth	
		<i>Geranium hirtum</i> Willd. ex Spreng.	
		<i>Geranium mexicanum</i> Kunth	
	<i>Puccinia bogotensis</i> Mayor	<i>Geranium multiceps</i> Turcz.	
	<i>Puccinia pelargonii-zonalis</i> Doidge	<i>Pelargonium odoratissimum</i> (L.) L'Hér.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia heliconiae</i> (Dietel) Arthur	<i>Heliconia sp.</i>	Heliconiaceae
Pucciniaceae	<i>Uromyces triquetrus</i> Cooke	<i>Hypericum perforatum</i> L.	Hypericaceae
		<i>Hypericum silenoides</i> Juss.	
		<i>Hypericum theifolium</i> Kunth	
		<i>Hypericum uliginosum</i> Kunth	
Pucciniaceae	<i>Uromyces gladioli</i> Hennings	<i>Gladiolus x hortelanus</i>	Iridiaceae
Anamorfos	<i>Uredo hyptidis-atrorubentis</i> Mayor	<i>Hyptis atrorubens</i> Poit.	Lamiaceae
Pucciniaceae	<i>Puccinia conspersa</i> Dietel var. <i>paramensis</i> (Mayor) J.W. Baxter	<i>Salvia carnea</i> Kunth	
		<i>Salvia carnua</i> Kunth	
	<i>Puccinia conturbata</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Salvia palifolia</i> Kunth	
	<i>Puccinia hyptidis</i> (M.A. Curtis) Tracy & Earle	<i>Hyptis capitata</i> Jacq. var. <i>vulgaris</i> Briq.	
	<i>Puccinia hyptidis-mutabilis</i> Mayor	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.) Briq.	

Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
		<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.) Briq. var. <i>polystachya</i> (Kunth) Briq.	
	<i>Puccinia impedita</i> Mains & Holw.	<i>Salvia cataractarum</i> Briq.	
		<i>Salvia mayorii</i> Briq.	
		<i>Salvia petiolaris</i> Kunth	
	<i>Puccinia leonotidicola</i> Henn.	<i>Leonotis nepetifolia</i> (L.) R. Br.	
	<i>Puccinia medellinensis</i> Mayor	<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.) Briq.	
		<i>Hyptis pectinata</i> (L.) Poit.	
	<i>Puccinia menthae</i> Pers.	<i>Mentha aff. aquatica</i> L.	
		<i>Mentha sp.</i>	
		<i>Hyptis mutabilis</i> (Rich.) Briq. var. <i>spicata</i> (Poit.) Briq.	
	<i>Puccinia pallidissima</i> Speg.	<i>Stachys mayorii</i> Briq.	
	<i>Puccinia soledadensis</i> Mayor	<i>Salvia bogotensis</i> Benth.	
		<i>Salvia calocalicina</i> Briq.	
		<i>Salvia latens</i> Benth.	
		<i>Salvia pauciserrata</i> Benth.	
		<i>Salvia scutellarioides</i> Kunth	
		<i>Salvia sp.</i>	
Anamorfos	<i>Uredo nectandrae</i> Viégas	<i>Nectandra sp.</i>	Lauraceae
Pucciniaceae	<i>Uromyces neophytusae</i> H.S. Jacks.	<i>Phthirusa pyrifolia</i> (Kunth) Eichler	Loranthaceae
	<i>Uromyces urbanianus</i> Henn.	<i>Antidaphne fendleri</i> (Thiegl.) Engl.	
		<i>Oryctanthus botryostachys</i> Eichler	
		<i>Oryctanthus spicatus</i> (Jacq.) Eichler	
		<i>Oryctanthus sp.</i>	
Anamorfos	<i>Aecidium adenariae</i> Mayor	<i>Adenaria floribunda</i> Kunth	Lythraceae
		<i>Adenaria floribunda</i> fo. <i>purpurata</i> (Kunth) Koehne	
Phakopsoraceae	<i>Phakopsora cupheae</i> Buriticá	<i>Cuphea balsamona</i> Cham. & Schldl.	
		<i>Cuphea carthaginensis</i> (Jacq.) J.F. Macbr.	
		<i>Cuphea serphyllifolia</i> Kunth	
		<i>Cuphea strigulosa</i> Kunth	
		<i>Cuphea sp.</i>	
		<i>Parsonsia pinto</i> (Vand.) A. Heller.	
		<i>Parsonsia racemosa</i> (L. f.) Standl.	
		<i>Parsonsia sp.</i>	
Phakopsoraceae	<i>Crossopsora byrsoninae</i> (Henn.) R.S. Peterson	Malpighiaceae aff. <i>Byrsonima</i>	Malpighiaceae
Pucciniaceae	<i>Puccinia circinata</i> (Schwein.) Arthur	<i>Stigmaphyllon aff. bogotense</i> Triana & Planch.	
		<i>Stigmaphyllon sp.</i>	
Phakopsoraceae	<i>Phakopsora gossypii</i> (Lagerh.) Hirats.	<i>Gossypium arboreum</i> L.	Malvaceae
		<i>Gossypium barbadense</i> L.	
		<i>Gossypium hirsutum</i> L.	
		<i>Gossypium peruvianum</i> Cav.	
		<i>Gossypium aff. religiosum</i> L.	
		<i>Gossypium sp.</i>	
	<i>Catenulopsora praelonga</i> (Speg.) Buriticá	<i>Hibiscus sp.</i>	
Pucciniaceae	<i>Puccinia anodae</i> P. Syd. & Syd.	<i>Anoda cristata</i> (L.) Schldl.	
		<i>Anoda hastata</i> Cav.	
	<i>Puccinia heterospora</i> Berk. & M.A. Curtis	<i>Abutilon umbellatum</i> (L.) Sweet	
		<i>Anoda cristata</i> (L.) Schldl.	
		<i>Anoda hastata</i> Cav.	
		<i>Bastardia viscosa</i> (L.) Kunth	
		<i>Hampea thespesioides</i> Triana & Planch.	
		<i>Malva sylvestris</i> L.	
		<i>Malvastrum peruvianum</i> (L.) A. Gray	
		<i>Pavonia sidifolia</i> Kunth	
		<i>Pavonia sp.</i>	
		<i>Sida rhombifolia</i> L.	
		<i>Sida spinosa</i> L.	
		<i>Thespesia populnea</i> (L.) Sol. ex Corrêa	

Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
		<i>Wissadula cf. excelsior</i> (Cav.) C. Presl	
		<i>Wissadula periplocifolia</i> (L.) C. Presl ex Thwaites	
	<i>Puccinia malvacearum</i> Bertero ex Mont.	<i>Alcea rosea</i> L.	
		<i>Malva parviflora</i> L.	
		<i>Malva sylvestris</i> L.	
		<i>Malva sp.</i>	
		<i>Malvastrum americanum</i> (L.) Torr.	
		<i>Malva corchorifolia</i> Desr.	
		<i>Malvastrum coromandelianum</i> (L.) Garcke	
		<i>Malvastrum tricuspidatum</i> A. Gray	
		<i>Malvastrum sp.</i>	
		<i>Sida acuta</i> Burm. f.	
		<i>Sida rhombifolia</i> L.	
		<i>Sida sp.</i>	
Pucciniaceae	<i>Puccinia thaliae</i> Dietel	<i>Calathea lutea</i> (Aubl.) Schult	Marantaceae
Anamorfos	<i>Uredo artocarpi</i> Berk. & Broome	<i>Artocarpus communis</i> J.R. Forst. & G. Forst.	Moraceae
Phakopsoraceae	<i>Phakopsora nishidana</i> S. Ito	<i>Ficus carica</i> L.	
		<i>Ficus perez-arbelaezii</i> Dugand	
		<i>Ficus usiacurina</i> Dugand	
Pucciniaceae	<i>Puccinia psidii</i> G. Winter	<i>Myrcia cf. acuminata</i> (Kunth) DC.	Myrtaceae
		<i>Myrcia xylopioides</i> (Kunth) DC.	
		<i>Myrcia sp.</i>	
		<i>Psidium sp.</i>	
		<i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	
Anamorfos	<i>Aecidium fuchsiae</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Fuchsia putumayensis</i> Munz.	Onagraceae
		<i>Fuchsia sp.</i>	
Anamorfos	<i>Uredo behnickiana</i> Henn.	<i>Stelis sp.</i>	Orchidaceae
	<i>Uredo oncidii</i> Henn.	<i>Oncidium sp.</i>	
	<i>Uredo pleurothallidis</i> Keissl.	<i>Pleurothallis mathewisii</i> Lindl.	
	<i>Uredo scabies</i> Cooke	<i>Vanilla planifolia</i> Andrews	
Pucciniaceae	<i>Puccinia oncidii</i> Cummins	Orchidaceae indet.	
Raveneliaceae	<i>Sphenospora kevorkianii</i> Linder	<i>Epidendrum sp.</i>	
Pucciniaceae	<i>Puccinia oxalidis</i> Dietel & Ellis	<i>Oxalis martiana</i> Zucc.	Oxalidaceae
		<i>Oxalis pubescens</i> Stokes	
		<i>Oxalis sp.</i>	
Anamorfos	<i>Aecidium bocconiae</i> Mayor	<i>Bocconia integrifolia</i> Humb. & Bonpl.	Papaveraceae
Pucciniaceae	<i>Puccinia bocconiae</i> Mayor	<i>Bocconia integrifolia</i> Humb. & Bonpl.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia scleriae</i> (Pazschke) Arthur	<i>Passiflora capsularis</i> L.	Passifloraceae
Puccinia ceae	<i>Puccinia rivinae</i> Speg.	<i>Rivina humilis</i> L.	Phytolacaceae
Anamorfos	<i>Uredo peperomiae</i> Henn.	<i>Peperomia sp.</i>	Piperaceae
		<i>Piper antioquense</i> C. DC.	
	<i>Uredo piperis</i> Henn.	<i>Piper hartwigianum</i> DC.	
Anamorfos	<i>Physopella ignava</i> (Arthur) Buriticá	<i>Arthrostylidium sp.</i>	Poaceae
	<i>Uredo chusqueae</i> Pardo-Card.	<i>Chusquea serrulata</i> Pilg.	
	<i>Uredo triniochloae</i> Arthur & Holw.	<i>Triniochloa stipoides</i> (Kunth) Hitchc	
	<i>Uredo zeugites</i> Arthur & Holw.	<i>Despretzia mexicana</i> Kunth	
Phakopsoraceae	<i>Phakopsora apoda</i> (Har. & Pat.) Mains	<i>Pennisetum clandestinum</i> Hochst. ex Chiov.	
	<i>Phakopsora cameliae</i> (Arthur) Buriticá	<i>Setaria scandens</i> Schrad. ex Schult.	
	<i>Phakopsora compressa</i> (Mains) Buriticá & J.F. Hennen	<i>Paspalum sp.</i>	
	<i>Phakopsora pallescens</i> (Arthur) Buriticá & J.F. Hennen	<i>Tripsacum lanceolatum</i> Rupr. ex E. Fourn.	
	<i>Phakopsora zaeae</i> (Mains) Buriticá	<i>Zea mays</i> L.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia anthephora</i> Arthur & J.R. Johnst.	<i>Anthephora hermaphrodita</i> (L.) Kuntze	
	<i>Puccinia brachypodii</i> G.H. Otth var. <i>poae-nemoralis</i> (G.H. Otth) Cummins & H.C. Greene	<i>Alopecurus aequalis</i> Sobol.	
		<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	
		<i>Poa annua</i> L.	
		<i>Poa pratensis</i> L.	
	<i>Puccinia cenchri</i> Dietel & Holw.	<i>Cenchrus echinatus</i> L.	
		<i>Gymnotrix bambusiformis</i> E. Fourn.	



Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
	<i>Puccinia chaetochloae</i> Arthur	<i>Paspalum macrophyllum</i> Kunth	
	<i>Puccinia chaseana</i> Arthur & Fromme	<i>Antheophora hermaphrodita</i> (L.) Kuntze	
	<i>Puccinia coronata</i> Corda	<i>Agrostis perennans</i> (Walter) Tuck.	
		<i>Avena sativa</i> L.	
		<i>Holcus lanatus</i> L.	
		<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	
		<i>Lolium perenne</i> L.	
		<i>Lolium perenne</i> subsp. <i>multiflorum</i> (Lam.) Husn.	
	<i>Puccinia cynodontis</i> Delacr. ex Desm.	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	
	<i>Puccinia duthiae</i> Ellis & Tracy	<i>Bothriochloa pertusa</i> (L.) A. Camus	
	<i>Puccinia eragrostidicola</i> F. Kern, Thurst. & Whetzel	<i>Eragrostis inconstans</i> Nees	
	<i>Puccinia esclavensis</i> Dietel & Holw. var. <i>panicophila</i> (Speg.) Ramachar & Cummins	<i>Paspalum prostratum</i> Scribn. & Merr.	
	<i>Puccinia flaccida</i> Berk. & Broome	<i>Panicum crusgalli</i> L.	
	<i>Puccinia graminis</i> Pers.	<i>Agrostis perennans</i> (Walter) Tuck.	
		<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	
		<i>Avena sativa</i> L.	
		<i>Calamagrostis pittieri</i> Hack.	
		<i>Phleum pratense</i> L.	
		<i>Stipa neesiana</i> Trin. & Rupr.	
		<i>Triticum aestivum</i> L.	
		<i>Triticum</i> sp.	
	<i>Puccinia hordei</i> G.H. Oth	<i>Hordeum vulgare</i> L.	
	<i>Puccinia inclita</i> Arthur, Bull	<i>Ichmanthus ichnodes</i> (Griseb.) Hitchc. & Chase	
	<i>Puccinia levis</i> (Sacc. & Bizz.) Magnus	<i>Axonopus scoparius</i> Flügge	
		<i>Digitaria aff. bicornis</i> (Lam.) Roem. & Schult	
		<i>Paspalum fournierianum</i> Ricker ex Schell	
		<i>Paspalum pilosum</i> Lam.	
		<i>Ryttilix granularis</i> (L.) Skeels	
	<i>Puccinia macra</i> Arthur & Holw.	<i>Paspalum candidum</i> (Humb. & Bonpl. ex Flügge) Kunth	
		<i>Paspalum paniculatum</i> L.	
	<i>Puccinia melanocephala</i> Syd. & P. Syd.	<i>Saccharum officinarum</i> L.	
	<i>Puccinia polysora</i> Underw.	<i>Zea mays</i> L.	
	<i>Puccinia posadensis</i> Sacc. & Trotter	<i>Andropogon</i> sp.	
	<i>Puccinia purpurea</i> Cooke	<i>Holcus sorghum</i> L.	
		<i>Sorghum halepense</i> (L.) Pers.	
		<i>Sorghum vulgare</i> Persoon	
	<i>Puccinia recondita</i> Dietel & Holw.	<i>Bromus unioloides</i> Kunth	
		<i>Triticum aestivum</i> L.	
	<i>Puccinia sorghi</i> Schwein.	<i>Zea mays</i> L.	
	<i>Puccinia striiformis</i> Westend.	<i>Hordeum vulgare</i> L.	
		<i>Triticum aestivum</i> L.	
	<i>Puccinia subdigitata</i> Arthur & Holw.	<i>Brachypodium mexicanum</i> (Roem. & Schult.) Link.	
	<i>Puccinia substriata</i> Ellis & Barthol.	<i>Chaetochloa geniculata</i> (Poir.) Millsp. & Chase	
		<i>Paspalum conjugatum</i> P.J. Bergius	
		<i>Paspalum humboldtianum</i> Flugge.	
		<i>Paspalum paniculatum</i> L.	
	<i>Uromyces clignyi</i> Pat. & Har.	<i>Dichanthium annulatum</i> (Forssk.) Stapf.	
	<i>Uromyces costaricensis</i> Syd. & P. Syd.	<i>Lasiacis ruscifolia</i> (Kunth) Hitchc.	
		<i>Lasiacis sorghoidea</i> (Desv.) Hitch. & Chase.	
	<i>Uromyces eragrostidis</i> Tracy	<i>Eragrostis pilosa</i> (L.) P. Beauv.	
	<i>Uromyces setariae-italicae</i> Yoshino	<i>Lasiacis ruscifolia</i> (Kunth) Hitchc.	
		<i>Lasiacis sorghoidea</i> (Desv.) Hitch. & Chase.	
		<i>Melinis minutiflora</i> P. Beauv.	
		<i>Panicum barbinode</i> Trin.	
		<i>Panicum lanatum</i> Sw.	

Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
Anamorfos	<i>Uredo muehlenbeckiae</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Muehlenbeckia</i> sp.	Polygonaceae
Chaconiaceae	<i>Chrysocelis muehlenbeckiae</i> Lagerh. & Dietel	<i>Muehlenbeckia</i> sp.	
		<i>Muehlenbeckia tammifolia</i> (Kunth) Meisn.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia polygoni-amphibii</i> Pers.	<i>Persicaria hydropiperoides</i> (Michx.) Small.	
		<i>Persicaria persicarioides</i> (Kunth) Small.	
		<i>Polygonum acre</i> Lam.	
	<i>Uromyces runicis</i> (Schumach.) G. Winter	<i>Rumex crispus</i> L.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia gouaniae</i> Holw.	<i>Gouania</i> sp.	Rhamnaceae
Phragmidiaceae	<i>Frommeella obtusa-duchesneae</i> (Arthur) Buriticá	<i>Duchesnea indica</i> (Andrews) Focke	Rosaceae
		<i>Duchesnea</i> sp.	
	<i>Gerwasia columbiensis</i> (F. Kern & Whetzel) Buriticá	<i>Rubus</i> sp.	
	<i>Gerwasia cundinamarcensis</i> (Mayor) Buriticá	<i>Rubus peruvianus</i> Fritsch.	
		<i>Rubus</i> sp.	
	<i>Gerwasia lagerheimii</i> (Magnus) Buriticá	<i>Rubus glaucus</i> Benth.	
		<i>Rubus</i> sp.	
	<i>Gerwasia mayorii</i> (H.S. Jacks.) Buriticá	<i>Rubus</i> sp.	
	<i>Gerwasia rubi-urticifolii</i> (Mayor) Buriticá	<i>Rubus adenotrichos</i> Schldtl.	
		<i>Rubus urticifolius</i> Poir.	
		<i>Rubus</i> sp.	
	<i>Gerwasia variabilis</i> (Mayor) Buriticá	<i>Rubus</i> sp.	
	<i>Kuehneola loeseneriana</i> (Henn.) H.S. Jacks. & Holw.	<i>Rubus urticifolius</i> Poir.	
		<i>Rubus</i> sp.	
	<i>Phragmidium mucronatum</i> (Pers.) Schldtl.	<i>Rosa</i> sp.	
Uropyxidaceae	<i>Tranzschelia arthurii</i> Tranzschel & M.A. Litv.	<i>Prunus serotina</i> subsp. <i>capuli</i> (Cav.) McVaugh	
	<i>Tranzschelia discolor</i> (Fuckel) Tranzschel & M.A. Litv.	<i>Amygdalus persica</i> L.	
		<i>Prunus persica</i> (L.) Batsch	
Anamorfos	<i>Aecidium borrieriae</i> Pat.	<i>Hemidiodia ocymifolia</i> (Willd. ex Roem. & Schult.) K. Schum.	Rubiaceae
	<i>Aecidium manettiae</i> F. Kern & Whetzel	<i>Manettia toroi</i> Standl.	
Chaconiaceae	<i>Goplana andina</i> Syd.	<i>Manettia coccocypseloides</i> Wernham	
		<i>Manettia</i> aff. <i>Suratensis</i> Standl. ex Steyerl.	
	<i>Hemileia vastatrix</i> Berk. & Broome	<i>Coffea arabica</i> L.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia lateritia</i> (Berk. & M.A. Curtis) Lagerh.	<i>Diodia cymosa</i> Cham.	
		<i>Hemidiodia ocymifolia</i> (Willd. ex Roem. & Schult.) K. Schum.	
		<i>Spermacoce assurgens</i> Ruiz. & Pav.	
		<i>Spermacoce latifolia</i> Aubl.	
		<i>Spermacoce ocymoides</i> Burm. f.	
		<i>Spermacoce spinosa</i> Jacq.	
		<i>Spermacoce tenuior</i> L.	
	<i>Puccinia punctata</i> Link.	<i>Galium hypocarpium</i> (L.) Endl. ex Griseb.	
	<i>Uromyces crucheti</i> Mayor	<i>Spermacoce capitata</i> Ruiz & Pav.	
	<i>Uromyces emmeorrhizae</i> Syd.	<i>Emmeorhiza umbellata</i> (Spreng.) K. Schum.	
Melampsoraceae	<i>Melampsora coleosporioides</i> Dietel	<i>Salix babylonica</i> L.	Salicaceae
	<i>Melampsora laricis-populina</i> Kleb.	<i>Populus nigra</i> L. var. <i>italica</i> Du Roi	
		<i>Populus pyramidalis</i> Rozier	
Pucciniaceae	<i>Puccinia arechavaletae</i> Speg.	<i>Cardiospermum grandiflorum</i> Sw.	Sapindaceae
		<i>Cardiospermum halicacabum</i> L.	
		<i>Cardiospermum</i> sp.	
		<i>Serjania</i> aff. <i>brevipes</i> Benth.	
		<i>Serjania clematidea</i> Triana & Planch.	
		<i>Serjania grandidens</i> Radlk.	
		<i>Serjania membranacea</i> Splitg.	
		<i>Serjania</i> sp.	
		<i>Urvillea ulmacea</i> Kunth	
Pucciniaceae	<i>Puccinia lucumae</i> F. Kern, Thurst. & Whetzel	<i>Lucuma</i> sp.	Sapotaceae
Pucciniaceae	<i>Uromyces ribicola</i> H.S. Jacks. & Holw.	<i>Ribes andicola</i> Jancz.	Saxifragaceae
Pucciniaceae	<i>Puccinia antirrhini</i> Dietel & Holway	<i>Antirrhinum majus</i> L.	Scrophulariaceae

Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
Pucciniaceae	<i>Puccinia smilacis</i> Schwein.	<i>Smilax cumanensis</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	Smilacaceae
	<i>Uromyces smilacis</i> Mayor	<i>Smilax</i> sp.	
Raveneliaceae	<i>Sphenospora smilacina</i> Syd.	<i>Smilax</i> sp.	
Anamorfos	<i>Uredo tolimensis</i> F. Kern & Whetzel	<i>Solanum</i> sp.	Solanaceae
Phakopsoraceae	<i>Crossopora uleana</i> (Syd. & P. Syd.) R.S. Peterson	<i>Cyphomandra hartwegii</i> (Miers.) Walp. subsp. <i>hartwegii</i> Bohs.	
Pucciniaceae	<i>Chrysocyclus cestri</i> (Dietel & Henn.) Syd.	<i>Cestrum</i> aff. <i>mariquitense</i> Kunth	
	<i>Puccinia claviformis</i> Lagerh.	<i>Solanum diversifolium</i> Schldtl.	
		<i>Solanum dolichosepalum</i> Bitter	
		<i>Solanum hirtum</i> Vahl.	
		<i>Solanum</i> aff. <i>myrianthum</i> Britton ex Rusby	
		<i>Solanum</i> aff. <i>ovalifolium</i> Dunal	
		<i>Solanum straminiifolium</i> Jacq.	
		<i>Solanum torvum</i> Sw.	
		<i>Solanum</i> sp.	
	<i>Puccinia ortizi</i> Mayor	<i>Brachistus hebephyllus</i> Miers.	
	<i>Puccinia pampeana</i> Speg.	<i>Capsicum baccatum</i> L.	
		<i>Capsicum</i> sp.	
		<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.	
	<i>Puccinia pittieriana</i> Henn.	<i>Solanum nigrum</i> L.	
		<i>Solanum tuberosum</i> L.	
	<i>Puccinia sarachae</i> Mayor	<i>Saracha edulis</i> (Schldtl.) Thell.	
		<i>Saracha ialtomata</i> Schldtl.	
	<i>Uromyces cestri</i> Bertero ex Mont.	<i>Cestrum parviflorum</i> Dunal	
		<i>Cestrum</i> sp.	
	<i>Uromyces solani</i> Dietel & Holw.	<i>Solanum</i> sp.	
Puccinosiraceae	<i>Dietelia holwayi</i> (H.S. Jacks.) Buriticá & J.F. Hennen	<i>Salpichroa</i> aff. <i>tristis</i> Miers	
Pucciniaceae	<i>Puccinia filopes</i> Arthur & Holw.	<i>Buettneria carthgenensis</i> Jacq.	Sterculiaceae
Puccinosiraceae	<i>Puccinosira pallidula</i> (Speg.) Lagerh.	<i>Triumfetta dumetorum</i> Schldtl.	Tiliaceae
		<i>Triumfetta lappula</i> L.	
		<i>Triumfetta mollissima</i> Kunth	
		<i>Triumfetta semitriloba</i> Jacq.	
		<i>Triumfetta</i> sp.	
Anamorfos	<i>Aecidium turnerae</i> Henn.	<i>Turnera ulmifolia</i> L.	Turneraceae
Anamorfos	<i>Aecidium lantanae</i> Mayor	<i>Lantana hispida</i> Kunth	Verbenaceae
Endophyllaceae	<i>Endophyllum stachytarphetae</i> (Henn.) Whetzel & Olive	<i>Stachytarpheta cavennensis</i> (Rich.) Vahl.	
Pucciniaceae	<i>Puccinia lantanae</i> Farl.	<i>Lantana armata</i> Schauer	
		<i>Lantana camara</i> L.	
		<i>Lantana hispida</i> Kunth	
		<i>Lantana moritziana</i> Otto & A. Dietr.	
		<i>Lantana tiliifolia</i> Cham.	
		<i>Lantana trifolia</i> L.	
		<i>Lantana</i> sp.	
Uropyxidaceae	<i>Prospodium tuberculatum</i> (Speg.) Arthur	<i>Lantana</i> sp.	
	<i>Prospodium vungunteni</i> (Mayor) Dietel	<i>Lippia americana</i> L.	
		<i>Lippia</i> sp.	
Chaconiaceae	<i>Olivea neotectonae</i> (T.S. Ramakrishnan & K. Ramakrishnan) Buriticá y Salazar	<i>Tectona grandis</i> L.	
Endophyllaceae	<i>Endophyllum circumscriptum</i> (Schwein.) Whetzel & Olive var. <i>circumscriptum</i>	<i>Cissus vinifera</i> (L.) Kuntze	Vitaceae
		<i>Cissus sicyoides</i> L.	
		<i>Cissus</i> sp.	
Phakopsoraceae	<i>Crossopora wilsoniana</i> (Arthur) Arthur	<i>Cissus rhombifolia</i> Vahl.	
	<i>Phakopsora uva</i> Buriticá & J.F. Hennen	<i>Vitis</i> sp.	
<b>FILICALES</b>			
Anamorfos	<i>Milesia mayoriana</i> (Dietel) Buriticá	<i>Blechnum blechnoides</i> Desv.	Blechnaceae
Pucciniastraceae	<i>Milesia australis</i> (Arthur ex Faull) Hirats.	<i>Blechnum occidentale</i> L.	
Anamorfos	<i>Milesia dennstaedtia</i> (Dietel) Faull	<i>Dennstaedtia rubiginosa</i> (Kaulf.) T. Moore	Dennstaedtiaceae
Pucciniaceae	<i>Desmella aneimiae</i> Syd. & P. Syd.	<i>Dennstaedtia cicutaria</i> (Sw.) T. Moore	

Continuación Tabla 1.

ROYA		HOSPEDANTE	
Familia	Especie	Especie	Familia
Pucciniastraceae	<i>Uredinopsis pteridis</i> Dietel & Holw.	<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn.	
Anamorfos	<i>Calidion dumontii</i> Buriticá	<i>Thelypteris</i> sp.	Dryopteridaceae
Anamorfos	<i>Uredo obovata</i> (Arthur) Cummins	<i>Elaphoglossum cuspidatum</i> (Willd.) T. Moore	Lomariopsidaceae
		<i>Elaphoglossum</i> aff. <i>leptophyllum</i> (Fee.) T. Moore	
		<i>Elaphoglossum</i> sp.	
Anamorfos	<i>Milesia columbiensis</i> (Dietel) Arthur	<i>Nephrolepis pendula</i> (Raddi.) J. Sm.	Nephrolepidaceae
Anamorfos	<i>Uredo nephrolepidis</i> Dietel	<i>Nephrolepis pendula</i> Raddi.	
Pucciniaceae	<i>Desmella aneimiae</i> Syd. & P. Syd.	<i>Pityrogramma trifoliata</i> (L.) R.M. Tryon.	Pteridaceae
Pucciniaceae	<i>Puccinia lygodii</i> (Har.) Arthur	<i>Lygodium venustum</i> Sw.	Schizaeaceae

### Estrategias propuestas para conocer los hospedantes de royas amenazadas de Colombia

Después de revisar el estado de conocimiento de las royas en Colombia, nuestra sugerencia es seguir las recomendaciones de la Reunión de Taxónomos en Micetología, dentro del Programa Nacional para el Estudio de la Megadiversidad del País en los Próximos 25 años (LA SISTEMÁTICA EN COLOMBIA PARA EL SIGLO XXI), realizada en Barbosa, Antioquia en 1996:

Colección y aislamiento de hongos en:

1. Parques Nacionales.
2. Ecosistemas perturbados y/o amenazados.
3. Zonas de agricultura.
4. Zonas de megaproyectos (hidroeléctricas, termoeléctricas, petroleras, etc.).

Además, consideramos que se deben revisar excidados de plantas amenazadas en búsqueda de royas asociadas, que por su dependencia del hospedante, automáticamente serían declaradas en el mismo grado de amenaza. Se deben priorizar las colecciones en áreas silvestres en sitios de gran endemismo, y otras que corren riesgo de desaparecer por cambio climático (páramos, costas), por ser frentes de colonización y centros de diversificación de uredinales.

A los botánicos, se les recomienda coleccionar junto con sus especímenes de partes sanas, cualquier parte de la planta que presente síntomas de enfermedad, secándolo por aparte, sin procesar con alcohol; éste es un aporte muy valioso para el conocimiento de los organismos asociados a sus plantas de interés.

A los urdeninólogos, es altamente deseable coleccionar un espécimen de referencia de la planta hospedante al

colectar la roya, para permitir la actualización de listados a partir de revisiones de especialistas o identificaciones enmendadas de los hospedantes

### Agradecimientos

Los autores agradecen a los botánicos que revisaron el listado de hospedantes de royas de Colombia, Eduardo Calderón, del Programa de Biología de la Conservación del IAvH; Humberto Mendoza del IAvH en Villa de Leiva; Álvaro Cogollo del herbario del Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe y Francisco Javier Roldán, del herbario HUA en Medellín.

### Bibliografía

- Arthur, J.C. 1934. Manual of Rusts in United States and Canada. Lafayette, IN. Purdue Res. Found. 438 pp.
- Buriticá, P. & J. F. Hennen. 1980. Pucciniosireae (Pucciniaceae, Uredinales). Flora Neotrópica Monograph. **24**: 1-50.
- \_\_\_\_\_. 1994. Familia Phakopsoraceae (Uredinales). I. Géneros Anamórficos y Teliomórficos. Rev. Acad. Colombiana Cienc. **19** (72): 47-62.
- \_\_\_\_\_. 1995. Origen de los hongos causantes de enfermedad en las plantas. ASCOLFI Informa **21** (5): 58.
- \_\_\_\_\_. & V. M. Pardo-Cardona. 1996. Flora Uredineana Colombiana. Rev. Acad. Colombiana Cienc. **20** (77): 183-236.
- \_\_\_\_\_. 1998. La familia Phakopsoraceae en el Neotrópico - II. Géneros *Arthuria*, *Nothoravenelia*, *Uredopeltis*, *Kweilingia*, *Aplopsora* y *Pucciniostele*. Rev. Acad. Colombiana Cienc. **22** (84): 325-334.
- \_\_\_\_\_. 1999a. La familia Phakopsoraceae en el Neotrópico - III. Géneros: *Batistopsora* y *Phakopsora*. Rev. Acad. Colombiana Cienc. **23** (87): 271-305.
- \_\_\_\_\_. 1999b. La familia Phakopsoraceae (Uredinales) en el Neotrópico - IV. Géneros: *Crossopora*, *Cerotium*, *Phragmidia* y *Catenulopsora*. Rev. Acad. Colombiana Cienc. **23** (88): 407-431.

- \_\_\_\_\_. 2000. Adaptación al ambiente de Uredinales neotropicales. *O Biológico* **62** (1): 127-141.
- \_\_\_\_\_. 2001. Descubriendo ancestros de los Uredinales. *Rev. Acad. Colombiana Cienc.* **25** (96): 395-401.
- \_\_\_\_\_. 2003. Estado del conocimiento universal sobre el Orden Uredinales (Fungi, royas). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Unm.* **56** (1): 1813-2003.
- \_\_\_\_\_ y M. Salazar 2007. Nuevos registros de royas (Uredinales) potencialmente importantes en Colombia. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* **60** (1): 3645-3655
- Cronquist, A.** 1981. An integrated system of classification of flowering plants. Columbia Univ. Press. N.Y., 1262 pp.
- Cummins, G. B. & Y. Hiratsuka.** 1983. Illustrated Genera of Rust Fungi. The American Phytopathological Soc., St. Paul, Minn. USA. 152 pp.
- Hennen, J. F. & P. Buriticá.** 1980. A brief summary of modern rust taxonomic and evolutionary theory. *Rep. Tottori Mycol. Inst. (Japón)* **18**: 243-256.
- \_\_\_\_\_ & McCain, J. 1993. New species and records of Uredinales from the Neotropics. *Mycologia* **85** (6): 970-986.
- \_\_\_\_\_. 1997. *Uredo vetus* sp. nov., the first record of a rusts on *Selaginella*, and the use of the name *Uredo*. *Mycologia* **89** (5): 801-803.
- \_\_\_\_\_ & M. M. W. Hennen. 2000. Terminology applied to sori end life cycles of rust fungi (Uredinales) from 1729 to 2000. *O Biológico (Sao Paulo)* **62** (1): 113-126.
- Hiratsuka, Y.** 2005. Comparing tropical and temperate climate rust fungi. *Resumo C005 do V Congresso Latino-Americano de Micologia*. pp. 105-107.
- Jackson, H. S.** 1931. The rusts of South America based on the Holway collections - III. *Mycologia* **23**: 96-116.
- Kirk, P. M., P. F. Cannon, J. C. David and J. A. Staples.** 2001. *Ainsworth and Bisby's Dictionary of the Fungi*. Ninth Edition. CABI Publishing. 672 p.
- Leppik E. E.** 1953. Some viewpoints on the phylogeny of rust fungi. I. Coniferous rusts. *Mycologia* **45**: 46-74.
- \_\_\_\_\_. 1973. Origin and evolution of conifer rusts in the light of continental drift. *Mycopathologia & Mycologia Applicata* **49** (2-3): 121-136.
- McNeill, J, F. R. Barrie, H. M. Burdet, V. Demoulin, D. L. Hawksworth, K. Marhold, D. H. Nicolson, J. Prado, P. C. Silva, J. E. Skog, J. H. Wiersema & N. J. TURLAND,** (editors & compilers): *International Code of Botanical Nomenclature (Vienna Code) adopted by the Seventeenth International Botanical Congress Vienna, Austria, July 2005*. Publ. 2007. Gantner, Ruggell. (Regnum Vegetabile, 146). XVIII, 568 p.
- Ono, Y. & J. F. Hennen.** 1983. Taxonomy of the Chaconiaceae genera (Uredinales). *Trans. Mycol. Soc. Japón* **24**: 369-402.
- Pardo-Cardona, V. M.** 2001. Historia, estado actual y perspectivas de la investigación de los uredinales en Colombia. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* **54** (1-2): 1333.
- Prance, G. T., H. Beentje, J. Dransfield & R. Johns.** 2000. The tropical flora remains undercollected. *Annals Missouri Bot. Gard.* **87**: 67-71.
- Salazar Y., M.A. y Buriticá, P.** 2004. Nuevos registros para la uredobiota colombiana (Fungi, Uredinales). *Caldasia* **26** (1): 79-87.
- Sanjuán, T., L. G. Henao-M & G. Amat.** 2001. Distribución espacial de *Cordyceps* spp. (Ascomycotina: Clavicipitaceae) y su impacto sobre las hormigas en selvas del piedemonte amazónico de Colombia. *Rev. Biol. Trop.* **49** (3-4): 945-955.
- Savile, D. B. O.** 1955. A phylogeny of the Basidiomycetes. *Can. J. Bot.* **33**: 60-104.
- \_\_\_\_\_. 1976. Evolution of the Rust Fungi (Uredinales) as reflected by their ecological problems. *Evolutionary Biology* **9**: 137-207.
- Swerdlow L. J.** 1999. Biodiversity: Taking Stock of Life. *Rev. Nat. Geo. Soc.* **4** (2): 136 pp.

Recibido: marzo 15 de 2006

Aceptado para su publicación: diciembre 17 de 2007

# NEW SECTION AND NEW SPECIES OF A BLUING *PSILOCYBE* (FUNGI, BASIDIOMYCOTINA, AGARICALES) FROM COLOMBIA

by

Gastón Guzmán<sup>1</sup>, Ana Esperanza Franco-Molano<sup>2</sup> & Florencia Ramírez-Guillén<sup>1</sup>

## Abstract

**Guzmán G., A. E., Franco-Molano & F. Ramírez-Guillén:** New section and new species of a bluing *Psilocybe* (Fungi, Basidiomycotina, Agaricales) from Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(121): 469-472, 2007. ISSN 0370-3908.

*Psilocybe bispora* is described as a new caerulescent species from Antioquia, Colombia. The species is characterized by having two types of basidiospores: subrhomboid thick-walled, and subellipsoid thin-walled, when observed in face-view. *Psilocybe bispora* belongs to a new section of the genus, section *Bisporae*, here described. Both the species and the section belong to the hallucinogenic mushrooms of the genus because of the bluing feature of the basidioma.

**Key words:** Hallucinogenic mushrooms, *Psilocybe bispora*, section *Bisporae*.

## Resumen

Se describe *Psilocybe bispora* como una especie nueva y cerulescente, colectada en el Departamento de Antioquia, Colombia. Se distingue por poseer dos tipos de basidiosporas, unas subromboides de pared gruesa y otras subelipsoides de pared delgada, en ambos casos cuando se observan en vista frontal. Esta especie se adscribe a una nueva sección del género, *Bisporae*, aquí propuesta. El carácter cerulescente de este *Psilocybe* hace que la sección corresponda al grupo de las especies alucinógenas.

**Palabras clave:** Hongos alucinógenos, *Psilocybe bispora*, sección *Bisporae*.

<sup>1</sup> Instituto de Ecología, Apartado Postal 63, Xalapa 91000, Veracruz, México. gaston.guzman@inecol.edu.mx; florencia.ramirez@inecol.edu.mx

<sup>2</sup> Laboratorio de Taxonomía y Ecología de Hongos, Instituto de Biología, Universidad de Antioquia, A. A. 1226, Medellín, Colombia. afranco@quimbaya.udea.edu.co

## Introduction

There are 27 species of *Psilocybe* reported from Colombia, as discussed recently by Guzmán *et al.* (2004), 19 of them belong to the hallucinogenic group because of their bluing reaction of the basidiomata. However, it seems to be that still are several unknown species of *Psilocybe* in the country, because since 1964 (Guzmán, 1978) to the present the mycological explorations made do not cover most of the areas of this megadiverse country (Franco-Molano *et al.*, 2000). In the present contribution, a new species of *Psilocybe* is described from a subtropical cloud forest from the mountains of Antioquia which has been no so much explored.

## Materials and methods

Microscopic observations were made through hand sections of dry basidiomata, mounted in 5% KOH 5% NH<sub>4</sub>OH solutions, or each one mixed with a drop of 1% Congo red solution in the slide. In all cases the material was previously rehydrated with 96% alcohol. Basidiospore measurements include length and width in face view, and depth in side view.

## Results

*Psilocybe bispora* Guzmán, Franco-Mol. & Ram.-Guill. sp. nov.

Figs. 1-7

Pileus (10-) 20-40 mm latus, convexus vel subumbonatus, laevis, brunneolus vel fulvus vel cinnamomeus. Lamellae adnatae vel sinuatae, spadiceae. Stipes 40-70 x 5-8 mm, subclavatus vel clavatus, albus vel subflavidus. Caerules. Sporae duobus typis communi, 1: (5.5-) 6.5-7 (-7.5) x (4.5-) 5-5.5 (-6) x 4.5-5.5 µm, subrhomboidae frontaliter, crassitunicatae, et 2: 7-9 x 3.5-5 (-5.5) x 3.5-4.5 µm, subellipsoideae frontaliter, tenuitunicatae. Pleurocystidia 10-15 x 4-4.5 µm, communi, hyaline, ventricose-cylindraceae vel clavatus ventricose. Cheilocystidia (16-) 19-27 (-30) x 4-5 (-6) µm, communi, clavatus ventricose vel angustatus ventricose longicollis, aliquando ramus. Pileipellis ixocutis. Hyphae fibulate. Ad terram, caespitosum, sylvia subtropicali, Colombia, prope Antioquia. **Holotypus:** A.E. Franco-Molano 1766 (HUA).

**Etymology:** *bispora*, from two types of basidiospores.

Pileus (10-) 20-40 mm diam, convex to subumbonate, smooth, dry, shiny, finely fibrillose, pale brown or beige to darker at the center, with blue hues overall; in dry

specimens the surface has a cinnamon grayish brown color, without the blue hues; margin entire. *Lamellae* adnate to sinuate, whitish in young stage to pale reddish-brown or chocolate brown, with margin whitish and entire. *Stipe* 40-70 x 5-8 mm, hollow, cylindrical, subclavate, dry, smooth to finely fibrillose, exanulate, white to pale yellow or brownish downward, bluing when touched; base white; in dry specimens the stipe is brownish red with the base whitish. *Context* whitish, up to 5 mm thick in the pileus, bluing. *Odor and taste* strong farinaceous. *Basidiospores* of two types, both common, 1: (5.5-) 6.5-7 (-7.5) x (4.5-) 5-5.5 (-6) x 4.5-5.5 µm, subrhomboid in face-view, subellipsoid in side-view, thick-walled, wall up to 0.8 µm thick, and 2: 7-9 x 3.5-5 (-5.5) x 3.5-4.5 µm, subellipsoid in both face- and side-view, frequently asymmetric in both face- and side-view, thin-walled, wall no more than 0.5 µm thick; both types of spores brownish-yellow, with a broad apical germ pore and a short hilar appendage at the base. *Basidia* 18-26 x (5.5-) 6-7 (-8) µm, 4-spores, sterigmata 4-5 x 1-1.5 µm, clavate-ventricose, sometimes with a middle constriction, some basidia produced spores type 1 and others type 2. *Pleurocystidia* 10-15 x 4-4.5 µm, common, but difficult to find (observed only with Congo red), ventricose-subcylindrical or clavate ventricose, hyaline. *Cheilocystidia* (16-) 19-27 (-30) x 4-5 (-6) µm, common, forming a sterile edge in the gill, clavate-ventricose or narrowly ventricose with a long cylindrical apex, sometimes irregularly branched, hyaline. *Subhymenium* cellular, with elements 3.5-5 µm wide, hyaline to yellowish, thin-walled. *Hymenophoral trama* subregular, with hyphae 4-19 µm wide, thin- to thick-walled, wall up to 1 µm thick. *Context of pileus* with hyphae 5-30 µm wide, cylindrical to inflated, thin- to thick-walled, wall up to 1 µm thick, hyaline to yellowish. *Pileipellis* as an ixocutis, 25-30 µm thick, with hyphae 2-3 µm wide, thin-walled, hyaline, postrated. *Clamp connection* present.

**Habitat and distribution.** Cespitose and gregarious, on soil, in a subtropical forest with *Nageia rospigliosii* (Pilg.) de Laub. ("pino romerón"), at 2500 m alt. Known only from the type locality.

**Studied material.** COLOMBIA, Department of Antioquia, Municipio Tamesis, Río Frio, 05°43'1"N-75°44'9"W, March 11, 2003, A.E. Franco-Molano 1766 (Holotype: HUA; Isotype: XAL).

## Observations

*Psilocybe bispora* because of its bluing reaction belongs to the hallucinogenic species of the genus, following the criterion of Singer and Smith (1958) and Guzmán (1995). For its two types of basidiospores, subrhomboid thick-



**Figura 1.** *Psilocybe bispora*, basidiomata (holotype) (photo. Franco-Molano).

walled and subellipsoid thin-walled does not fit in any of the accepted caerulescent sections known (Guzmán, 1995, 2004). According to Guzmán (1995) and Noordeloos (2001) the form of basidiospores and the thickness of their wall are important taxonomic features in *Psilocybe*, and for Guzman (1995) this is the base of the division of the genus in sections. Thus the following new section is proposed to accomodate this new species.

Section *Bispore* Guzmán sect. nov.

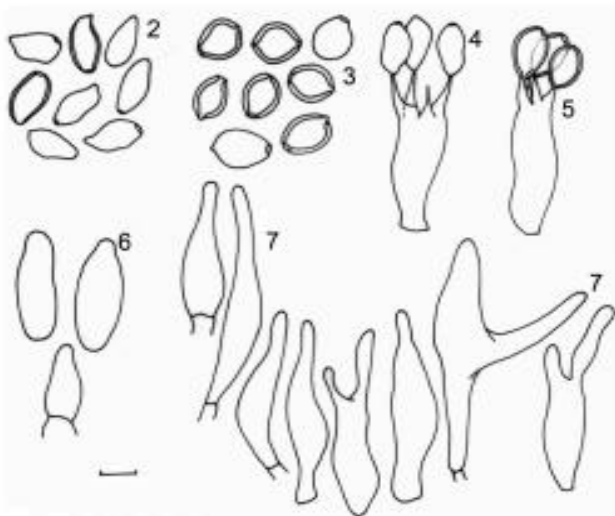
Sporae duobus typis, 1: subrhomboides frontaliter, crassitunicatae, et 2: subellipsoideae frontaliter, tenuitunicatae. Basidiomatae caeruleus. Typus: *Psilocybe bispora* Guzmán, Franco-Mol. et Ram.-Guill.

Because of two types of basidiospores: subrhomboid thick-walled and subellipsoid thin-walled, this section is related with sections: *Cordisporae* Guzmán and *Zapotecorum* Guzmán (Guzmán, 1995), which have subrhomboid thick-walled, and subellipsoid thin-walled spores, respectively. It is probably that section *Bisporeae* represents an ancestor of both above sections. The species belonging to these three sections are from the subtropical cloud forests, between 1000-2000 m altitude, where the majority of the caerulescent species of the genus have been found. However, it is interesting to observe that *Psilocybe bispora* grows in forests that reach the 2500 m altitude.

Certainly that the above described new species and section are based in one collection, but this collection has more than ten basidiomata, where the majority presented the two types of basidiospores. Moreover, several microscopic studies developed by the senior author in *Psilocybe* in a long time, moved to accepted this case as valid. This is an example to explain why we need more explorations, mainly in the subtropical cloud forests of the world.

**Acknowledgments**

Work in Colombia by Franco-Molano was possible thanks to the support of CORANTIOQUIA (project 4444) to Dr. María Claudia Díez Gómez in the Facultad de Ciencias Agropecuarias of Universidad Nacional de Colombia at Antioquia. The senior author and Ramírez-Guillén acknowledge Etelvina Gándara, Juan Lara Carmona and Manuel Hernández, all from Instituto de Ecología at Xalapa, for their valuable help in laboratory, herbarium, and computer activities, respectively. The senior author also thanks to Instituto de Ecología and CONACYT for their support to his researches. Franco-Molano wish acknowledge to Maria Claudia Díez Gómez and Adriana Corrales for their help in the field work. This paper was



**Figuras 2-7.** *Psilocybe bispora*, 2. Basidiospores type two. 3. Basidiospores type one. 4. Basidium with spores type two. 5. Basidium with spores type one. 6. Pleurocystidia. 7. Cheilocystidia (all from the holotype). Scale bar 5 µm.



critical reviewed by Laura Guzmán-Dávalos of Instituto de Botánica, Universidad de Guadalajara, México.

### Bibliography

- Franco-Molano, A.E., R. Aldana-Gómez & R. Halling. 2000. Setas de Colombia (Agaricales, Boletales y otros hongos). Guía de campo. COLCIENCIAS & Universidad de Antioquia, Antioquia, 156 págs.
- Guzmán, G. 1978. The species of *Psilocybe* known from Central and South America. *Mycotaxon* 7: 225-255.
- Guzmán, G. 1995. Supplement to the monograph of the genus *Psilocybe*. In: Petrini, O. & E. Horak, Taxonomic monographs of Agaricales. *Bibliotheca Mycologica* 159, pp. 91-141.
- Guzmán, G. 2004. Revision of the classification of the genus *Psilocybe*, I. Section *Neocaledonicae*, a new section in *Psilocybe*. *Rev. Mexicana Micol.* 18: 27-29.
- Guzmán, G., F. Ramírez-Guillén & M. Torres. 2004. The hallucinogenic species of *Psilocybe* in Colombia, their Indian use, new records, and new species. *Intern. J. Medicinal Mushr.* 6: 83-93.
- Noordeloos, M.E. 2001. Studies in *Psilocybe* sect. *Psilocybe*. *Österr. Z. Pilzk.* 10: 115-180.
- Singer, R. & A.H. Smith. 1958. Mycological investigations on teonanácatl, the Mexican hallucinogenic mushroom, II. A taxonomic monograph of *Psilocybe*, section *Caerulescentes*. *Mycologia* 50: 262-303.

Recibido: junio 27 de 2007

Aceptado para su publicación: diciembre 17 de 2007

# ANÁLISIS FITOQUÍMICO Y DE ACTIVIDAD BIOLÓGICA DEL MUSGO *Polytrichum juniperinum*

Por

Johanna Morantes<sup>1</sup>, Catalina Prieto<sup>2</sup>, Edgar Linares<sup>3</sup>,  
Javier Rincón<sup>2</sup> & Fabio Aristizábal\*<sup>1</sup>

## Resumen

Morantes, J., C. Prieto, E. Linares, J. Rincón & F. Aristizábal: Análisis fitoquímico y de actividad biológica del musgo *Polytrichum juniperinum*. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(121): 473-479, 2007. ISSN 0370-3908.

Este trabajo constituye el primer estudio fitoquímico y de actividad biológica realizado para *Polytrichum juniperinum* en Colombia. En éste, se determinó que los principales metabolitos secundarios del extracto etanólico y de las fracciones aisladas de esta briofita son terpenos, polifenoles, cumarinas, moléculas glicosiladas y sacarosa. Por el Test de Irwin se estableció que ratones tratados con el extracto etanólico total o la fracción en diclorometano experimentaban trastornos motrices moderados y transitorios del SNC. Con bajas dosis del extracto y de la fracción hexánica se detectó una actividad depresiva. La actividad citotóxica de la fracción orgánica sobre MCF-7 y la fracción en diclorometano sobre HEp-2 y MKN-45 resultó promisoria. No se evidenció actividad antimicrobiana bajo las condiciones de ensayo.

**Palabras clave:** musgos, *Polytrichum juniperinum*, Test de Irwin, citotoxicidad *in vitro*, actividad antimicrobiana.

## Abstract

This is the first phytochemical and biological activity study made for *Polytrichum juniperinum* in Colombia. The principal secondary metabolites of the whole ethanolic extract and fractions obtained of this briophyta were terpenes, polyphenols, coumarins, glycosilated molecules and sucrose. By Irwin Test, the mice treated with the ethanolic extract or the dichloromethane fraction, show

1 Grupo Farmacogenética del Cáncer, Departamento de Farmacia, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

2 Grupo Productos Bioactivos de Plantas Medicinales Colombianas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

3 Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

\* Correspondencia: Fabio Aristizábal, Departamento de Farmacia, Universidad Nacional de Colombia, A.A. 14490, Bogotá, Colombia, E-mail: faaristizabalg@unal.edu.co

slight and temporary affection in mobility and CNS activity. Also when the total extract and hexanic fractions, were used in low doses, the mice showed depressive activity. The cytotoxicity of organic fraction against MCF-7 and dichloromethane fraction against HEP-2 and HT-29 are promising. Antimicrobial activity was not evidenced in the conditions of test.

**Key words:** moss, *Polytrichum juniperinum*, Irwin Test, *in vitro* cytotoxicity, antimicrobial activity.

## Introducción

La búsqueda bioguiada de metabolitos biológicamente activos constituye una de las estrategias empleadas para el desarrollo de nuevos fármacos. Entre las fuentes de metabolitos se encuentran las plantas superiores, inferiores, organismos marinos, animales y artrópodos (Cordell *et al.*, 1991). La alta diversidad de especies vegetales en Colombia, la amplia gama de moléculas orgánicas que presentan y los reportes de interesantes propiedades biológicas, las hacen una de las principales fuentes de productos biológicamente activos (Pezzuto, 1997; Sanabria, 1997). Las briofitas (musgos y hepáticas) pertenecen al grupo de las plantas no vasculares, presentan entre sus metabolitos, flavonoides, terpenos, esteroides, compuestos fenólicos y en general una gran diversidad de estructuras químicas. *Polytrichum juniperinum*, objeto de este trabajo, es una briofita que pertenece a la familia Polytrichaceae, cosmopólita distribuida ampliamente en diferentes países de Europa, Asia y América y de la cual no existe un claro registro de sus principales metabolitos secundarios ni evidencias experimentales de las posibles actividades biológicas que estos presentan (Asakawa, 1990; Churchill *et al.*, 1995). Por lo anterior se decidió comenzar un estudio sistemático de los principales metabolitos secundarios de este musgo, así como el estudio bioguiado de su actividad biológica.

## Materiales y métodos

### Material vegetal

El material fue recolectado en la vereda La Cumbre, San Francisco – Cundinamarca, en las coordenadas geográficas: 4°56'39" N, 74°18'38" E y a una altitud de 2100 m. La colección y determinación taxonómica fueron realizadas por el botánico E. Linares (No. 10073). Un ejemplar testigo se encuentra depositado en el Herbario Nacional Colombiano del Instituto de Ciencias Naturales (COL 510107).

El material recolectado se secó durante 5 días a temperatura ambiente y finalizado este proceso se limpió.

Posteriormente se pulverizó mecánicamente empleando un molino de discos. Con el polvo obtenido, se realizó una extracción por percolación utilizando como solvente etanol al 96%. El solvente fue retirado del extracto a presión reducida utilizando un rotavapor y el residuo obtenido se secó al vacío utilizando un desecador.

### Análisis fitoquímico preliminar

Para determinar los principales grupos de metabolitos presentes en esta planta, el extracto etanólico (EE) y las fracciones obtenidas fueron analizadas usando diferentes reacciones de coloración, precipitación y cromatografía en capa delgada (CCD). Para el fraccionamiento del extracto etanólico, se emplearon solventes de diferente polaridad (hexano, diclorometano, metanol, butanol y agua); cada solvente se eliminó de las fracciones mediante el uso de rotavapor o liofilizando según el caso (Sanabria, 1983; CYTED, 1999).

### Aislamiento y purificación

La fracción en diclorometano (FD) (16,2 g), obtenida por partición del extracto etanólico, se purificó teniendo en cuenta que reveló la presencia de flavonoides, cumarinas y terpenos. Para ello se empleó una cromatografía en columna a vacío (CCV) la cual se preparó con 200 g de sílica gel 60 G y se eluyó con hexano, cloroformo y metanol, puros y en mezclas de polaridad creciente. Las sub-fracciones obtenidas fueron concentradas, pesadas y analizadas mediante CCD y posteriormente reunidas en grupos según sus perfiles cromatográficos. Las muestras con un rendimiento mayor a 100 mg, con mayor grado de pureza y que revelaron manchas propias de núcleos químicos de tipo polifenólico y terpénico, fueron purificadas mediante cromatografía en capa delgada preparativa (CCDP). Algunas muestras se sometieron a una previa acetilación, para disminuir la polaridad y así facilitar su purificación. La acetilación se realizó con anhídrido acético y piridina seca en un reactor, a temperatura ambiente y agitando por 24 horas. Al terminar la reacción, la mezcla se puso en un embudo de decantación, se adicionó agua fría y luego cloroformo en una relación

1:3 para hacer la extracción. Para eliminar el exceso de piridina y de ácido de la fase orgánica, se realizaron lavados con ácido clorhídrico al 10 % y agua, finalmente esta fase se secó con sulfato de sodio anhidro y se concentró. La muestra fue purificada por CCDP, usando como fase estacionaria Sílica gel 60 G y como eluyente cloroformo:metanol en una relación 90:10. Los productos con mayor grado de pureza se sometieron a técnicas de identificación como: IR (Perkin Elmer 1600FT-IR), RMN (Bruker 400) de  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$  uni- y bi- dimensional (DEPT, HOMOCOSY, HMQC Y HMBC) (Crews *et al.*, 1998).

## Estudios de actividad biológica

### Test de Irwin

La prueba se realizó con el extracto etanólico total (EE) y las fracciones hexánica (FH) y en diclorometano (FD) en dosis de 2000, 1000, 500 y 250 mg/Kg peso. El extracto y las fracciones se prepararon en una mezcla de agua destilada, glicerina y propilenglicol (8:1:1). Los productos se administraron por vía oral a ratones machos (cepa ICR) de 7-8 semanas de edad. Los parámetros del test fueron evaluados a los 0, 15, 30, 60 y 90 minutos y 2 y 24 horas (Irwin, 1962). Por cada tratamiento se usaron dos ratones control de la misma edad de experimentación a los que se les administró 0,3 mL del vehículo por vía oral.

Los ratones que fueron empleados para esta prueba fueron criados y mantenidos en el Bioterio del Departamento de Farmacia, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, con ciclos de 12h luz/12h oscuridad, temperatura  $21 \pm 1$  °C, agua y comida a libre demanda. Los procedimientos realizados en esta prueba siguieron los lineamientos éticos establecidos en las "Normas Científicas, Técnicas y Administrativas para la Investigación en Salud" establecidas en la Resolución No. 008430 de 1993 del Ministerio de Salud de Colombia.

### Actividad antimicrobiana

Usando la metodología de difusión en gel, se evaluó de forma preliminar la actividad antimicrobiana del extracto EE, sobre *Bacillus subtilis* (bacilo Gram positivo), *Micrococcus luteus* (coco Gram positivo), *Escherichia coli* (bacilo Gram negativo), *Salmonella spp* (bacilo Gram negativo) y *Candida albicans* (levadura). Para realizar las valoraciones, el EE se suspendió en una mezcla de agua-DMSO (65:35) y partiendo de una solución madre de 200 mg/mL, se probaron diluciones de 100, 50, 25, 12,5 y 6,25 mg/mL. Se incubaron durante 24 horas a 25°C para la levadura y durante 18 y 24 horas a 36°C para el resto de

microorganismos. Las valoraciones se realizaron por triplicado y en todos los casos se evaluó el efecto del vehículo.

El mantenimiento de las cepas y la preparación de los inóculos se realizaron de acuerdo a protocolos adaptados por Sanabria *et al.*, 2002.

### Actividad citotóxica

Para estas valoraciones se emplearon las líneas celulares de origen tumoral humano y de crecimiento adherente: HEP-2 (carcinoma de laringe), SiHa (carcinoma de cérvix), MKN-45 (carcinoma de estomago), HT-29 (adenocarcinoma de colon) y MCF-7 (adenocarcinoma de mama). Las líneas se cultivaron en frascos de 75 cm<sup>2</sup> de área, con medio mínimo esencial (MEM), suplementado con 5% de suero fetal bovino (FBS), penicilina 100 U/mL y estreptomycin 100 µg/mL. Se incubaron a 37°C, en atmósfera de 5% de CO<sub>2</sub> y 100% de humedad relativa.

Para la evaluación de la actividad citotóxica, se emplearon los cultivos en un 90% de confluencia. Las células se tripsinizaron y se contaron en cámara de Neubauer usando azul de trypan al 0,4% y luego se transfirieron a placas de microtitulación de 96 pozos de fondo plano en las siguientes densidades: MCF-7:  $1,5 \times 10^4$ ; MKN-45:  $1,6 \times 10^4$ ; HT-29:  $2 \times 10^4$ ; HEP-2:  $7,5 \times 10^3$ ; SiHa:  $1 \times 10^4$ . Tras un periodo de incubación de 24h, estas células se trataron durante 48h con el extracto total (EE) y las fracciones: hexánica (FH), en diclorometano (FD), metanólica (FM), butanólica (FB), acuosa (FW) y fase orgánica total obtenida a partir del extracto etanólico (FF). El extracto y las fracciones se disolvieron previamente en dimetilsulfóxido (DMSO) en una concentración inicial de 135 mg/mL. Al momento de tratar las células, se realizaron cinco diluciones seriadas en medio de cultivo, evaluando una concentración máxima de 270 µg/mL. Como control positivo de actividad se empleó doxorubicina HCl y se evaluó el efecto del vehículo (DMSO), el cual fue usado al 0,2% para evitar su interferencia en los resultados.

Como medida indirecta del efecto citotóxico, se cuantificó la viabilidad celular empleando el método de reducción del metil tiazol tetrazolio (MTT), establecido por Mosmann, 1983 y adaptado al laboratorio por Cordero *et al.*, 2002. Para este ensayo, se retiró el tratamiento y se reemplazó por 100 µL de una solución de MTT (0,25 mg/ml) en MEM sin suplementar y se incubó a 37°C durante 4 horas. Transcurrido este tiempo se retiró el medio con el MTT no metabolizado y los cristales de formazán producidos por las células vivas y metabólicamente activas, se disolvieron en 100 µL de DMSO. Después de agitar por 5 minutos a 800 rpm, la absorbancia fue leída a 570 nm en un lector de placas BIORAD 550.

Los valores de absorbancia obtenidos se usaron para calcular y graficar el porcentaje de supervivencia celular en función del logaritmo de la concentración de los tratamientos. Empleando el programa estadístico SAS se calculó la concentración en la que el extracto o las fracciones causan la muerte al 50% de las células tratadas ( $CL_{50}$ ).

Los resultados se expresaron como el promedio de la  $CL_{50}$  de dos ensayos realizados en semanas diferentes y su respectiva desviación estándar (DS) ( $CL_{50} \mu\text{g/mL} \pm \text{DS}$ ).

## Resultados y discusión

### Estudio fitoquímico

De 2500g de material vegetal recolectado, se obtuvieron 2315g tras el secado y la molienda. De este material se extrajeron 93,8g de extracto etanólico seco, estableciéndose un rendimiento del 4% (relación entre material vegetal seco/molido y extracto obtenido). El rendimiento total del proceso de fraccionamiento del extracto fue del 85,4%, las fracciones FH, FW y FD mostraron el ma-

yor rendimiento con porcentajes del 33,8, 30 y 17,3%. El rendimiento de la fracción FB fue del 2,5% y el de la FM del 1,8%.

Los resultados del análisis fitoquímico preliminar muestran que *Polytrichum juniperinum* presenta entre sus metabolitos secundarios terpenos, flavonoides, cumarinas y moléculas glicosiladas y estos se distribuyen en las fracciones de acuerdo a su polaridad. Sobre el extracto y las fracciones poco polares se realizaron además ensayos para determinar la presencia de captadores de radicales libres. Usando los reveladores DPPH y  $\beta$ -caroteno, se observó que extracto etanólico y las fracciones FF, FH y FD, presentan manchas que dan positivo con ambos reveladores, lo que indica la presencia de sustancias captadoras de radicales libres, con un posible efecto antioxidante.

Pruebas para alcaloides, antraquinonas y glicosidos cardiotónicos resultaron negativas para esta planta (Tabla 1).

Del proceso de sub-fraccionamiento y purificación de la fracción en diclorometano se aislaron diferentes mues-

**Tabla 1.** Resultados del estudio fitoquímico preliminar de fracciones aisladas de *Polytrichum juniperinum*

COMPUESTOS	PRUEBA	FRACCIONES						
		EE	FW	FB	FF	FH	FD	FM
Alcaloides	Dragendorff	-	-	-	-	-	-	-
	Mayer	-	-	-	-	-	-	-
	Reineckato	-	-	-	-	-	-	-
Flavonoides	NP-PEG	+	-	+	+	-	+	+
Terpenoides	Godin	+	+	+	+	+	+	+
	Ácido Ortofosfórico	+	0	0	+	+	+	0
Lactonas sesquiterpénicas	Ácido Ortofosfórico	-	0	0	-	-	-	0
	Hidroxamato férrico	-	0	0	-	-	-	0
Cardenólidos	Raymond	-	-	-	-	-	-	-
Cumarinas	UV	+	-	-	+	-	+	-
	Hidroxamato férrico	+	-	-	+	-	+	-
Captadores de Radicales libres	DPPH	+	0	0	+	+	+	0
	$\beta$ -caroteno	+	0	0	+	+	+	0

EE, extracto etanólico; FW, fracción acuosa; FB, fracción butanólica; FH, fracción hexánica; FM, fracción metanólica; FF, fracción orgánica; FD, fracción en diclorometano. (+): positivo, (-): negativo y (0): no evaluado.

tras con un alto grado de pureza, por análisis de IR, RMN  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$ , espectros HOMOCOSY y DEPT se logró determinar que estas muestras presentaron mezclas de estructuras aromáticas que corresponden en su mayoría a moléculas de tipo polifenólico.

Durante la concentración del extracto etanólico, un sólido denominado PJ-S1 precipitó en una cantidad relativamente alta y con un alto grado de pureza. Los análisis espectroscópicos IR y RMN  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$  mostraron un comportamiento idéntico al descrito por Breitmaier *et al.*, 1987 para la sacarosa.

Como producto de la acetilación de una subfracción diclorometánica, se obtuvo el sólido PJ-Ac 12-41 FD. Usando diferentes pruebas de resonancia magnética nuclear ( $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ , HMQC y HMBC) se determinó que este sólido corresponde a una mezcla donde el principal constituyente es un éster del ácido ftálico de cadena lineal. Los valores de los desplazamientos químicos para las señales del espectro de RMN, y que se relacionan con la porción alifática de la molécula aislada se presentan en la Tabla 2.

### Actividad biológica

#### Test de Irwin

Aunque la vía intraperitoneal se usa con mayor frecuencia para administrar los tratamientos en este tipo de ensayos, en este trabajo se empleó la vía oral pues el tamaño de partícula de la preparación no resultó lo suficientemente fino para usar la primera vía de administración. Los resultados de la prueba (Tabla 3), mostraron que los animales tratados con el extracto EE presentaron una alteración de la actividad motora moderada y transitoria, al igual que leves cambios en la conducta. Para las mayo-

**Tabla 2.** Valores de los Desplazamientos Químicos (ppm) para las señales del espectro de RMN de la Fracción PJ- Ac-12-41 FD aislada de *Polytrichum juniperinum*

CARBONO	▣ Carbono ppm	▣ Hidrógeno ppm
(CH <sub>2</sub> )	79.21	4.75
(CH <sub>2</sub> )	79.45	3.23
(CH <sub>2</sub> )	71.43	3.76
(CH <sub>2</sub> )	63.71	3.76
(CH <sub>2</sub> )	69.99	3.23
(CH <sub>2</sub> )	69.99	3.00
(CH <sub>2</sub> )	30.38	2.15
(CH <sub>2</sub> )	38.75	1.67

res dosis (1000 y 2000 mg/kg peso) se presentó una estimulación del SNC y depresión para las dosis más bajas (500 y 250 mg/Kg peso). Con todas las dosis se evidenció incoordinación motora, reflejada por el aumento del polígono de sustentación. A las 24h de administración no se presentó letalidad ni trastornos en el comportamiento de los animales tratados.

Con el fin de verificar si este comportamiento se mantenía a medida que se realizaba el fraccionamiento del extracto, se ensayaron las fracciones FD y FH. Estas se escogieron por su alto rendimiento. La respuesta de los animales (Tabla 3), frente a estos tratamientos, difiere para algunos parámetros, lo que sugiere que el fraccionamiento del extracto hace que la concentración de algunos metabolitos se aumente o disminuya. Posiblemente en algunos casos la pérdida del efecto está relacionada con sinergismos entre moléculas poco activas individualmente.

#### Actividad antimicrobiana

Los resultados obtenidos bajo las condiciones de este ensayo mostraron que el extracto EE no muestra activi-

**Tabla 3.** Resultados Test de Irwin de 3 productos aislados de *Polytrichum juniperinum*.

Muestra Dosis	Extracto Etanólico	Fracción Hexánica	Fracción en Diclorometano
250 mg /Kg	↓ Actividad motora	↓ Actividad motora Exoftalmia	---
500 mg /Kg	↓ Actividad motora ↑ Polígono sustentación Endoftalmia	---	Pasividad Adormecimiento Temor manipulación
1000 mg/Kg	↑ Actividad motora ↑ Polígono sustentación ↑ Erección cola	↓ Actividad motora Exoftalmia	Pasividad Adormecimiento Temor manipulación
2000 mg/Kg	↑ Actividad motora ↑ Polígono sustentación ↑ Erección cola	↓ Actividad motora ↓ Fuerza prensil ↓ Reacción alarma Fasciculaciones Temor.	↑ Actividad motora ↑ Curiosidad Temor

↑ Aumento de actividad; ↓ Disminución de actividad; --- No evaluado.

dad contra los microorganismos de prueba. Sin embargo, no debe descartarse del todo esta actividad, pues el ensayo realizado es una prueba preliminar.

Las fracciones y muestras puras aisladas no fueron evaluadas.

### Actividad citotóxica

#### Controles

Las líneas celulares mostraron ser sensibles a la Doxorubicina HCl, agente antineoplásico de uso en clínica, y empleado aquí para verificar en todas las valoraciones la sensibilidad de las líneas celulares (Cordero *et al.*, 2002).

En todos los casos se observó que el DMSO, empleado como vehículo para la disolución de los extractos vegetales, no presentó actividad citotóxica sobre ninguna de las líneas celulares, lo que indica que a las concentraciones en que fue empleado (máximo 0.2%), no interfiere con el resultado.

#### Tratamientos

El extracto etanólico total de *Polytrichum juniperinum* mostró actividad citotóxica, sin embargo esta fue promisoriosa solo sobre SiHa ( $90.6 \pm 1.90 \mu\text{g/mL}$ ), los valores de las  $CL_{50}$  calculados para las líneas restantes superaron los  $100 \mu\text{g/mL}$ , valor de referencia empleado para la selección de productos de origen natural con potencial actividad anticáncer (Boyd M, 1997).

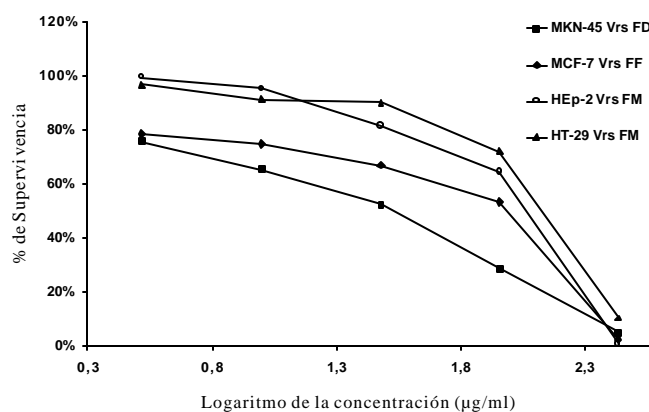
Las fracciones FM, FD y FF mostraron actividad citotóxica sobre algunas de las líneas. Con base en los valores las  $CL_{50}$  (Tabla 4), podrían ser consideradas promisorias las actividades de la fracción en dicloro-

tano sobre MK-45 y HEp-2, y la actividad de la fracción FF sobre la línea celular MCF-7. La fracción metanólica también mostró actividad sobre las líneas celulares HEp-2 y MK-45, aunque los valores de  $CL_{50}$  son mayores que los calculados para la fracción en diclorometano sobre estas mismas líneas.

Las fracciones FD y FM generaron una disminución en el porcentaje de supervivencia de la línea celular HT-29, los valores de  $CL_{50}$  son mostrados en la tabla 4.

Las fracciones hexánica, acuosa y butanólica no mostraron actividad bajo las condiciones de ensayo.

En la Tabla 4 se muestran los valores de  $CL_{50}$  para todas las fracciones que resultaron activas y en la Gráfica 1 se muestra la reducción de la supervivencia celular inducida por las fracciones con actividad citotóxica.



Gráfica 1. Efecto citotóxico de las fracciones *Polytrichum juniperinum* sobre cultivos de líneas celulares de origen tumoral humano.

Tabla 4. Valores de la  $CL_{50}$  para Doxorubicina, el extracto etanólico total y fracciones aisladas de *Polytrichum juniperinum*

Línea Tto	DOXO <sup>a</sup> µg/mL	EE µg/mL	FD µg/mL	FM µg/mL	FF µg/mL
HEp-2	$0.071 \pm 0.021^b$	$104.9 \pm 6.04$	$49.4 \pm 5.72$	$87.4 \pm 5.52$	$100 < CL_{50} \leq 270$
SiHa	$0.37 \pm 0.225$	$90.6 \pm 1.90$	$108.4 \pm 7.76$	$100 < CL_{50} \leq 270$	$100 < CL_{50} \leq 270$
MKN-45	$0.12 \pm 0.002$	$148.7 \pm 4.09$	$34.1 \pm 18.09$	$97.1 \pm 1.47$	$100 < CL_{50} \leq 270$
HT-29	$0.49 \pm 0.002$	$100 < CL_{50} \leq 270$	$78.0 \pm 7.42$	$119.2 \pm 3.18$	$100 < CL_{50} \leq 270$
MCF-7	$0.043 \pm 0.03$	$211.3 \pm 13.49$	$82.5 \pm 2.53$	$113.3 \pm 5.73$	$50.33 \pm 0.07$

a. DOXO, doxorubicina, EE, extracto etanólico; FD, fracción en diclorometano; FM, fracción metanólica; FF, fracción orgánica. b. Media  $\pm$  desviación estándar.

## Conclusiones

Los estudios realizados sugieren que el musgo *Polytrichum juniperinum* podría ser una fuente importante de terpenos, flavonoides, cumarinas y moléculas glicosiladas. En cuanto a la actividad biológica, se puede indicar que algunos de estos metabolitos podrían ser responsables de las alteraciones observadas sobre el SNC en el Test de Irwin y la actividad citotóxica observada sobre el modelo *in vitro* de líneas celulares de origen tumoral humano.

## Agradecimientos

Este trabajo se realizó con la financiación de la Dirección de investigaciones sede Bogotá (DIB), Universidad Nacional de Colombia.

## Bibliografía

- Asakawa Y, Longton R.E.** 1990. Bryophytes, Their Chemistry and Chemical Taxonomy. Clarendon Press Oxford, New York.
- Boyd M.** 1997. Anticancer Drug Development Guide: Preclinical Screening, Clinical Trials, and Approval. B. Teicher Humana Press Inc. Totowa
- Breitmaier E, Voelter W.** 1987. Carbono 13 NMR Spectroscopy: High Resolution Methods and Application in Organic Chemistry and Biochemistry. 3ra. ed., VCH Publishers, New York.
- Churchill SP, Linares EL.** 1995. Prodrómus bryologiae novo-granatis: Introducción a la flora de los musgos de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Bogotá.
- Cordell GA, Beecher CW, Pezzuto JM.** 1991. Can ethnopharmacology contribute to the development of new anticancer drugs? *Journal of ethnopharmacology* **32**: 117-133.
- Cordero CP, Aristizábal F.** 2002. Evaluación preliminar *in vitro* de citotoxicidad de extractos vegetales, empleando métodos colorimétricos. *Revista Colombiana de Biotecnología* **41**:100-106.
- Crews P, Rodriguez J, Jaspars M.** 1998. Organic structure analysis. Oxford University Press, Inc., New York.
- CYTED.** 1999. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo CYTED. Subprograma de Química Farmacéutica. Curso Taller Iberoamericano sobre metodología para la búsqueda de nuevos compuestos líderes en plantas. México.
- Irwin S.** 1962. Drug screening and evaluation procedures. *Science*, **136**: 123-130.
- Mosmann T.** 1983. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assay. *Journal of Immunological Methods*. **65**: 55-63.
- Pezzuto, JM.** 1997. Plant - Derived Anticancer Agents. *Biochemical Pharmacology* **53**: 121-133.
- Sanabria A.** 1983. Análisis Fitoquímico Preliminar. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- \_\_\_\_\_. 1997. De la especie vegetal al medicamento: mito y realidad: Tópicos en productos naturales: la biodiversidad como fuente de moléculas activas. Universidad de Antioquia, Medellín.
- \_\_\_\_\_, **Cárdenas L., Parroquiano, M.** 2002. Actividad antimicrobiana y examen fitoquímico preliminar de siete angiospermas y una muestra de propóleo. *Revista Colombiana de Ciencias Químico Farmacéuticas* **31**: 36-42.

Recibido: abril 25 de 2006

Aceptado para su publicación: diciembre 17 de 2007



# SIGNIFICADO GEOLÓGICO Y ASOCIACIONES PALINOLÓGICAS DE LAS FORMACIONES DIABLO INFERIOR (MIOCENO TARDÍO) Y SAN FERNANDO SUPERIOR (MIOCENO MEDIO), PIEDEMONTES CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES, COLOMBIA

Por

**Hernando Dueñas Jiménez<sup>1</sup> & Thomas van der Hammen<sup>2</sup>**

## Resumen

**Dueñas Jiménez, H. & T. van der Hammen:** Significado geológico y asociaciones palinológicas de las formaciones Diablo Inferior (Mioceno Tardío) y San Fernando Superior (Mioceno Medio), Piedemonte cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(121): 481-498, 2007. ISSN 0370-3908.

Las Formaciones Diablo Inferior y San Fernando Superior afloran en el Piedemonte de la Cordillera Oriental, región de Yopal.

Estudios Palinológicos recientes permiten determinar que los sedimentos de la Formación Diablo Inferior se depositaron en ambientes fluviales de alta energía durante el Mioceno Tardío. Las asociaciones Palinológicas provenientes de estos sedimentos también se caracterizan por la común presencia de palinomorfos redepositados provenientes del Mioceno Temprano, Oligoceno-Eoceno Tardío, Paleoceno y varios niveles del Cretáceo. Los sedimentos que conforman la Formación Diablo Inferior son el resultado de un intenso periodo erosivo en la Cordillera Oriental durante la fase inicial de la Orogenia Andina.

Los sedimentos de la Formación San Fernando Superior se depositaron en mares someros durante el Mioceno Medio. Estos mares del Mioceno Medio ocuparon la mayor parte de las Cuencas de los Llanos Orientales, de Maracaibo, de Barinas-Apure y transgredieron hacia el sur hasta influenciar la parte más occidental de la Cuenca Amazónica.

<sup>1</sup> Miembro de Número Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales ACCEFYN.

<sup>2</sup> Miembro Honorario Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales ACCEFYN.

Las nuevas dataciones palinológicas permiten correlacionar las Formaciones Diablo Inferior y San Fernando Superior con la parte inferior de la Formación Guayabo y con la Formación León respectivamente. Estas dos últimas son Unidades Operacionales utilizadas por la Industria Petrolera para el subsuelo de la Cuenca de los Llanos Orientales. La Formación San Fernando Superior puede ser correlacionada también, con la Formación Pebas aflorante en la parte occidental de la Cuenca del Amazonas.

**Palabras clave:** Formación Diablo Inferior, Formación San Fernando Superior, Palinomorfos Mioceno Tardío y Mioceno Medio, Redepósito de palinomorfos, Paleogeografía Mioceno Medio.

### Abstract

The Diablo Inferior and San Fernando Superior Formations outcrop in the Llanos Orientales Foothills, Yopal area.

Recent palynological studies allow determining that the sediments from the Diablo Inferior Formation were deposited in high energy fluvial environments during the Late Miocene. Recovered palynological assemblages from these strata are also characterized by the common presence of reworked Early Miocene, Oligocene-Late Eocene, Paleocene and Cretaceous palynomorphs. These sediments are the result of a very strong erosion period in the Eastern Cordillera during the initial phase of the Andean Orogeny.

Sediments from the San Fernando Superior were deposited in shallow marine environments during the Middle Miocene. The Middle Miocene seas occupied most of the Maracaibo, Barinas-Apure and Llanos Orientales basins and transgressed toward the south until influencing the western part of the Amazon Basin.

Based on the new available palynological data it is possible to correlate the Diablo Inferior and the San Fernando Superior Formations with the Lower Guayabo and Leon Formations respectively. These two last, are operational Units used by the Oil Industry for the subsurface of the Llanos Orientales Basin. The San Fernando Superior Formation can be also correlated with the Pebas Formation which outcrops in the western part of the Amazonas Basin.

**Key words:** Diablo Inferior Formation, San Fernando Superior Formation, Late Miocene and Middle Miocene palynomorphs, Redeposit of palynomorphs, Paleogeography Middle Miocene.

### Introducción

En el borde Oriental de la Cordillera Oriental de Colombia, se presenta un cinturón plegado de colinas bajas que corren paralelas a la Cordillera Oriental y que se conoce como el Piedemonte de los Llanos Orientales (Llanos Orientales Foothills). Este cinturón plegado en la región de El Yopal, se encuentra limitado por dos sistemas de fallas de cabalgamiento con vergencia al oriente que reciben el nombre de falla de Guaicaramo al occidente y Falla de Yopal al oriente. Como parte del cinturón plegado, se presentan alargados y estrechos sinclinales dentro de los que se destacan el sinclinal de Zapatosa y el sinclinal de Numchia, formados durante el periodo final de la Orogenia Andina, que produjo el levantamiento general de la Cordillera Oriental hasta su posición actual. Los sinclinales de Zapatosa y Numchia presentan en sus núcleos sedimentos de la For-

mación Caja y en sus flancos, en forma estratigráficamente descendente pero topográficamente ascendente, estratos de las Formaciones Diablo Superior, Diablo Inferior y Formación San Fernando (Figura 1).

El nombre de Formación Diablo fue utilizado por primera vez por **Van der Hammen** (1958) quien recoge información inédita de O. Renz proveniente de reportes internos de la Compañía Shell Colombia. Posteriormente **Ulloa y Rodríguez** (1976, 1981) incorporan este nombre en los mapas geológicos del área de Tauramena. **G. Renzoni** (1991), en su trabajo sobre la geología de El Yopal, subdivide la Formación Diablo en Conjunto Superior y Conjunto Inferior. Con el tiempo, estos dos nombres se transformaron en Formación Diablo Superior y Formación Diablo Inferior, que son los nombres que actualmente se emplean. La Formación Diablo Inferior presenta un relieve sobresaliente conformado

por tres filos continuos que se alternan con dos valles que son el reflejo topográfico de la alternancia de niveles arenosos y arcillosos dentro de esta Unidad, la cual presenta un espesor máximo de 600m calculados sobre el mapa geológico (Figura 1).

A lo largo de la Quebrada Jarana, localizada a 13 kilómetros al Norte de El Yopal (Figura1) se levantaron 237m de sección estratigráfica correspondientes a la Formación Diablo Inferior (Figura2), observándose que el límite con la Formación suprayacente (Formación Diablo Superior) es inconforme. El límite con la Unidad infrayacente (Formación San Fernando Superior) es aparentemente transicional. En este trabajo presentamos la interpretación bioestratigráfica de la secuencia aflorante, basados en datos obtenidos de los análisis palinológicos de veinte mues-

tras de superficie de la Formación Diablo Inferior así como de dos muestras de la Formación Diablo Superior y dos muestras provenientes de la Formación San Fernando Superior. Así mismo, presentamos una nueva interpretación geológica de la Formación Diablo Inferior, la cual permite correlacionar esta Unidad con las Unidades estratigráficas que en la actualidad utilizan la Industria Petrolera en sus trabajos de exploración en la Cuenca de los Llanos Orientales (Foothills, Foreland).

### Aspectos geológicos

En el Piedemonte Llanero (Llanos Foothills), se presenta el choque de dos Nomenclaturas Estratigráficas que se utilizan para la Cuenca de los Llanos Orientales. Prácticamente es el choque entre una Nomenclatura proveniente

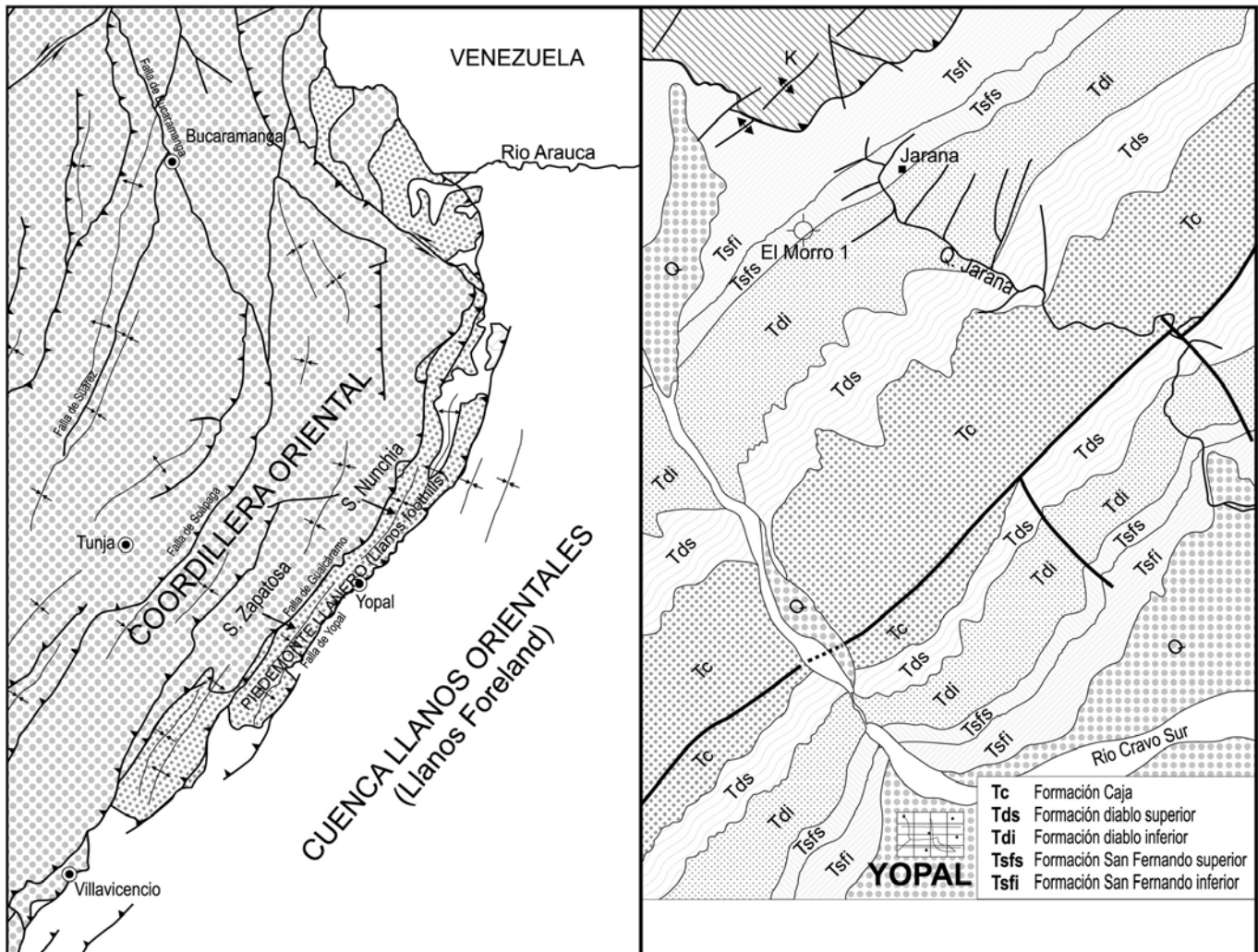


Figura 1. Mapa geológico de Yopal (adaptado de Renzoni 1992)

de trabajos de superficie y la Nomenclatura que se estableció para la Cuenca del Catatumbo (**Notestein** 1943) y que en forma forzada y sin criterios geológicos válidos, se introdujo en la Cuenca de los Llanos Orientales durante las primeras fases de la exploración petrolera (**Dueñas**, 1985). Es el choque entre una Nomenclatura de Superficie y una Nomenclatura de Subsuelo.

Durante mucho tiempo la edad atribuida a la Formación Diablo Inferior fue tema de discusión. O. Renz en informes internos de la Compañía Shell Colombia, le asignó una edad Oligoceno, lo cual de inmediato obligaba a considerar a la Formación infrayacente (Formación San Fernando Superior) como “No Más Joven que Oligoceno”. Thomas Van der Hammen en informes internos del Servicio Geológica Nacional del año 1958, menciona que “la edad palinológicamente establecida de la Formación Diablo es Oligoceno Medio (**Van der Hammen** 1960, 1961). La parte más superior puede ser ya de edad Oligoceno Superior”. **Ulloa & Rodríguez** (1976) en la memoria del mapa Geológico de Tauramena menciona basándose en correlaciones regionales que “la edad de la Formación Diablo se considera como de Mioceno Inferior a Mioceno Medio”. En la misma publicación, **Ulloa & Rodríguez** (1976) presentan como Figura 5 una columna estratigráfica generalizada en donde asigna a la Formación Diablo una edad Mioceno Inferior al mismo tiempo que mencionan “la Formación Diablo corresponde con las Formaciones Calzón y Chartre establecidas por **Miller y Etayo** en 1972”. Sin embargo **Ulloa y Rodríguez** (1976) en la columna estratigráfica que acompaña al mapa geológico de Tauramena (Cuadrángulo K-13) le asignan a la Formación Diablo una edad Oligocénica. En la memoria explicativa sobre el mapa geológico de El Yopal, **G. Renzoni** (1985, 1991) retoma de nuevo la edad Oligoceno y menciona que “de acuerdo con **Van der Hammen** (1958) la Formación Diablo se sedimentó durante el Oligoceno”.

Mientras que los trabajos geológicos de superficie sugerían una edad Oligocénica para la Formación Diablo Inferior, las Compañías Petroleras (**Cooper et al**, 1995) jalonando sus Unidades Sísmicas y Estratigráficas (pozos, E-logs) establecidas para el Foreland de la Cuenca de los Llanos Orientales, definían en forma muy general, que dentro del cinturón plegado de la región de El Yopal afloraban sedimentos relacionables con las Formaciones Guayabo de edad Mioceno Tardío y León de edad Mioceno Medio, contradiciendo en forma clara las edades establecidas por el Ingeominas en los trabajos geológicos de superficie. Estas contradicciones han sido tema recurrente de discusión en las reuniones geológicas en las dos últimas décadas (**Dueñas**, 1985), y en especial en los últimos 10 años durante los cuales el cinturón plegado (Llanos Foothills)

se convirtió en una de las áreas petrolíferas más prolíferas de Colombia (Campos Cusiana, Cupiagua).

Como paso inicial para intentar solucionar las discrepancias que se presentaban entre la geología de superficie y la geología de subsuelo, se decidió analizar palinológicamente la secuencia estratigráfica aflorante a lo largo de la Quebrada Jarana (Figura 1), que involucra sedimentos de la Formación Caja (Tc), de la Formación Diablo Superior (Tds), de la Formación Diablo Inferior (Tdi), de la Formación San Fernando Superior (Tsfs) y de la Formación San Fernando Inferior (Tsfi). La experiencia adquirida al controlar palinológicamente los pozos perforados en el Foreland y Foothills de la Cuenca de los Llanos Orientales, en especial la relacionada con la preparación de muestras, fue aplicada para el estudio de las muestras de superficie (afloramientos).

Desde el inicio de los análisis palinológicos, se observó que las asociaciones palinológicas recuperadas de las muestras de la Formación Diablo Inferior se caracterizaban por presentar una mezcla de microfloras de diversas edades. Palinomorfos de edad Mioceno Tardío tales como *Cicatricosisporites baculatus*, *Echitricolporites spinosus*, *Fenestrites logispinosus* y *Echitricolporites cf. mcneillyi*, se presentan junto a palinomorfos más antiguos, de reconocido valor estratigráfico tales como: *Echitricolporites maristellae* (Mioceno Temprano), *Cicatricosisporites dorogensis* (Oligoceno a Eoceno Tardío), *Retistephanopores angelicus* (Oligoceno Temprano a Eoceno Tardío), *Proxapertites operculatus* y *Bombacacidites annae* (Paleoceno), *Spinizonocolpites baculatus* (Paleoceno Temprano a Maastrichtiano), *Spinizonocolpites echinatus* (Maastrichtiano), *Zlivisporites blanensis* (Maastrichtiano), *Araucariacites* spp. (Cretáceo), *Dinogymnium acuminatum* (Maastrichtiano Temprano a Coniaciano) y *Odontochitina operculata* (Cretáceo) entre muchos otros. En conjunto los palinomorfos recuperados de los estratos que conforman la Formación Diablo Inferior claramente indican, que los sedimentos que componen esta Unidad incluyen abundante material retrabajado de diversas edades.

La interpretación palinológica de muestras con presencia de material redepositado es compleja. En este caso específico, la asociación de palinomorfos reconocida como la más joven es la que establece la edad de los sedimentos, mientras que el conjunto de palinomorfos más antiguos (redepositados) se considera como un ruido molesto que incomoda la asignación de edad, pero que da valiosa información sobre la evolución geológica de la cuenca de depósito.

La asociación de *Cicatricosisporites baculatus*, *Echitricolporites spinosus*, *Fenestrites logispinosus*, *Grimsdalea*



*magnaclavata* y *Echitricolporites cf. mcneillyi* la consideramos como la más joven (*in situ*), y con base en ello asignamos a los sedimentos de la Formación Diablo Inferior una edad Mioceno Tardío. Al mismo tiempo consideramos que estos sedimentos pertenecen a la zona de *Echitricolporites spinosus* establecida por Muller *et al* (1987) para el Norte de Sur América. La abundante presencia de material redepositado es indicativa de que estos sedimentos se depositaron en ambientes de alta energía.

La espora trilete *Cicatricosisporites dorogensis*, muy frecuentemente asociada a sedimentos Oligocénicos, se presenta en forma común en las asociaciones palinológicas recuperadas de muestras de la Formación Diablo Inferior. Suponemos que el identificar este marcador palinológico y el no detectar la presencia de palinomorfos del Mioceno Tardío fue lo que originó la asignación de una edad Oligocénica para estos sedimentos en 1958. La metodología utilizada en la preparación de las muestras pudo contribuir a esta confusión. Hasta hace unos diez años, la metodología utilizada en la preparación de muestras, incluía el uso rutinario de oxidación fuerte de la materia orgánica recuperada, lo cual propiciaba que palinomorfos de estructuración fuerte y colores oscuros (como es el caso de *C. dorogensis*) se destacaran en las asociaciones palinológicas recuperadas, mientras que palinomorfos de coloración pálida y estructuración fina (*in situ*) quedarán enmascarados dentro de la materia orgánica.

Cuando en las asociaciones recuperadas de las muestras de superficie se presentan entremezclados palinomorfos considerados como palinomorfos “guías” o marcadores de edades, los cuales por lo general presentan morfologías conspicuas que permiten su rápida identificación, la interpretación del fenómeno de retrabajamiento puede llegar a ser no complicado. El principal problema para detectar el retrabajamiento por métodos palinológicos ocurre cuando las asociaciones se componen de palinomorfos que presentan una amplia distribución estratigráfica, que son por lo general los palinomorfos más abundantes. En este caso hemos utilizado como ayuda para detectar los palinomorfos retrabajados: el color y la preservación de los palinomorfos así como la asociación típica de palinomorfos.

Por lo general el polen y las esporas *in situ*, presentan un color más brillante y más pálido que los palinomorfos reciclados. Los palinomorfos forman parte de la materia orgánica de los sedimentos la cual en forma general recibe el nombre de kerógeno. Cuando el kerógeno empieza su proceso de fosilización (diagénesis) empieza al mismo tiempo un proceso de carbonización de la materia orgánica que in-

cluye la pérdida progresiva de Hidrógeno y de Oxígeno y la concentración de Carbono, lo cual se refleja en que todos los componentes del kerógeno, incluidos polen y esporas, van oscureciendo sus colores. En una secuencia estratigráfica normal, los palinomorfos más jóvenes conservan colores (en la gama de amarillos y carmelitas) más tenues, pálidos o frescos, mientras que los palinomorfos de mayor edad exhiben colores comparativamente más oscuros o más carbonizados, llegando al extremo de presentar colores muy oscuros o negros. En las preparaciones palinológicas de las muestras de la Quebrada Jarana, la presencia de palinomorfos muy oscuros se convirtió en una alerta temprana sobre la presencia de material reciclado.

### Materiales y método palinológico

Veinte muestras de litologías finas (lodolitas y limolitas) fueron seleccionadas para determinar sus composiciones microflóricas y con base en ellas asignar edades relativas y ambientes de depósito a estos estratos. La posición estratigráfica de las muestras seleccionadas se presenta en la Figura 2, la cual corresponde a la sección estratigráfica levantada a lo largo de la Quebrada Jarana. Adicionalmente en la figura 2 se presenta, la composición litológica establecida para la secuencia aflorante.

La preparación de las muestras se realizó aplicando la técnica establecida en los laboratorios de BIOSS Ltda., que consiste en el tratamiento de 30 gramos de sedimentos finamente triturado con HCl (40%) para remover material calcáreo y con HF (40%) para remover silicatos. Para la separación de la materia orgánica del material mineral se utilizó un vidrio de reloj y filtros con mallas plásticas de 10 micrones de apertura. Por lo general no se oxidaron las muestras. Dos placas de estudios fueron preparadas de cada muestra utilizándose Bálsamo de Canadá como medio de montaje.

Los resultados de los análisis palinológicos gráficamente se muestran en el Anexo I, en el cual se presenta la posición estratigráfica de los palinomorfos identificados como material *in situ*, junto a sus abundancias. Esta tabla incluye la suma total de palinomorfos y es por ello que fácilmente se pueden transformar estas abundancias en porcentajes. Solo una de las placas de estudio se analizó en forma detallada. La segunda placa de estudio fue revisada solo para determinar la presencia de palinomorfos extraños o de localizar palinomorfos aptos para ser fotografiados. El residuo orgánico obtenido de las muestras fue posteriormente utilizado para elaborar granos aislados (SGS), la mayoría de los cuales fueron fotografiados. En el Anexo II, se grafica la presencia de los palinomorfos iden-

tificados como provenientes de material redepositado. En la Figura 3, se presenta el rango estratigráfico establecido para la Cuenca de los Llanos Orientales de los palinomorfos interpretados como material retrabajado.

Todas las preparaciones palinológicas generadas durante este estudio, se depositaron en el Laboratorio de Palinología del Instituto Colombiano del Petróleo en Bucaramanga.

### Bioestratigrafía

Las dos muestras estratigráficamente superiores (Muestras 52a y 52) de la sección levantada a lo largo de la Quebrada Jarana corresponden a la Formación Diablo Superior. Estas dos muestras fueron encontradas prácticamente estériles, lo cual impide asignar a estos sedimentos

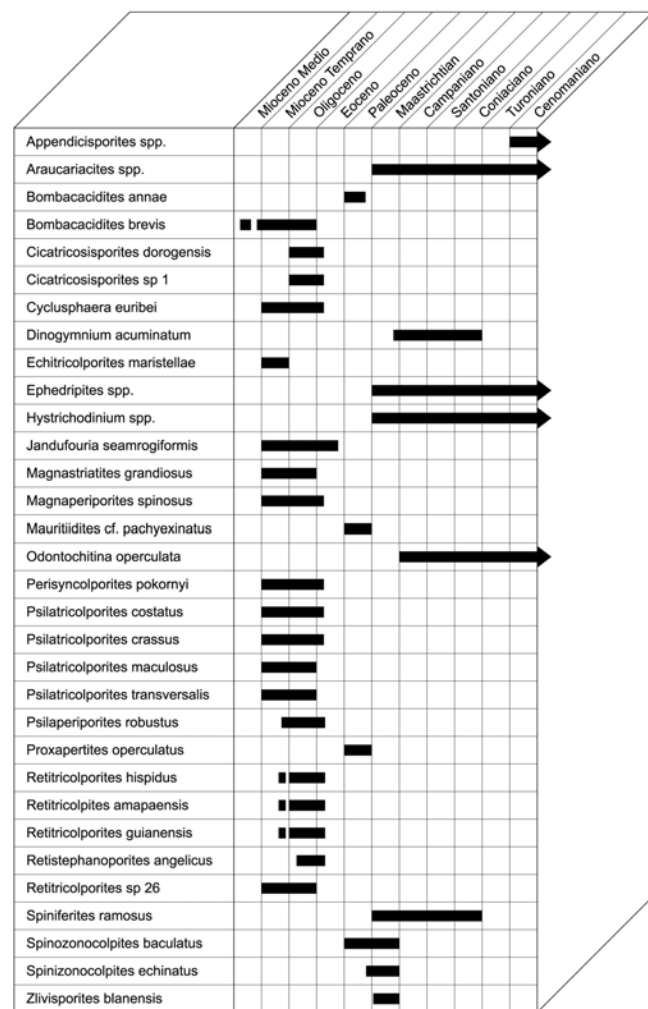


Figura 3. Rango estratigráfico. Cuenca Llanos Orientales de palinomorfos interpretados como redepositados.

una edad por métodos palinológicos. Solo se reporta la presencia de algunas esporas de hongos que carecen de valor estratigráfico.

Las muestras del intervalo 51A-37 (Figura 2) pertenecen a la Formación Diablo Inferior. De estas muestras fue posible obtener buenas asociaciones de palinomorfos, destacándose la presencia de *Echitricolporites spinosus* y *Cicatricosisporites baculatus* quienes se encuentran acompañados en diferentes niveles por *Fenestrites longispinosus*, *Malvacipollis spinulosa*, *Bombacacidites deltoides* (Prov.), *Crotonipollis jarana* (prov.), *Trichotomocolpites clavatus* (prov.), *Trichotomocolpites verrucatus* (prov.), *Malvacipollis minutus* (prov.), *Multimarginites vanderhammeni*, *Echitricolporites cf. mcneillyi*, *Gimsdalea magnaclavata* y *Bombacacidites baculatus* entre otros. Estos palinomorfos en conjunto, nos permiten asignar una edad Mioceno Tardío a los sedimentos de la Formación Diablo Inferior. Al mismo tiempo nos permiten determinar que estas asociaciones palinológicas pertenecen a la Zona de *Echitricolporites spinosus* establecida por Muller et al (1987).

Las muestras 36 y 35 pertenecen a la Formación San Fernando Superior. Estos sedimentos arrojaron buenas asociaciones palinológicas las cuales se encontraron dominadas por Microforaminíferos y Dinoflagelados lo cual es indicativo de que estos sedimentos se depositaron en ambientes marinos. Las asociaciones palinológicas también incluyen la presencia de las esporas triletes *Crassoretitriletes vanraadshooveni*, *Magnastriatites grandiosus*, *Psilatritiles* spp. y los granos de polen correspondientes a *Zonocostites ramona* y *Grimsdalea magnaclavata* entre otros. En conjunto los palinomorfos recuperados nos permiten asignar a estos sedimentos una edad Mioceno Medio y determinar que pertenecen a la Zona de *Crassoretitriletes vanraadshooveni* establecida por Muller et al (1987) para el Mioceno Medio del Norte de Suramérica.

### Correlaciones

La asignación de una edad palinológica de Mioceno Tardío para los estratos que conforman la Formación Diablo Inferior y de una edad Mioceno Medio para los estratos de la Formación San Fernando Superior nos permite efectuar cambios significativos a la columna estratigráfica propuesta por Renzoni (1991) para el área de El Yopal, así como llevar a cabo una correlación entre la Nomenclatura estratigráfica utilizada en superficie en el Piedemonte Llanero y la Nomenclatura estratigráfica utilizada en subsuelo por las Compañías Petroleras (Figura 4).

Por su posición estratigráfica, la Formación Diablo Superior no puede ser más Antigua que Mioceno Tardío, teniendo en cuenta la edad establecida para la Unidad infrayacente. Esta Formación correlaciona tentativamente con la parte superior de la Formación Guayabo y con la denominada por los geólogos de INTERCOL Formación Calzón. La Formación Diablo Inferior del Mioceno Tardío por su parte, correlaciona con la parte inferior de la Formación Guayabo a la cual los geólogos de INTERCOL y algu-

nas otras Operadoras Petroleras denominaron Formación Charte (Figura 4).

Las arcillas de la Formación San Fernando Superior de edad Mioceno Medio correlacionan con la secuencia arcillosa de la Formación León depositada en ambientes marinos. Estas arcillas también se correlacionan con la Formación Pebas que aflora en la parte occidental de la Cuenca del Amazonas.

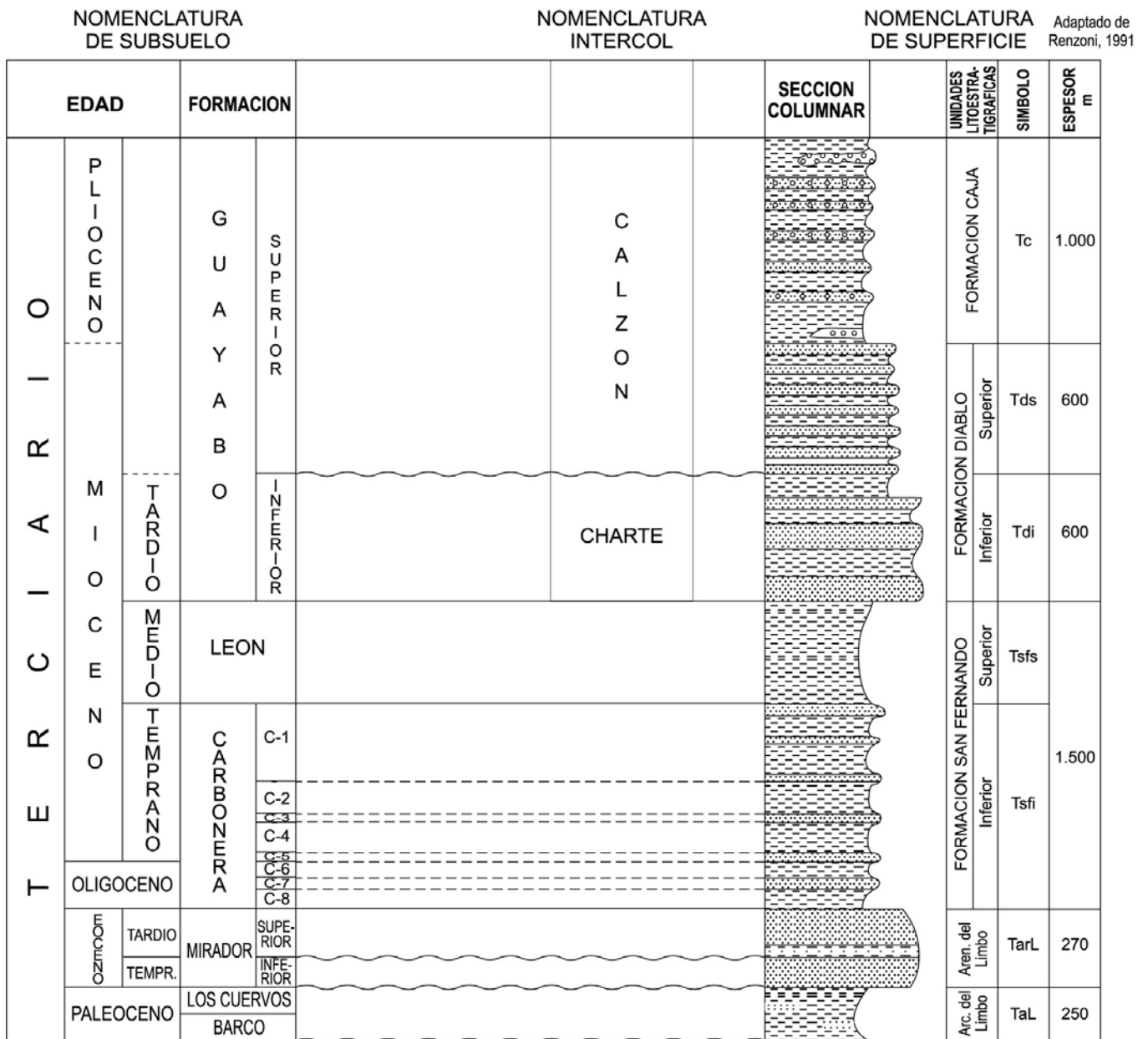


Figura 4. Correlación entre la nomenclatura utilizada en superficie y en subsuelo piedemonte Cuenca Llanos Orientales.



La Formación Mirador en el Piedemonte de los Llanos Orientales se compone de tres cuerpos litológicos. Cuerpos arenosos se presentan al tope y a la base y se encuentran separados por un delgado cuerpo arcilloso. Estudios palinológicos recientes han permitido determinar para el cuerpo arcilloso así como para el cuerpo arenoso superior una edad Eoceno Tardío. Para el cuerpo basal se ha determinado una edad Eoceno Temprano. Solo parcialmente el cuerpo arenoso superior se presenta en la Cuenca de los Llanos Orientales (Foreland). **Van der Hammen** (1958, 1960, 1961) menciona que la Formación Areniscas del Limbo se compone de “una sucesión de areniscas conglomeráticas sobre todo en la parte inferior. En la mitad puede haber una intercalación de areniscas arcillosas y de lutitas arenosas. Al mismo tiempo menciona que “la edad de las areniscas inferiores de la Formación Limbo es Eoceno Temprano. Las Areniscas del Limbo corresponden al Mirador del Catatumbo y a la Formación La Paz del Valle Medio del Magdalena”. Así pues, entre las Areniscas del Limbo y la denominada Formación Mirador de Los Llanos Orientales (Foothills, Foreland), se presenta una buena correlación litológica y bioestratigráfica.

El tope y la base de la Formación San Fernando Superior correlacionan con el Tope y la base de la Formación León. Por lo tanto, las intercalaciones de arenas y arcillas de la Formación San Fernando Inferior se correlacionan con la denominada Formación Carbonera.

De acuerdo con **Van der Hammen** (1958, 1960, 1961) “la Formación Arcillas del Limbo es de edad Paleoceno y se componen de arcillolitas grisáceas con intercalaciones de mantos de carbón y bancos de areniscas en la parte baja”. Las Compañías Petroleras que operan en el Piedemonte Llanero, han subdividido los sedimentos de edad Paleoceno en Formación Los Cuervos y Formación Barco. La Formación Los Cuervos es básicamente arcillosa y reposa directamente sobre la Formación Barco que es básicamente arenosa. Así pues, La Formación Arcillas del Limbo correlacionan directamente con las Formaciones Los Cuervos y Barco (Figura 4).

### Redepósito de palinomorfos

El redeposito de material, es un fenómeno común en sedimentos Terciarios del Norte de Sur América asociados a la Orogenia Andina. Mas común de lo que los palinólogos lo han reportado en sus trabajos. En esta sección Terciaria, los límites de secuencias estratigráficas están por lo general relacionados con pulsos orogénicos que pueden llegar a cambiar abruptamente las características de las cuencas de depósito y dar inicio a periodos erosivos.

No hay que perder de vista que durante el Terciario, mientras en la Cuenca de los Llanos Orientales se depositan en forma intercalada rocas de origen continental y de origen marino, al Occidente se desarrollaba una Proto-Cordillera Oriental que aunque se insinuaba como reducidas y aisladas colinas, eran áreas positivas sujetas a erosión. Durante el depósito de los sedimentos del Eoceno Tardío al Mioceno Medio la principal fuente de clásticos fue el Escudo de la Guyana. Sin embargo desde el Occidente se producía un aporte sedimentario que alcanzaba a influenciar los sedimentos del borde Occidental de la Cuenca de los Llanos. Por ello es que a lo largo de la secuencia Terciaria del Piedemonte Llanero es posible reportar la presencia de material retrabajado. Durante el depósito de las Formaciones Diablo Inferior y Diablo Superior el Escudo de la Guyana dejó de ser la fuente principal de sedimentos, convirtiéndose la recién formada Cordillera Oriental en la principal fuente de aporte de clásticos.

Revisando el trabajo de **Germeraad et al** (1968), es posible observar ejemplos de retrabajamiento de palinomorfos:

La figura 1 de este trabajo corresponde a la carta de distribución de palinomorfos de la sección de superficie Paz de Río, Cuenca del Valle Medio del Magdalena. En esta gráfica, palinomorfos restringidos al Maastrichtiano y al Paleoceno se encuentran entremezclados con palinomorfos del Oligoceno y del Mioceno como es el caso de:

- *Proteacidites dehaani* un típico elemento de la flora Maastrichtiana que se encuentra asociado con palinomorfos del Oligoceno pertenecientes a la zona Atlántica de *Cicatricosisporites dorogensis*.
- *Foveotriletes margaritae*, *Bombacidites annae*, *Proxapertites operculatus* y *Proxapertites cursus*, palinomorfos Paleocénicos se encuentran asociados con palinomorfos Miocénicos de la zona Atlántica de *Verrutricolporites rotundiporus*.
- *Cicatricosisporites dorogensis* considerado como el palinomorfo más característico del Oligoceno en áreas Tropicales, se presenta asociado con palinomorfos Miocénicos.

La Figura 2 del trabajo de **Germeraad et al** (1968) corresponde a la carta de distribución de palinomorfos del pozo Chafurray-3, en esta gráfica observamos:

- La presencia aislada de *Proxapertites operculatus* y su asociación con palinomorfos del Mioceno Medio (*Crassoretitriletes vanraadshooveni*).

- La co-ocurrencia de *Cicatricosisporites dorogensis* (Oligoceno) y *Crassoretitriletes vanraadshooveni* (Mioceno Medio).

En la Figura 3 correspondiente a la sección de superficie de Camino Rubio (Venezuela) es posible observar la presencia aislada y fuera de contexto de *Retidiporites magdalenensis*, *Proxapertites operculatus* y *Spinizonocolpites* group dentro de palinofloras del Eoceno.

En la carta de distribución del pozo Icootea-1, Venezuela (Figura 4) es posible observar la presencia aislada de *Bombacacidites annae* y *Retidiporites magdalenenses* en sedimentos del Eoceno.

En la carta de distribución de palinomorfos del pozo B-188, Venezuela (Figura 6) se observa la presencia aislada (fuera de contexto) de *Proteacidites dehaani* y *Cicatricosisporites dorogensis* dentro de palinofloras del Mioceno Temprano y Mioceno Medio.

En la carta de distribución del pozo CO-85, Trinidad (Figura 7) es posible observar la presencia de *Proteacidites dehaani*, *Foveotriletes margaritae*, *Bombacacidites annae* y *Cicatricosisporites dorogensis* asociadas con palinofloras del Mioceno Medio y Tardío.

En el Pozo Paria – 1, Venezuela (Figura 8) *Proteacidites dehaani*, *Foveotriletes margaritae*, *Echitriporites trianguliformis*, *Proxapertites cursus* y *Bombacacidites annae* se asocian a palinofloras del Mioceno Tardío.

En la tabla de distribución estratigráfica de los principales palinomorfos Terciarios Tropicales **Germeraad et al.** (1968, Figura 15) presenta la distribución del *Proxapertites operculatus*, palinomorfo descrito por **Van der Hammen** (1, 956) que puede ser considerado como el polen mas común en las asociaciones palinológicas provenientes de sedimentos Paleocénicos del trópico. En esta Tabla, el *P. operculatus* presenta una distribución no continua, que atraviesa toda la secuencia Terciaria. En varios trabajos recientes relacionados con la Cuenca de los Llanos Orientales (foreland), ha sido posible establecer que el *P. operculatus* se encuentra restringido a la secuencia paleocénica. Consideramos que la presencia de este palinomorfo en sedimentos del Mioceno, Oligoceno y Eoceno puede estar relacionada con material redepositado.

Analizando la Tabla 13 del trabajo de **Lorente** (1986) que corresponde a la carta de distribución de polen y esporas en la Cuenca de Maracaibo, podemos observar la presencia de *Proxapertites operculatus*, *Proxapertites cursus*, *Spinizonocolpites echinatus*, elementos de la flora Paleocénica, dentro de asociaciones palinológicas del Mioceno. En la pagina 173

**Lorente** (1986) señala “que de acuerdo a **Germeraad et al** (1968) la especie *Proteacidites dehaani* se encuentra restringida a la parte baja de la zona de *Proxapertites operculatus* (Maastrichtiano), pero en Venezuela esta especie se encuentra presente a lo largo de toda la secuencia estratigráfica del Terciario Superior”. En nuestra opinión la presencia de *P. dehaani* en asociaciones palinológicas Neógenas debe interpretarse como no *in situ*. Así mismo **Lorente** (1986) señala la presencia no continua de *Cicatricosisporites dorogensis* a lo largo de toda la secuencia del Terciario Superior y menciona (pagina 146) que “en Venezuela la presencia de *Cicatricosisporites dorogensis* ha sido registrada desde la zona de *Janmulleripollis pentaradiatus* (Eoceno Tardío) hasta la zona de *Alnipollenites* (Plioceno)”. En nuestra opinión el *C. dorogensis* debe provenir de material redepositado, cuando se encuentra asociado a palinofloras del Mioceno y del Plioceno. La Cuenca del Lago de Maracaibo recibió los sedimentos provenientes de la denudación de la Cordillera Oriental, que fueron transportados por las corrientes fluviales relacionadas con el sistema del proto-río Magdalena y es por ello que no debe extrañar la abundante presencia de material redepositado asociado a la secuencia estratigráfica Miocénica y Pliocénica del Lago de Maracaibo.

Otro claro ejemplo de rededósito de material se presenta asociado con los pozos Tarra-1 y Tarra-2 localizados en la parte occidental del Lago de Maracaibo (**Dueñas**, 1999). En estos pozos, muestras de corazón arrojaron una mezcla de palinofloras del Paleoceno y del Eoceno. La edad de estos sedimentos es marcada por la asociación palinológica más joven (Eoceno), mientras que la flora más antigua debe ser interpretada como material no *in situ* (redepositado).

Sedimentos directamente correlacionables con la Formación Diablo Inferior se han reportado en varios pozos perforados en el Piedemonte de los Llanos Orientales. Al analizar por métodos palinológicos estos sedimentos se ha podido detectar la presencia de palinomorfos redepositados asociados con microfloras del Mioceno Tardío. Después de ser perforado, este material (retrabajado) puede llegar a incorporarse al lodo de perforación y contaminar muestras de zanja (cuttings) provenientes de niveles estratigráficamente mas antiguos (material caído, cavings). Tal es el caso del Oligocénico *C. dorogensis* que se ha reportado como parte de asociaciones palinológicas del Mioceno Tardío (rededósito) y del Mioceno Medio (material caído).

Parece evidente que en algunos de los estudios palinológicos pioneros en Colombia, llevados a cabo en los laboratorios del Ingeominas, sedimentos Miocénicos provenientes de las Cuencas del Valle Medio del Magdale-

na y de la Cordillera Oriental fueron considerados como Oligocénicos, con base en la presencia de palinomorfos redepositados. Estas dataciones, sobretudo las que han presentado discrepancia con la información geológica de superficie, necesitan ser revisadas.

### Aspectos paleogeográficos

El inicio del Mioceno Medio coincide con una elevación global del nivel del mar, la cual fue incrementándose hasta el final de este Período. El Mar del Mioceno Medio transgredió hasta ocupar extensas áreas en las Cuencas de los Llanos Orientales, Maracaibo, Barinas, Apure y Maturín formando el Mar del Llano (Figura 5) y dando origen al depósito de una gruesa secuencia de arcillolitas caracterizadas por presentar asociaciones de microfósiles dominadas por Foraminíferos y Dinoflagelados. Estas arcillolitas marinas se conocen en el Piedemonte Llanero como Formación San Fernando Superior y en la Cuenca de los Llanos Orientales como Formación León (Figura 1 y 4).

El emplazamiento de los Andes de Mérida así como el levantamiento principal de la Cordillera Oriental se produjeron durante el Mioceno Tardío y el Plioceno. Es por ello que los Andes de Mérida no presentaban una barrera que impidiera la libre conexión entre el mar abierto (proto-Caribe, Atlántico) y el Mar del Llano. La Formación San Fernando Superior encuentra como equivalente cronoestratigráfico a la Formación La Rosa en la Cuenca de Maracaibo y a la Formación Carapita en la Cuenca de Maturín (oriente venezolano).

El Arco de Vaupés que en la actualidad conforma una divisoria de aguas entre la Cuenca de los Llanos Orientales y la Cuenca del Amazonas no representaba durante el Mioceno Medio una barrera efectiva, y es por ello que este mar del Mioceno Medio transgredió hasta influenciar una gran área de la Cuenca Amazónica (Estuario Amazónico). La Formación San Fernando Superior encuentra como equivalente cronoestratigráfico en la región amazónica brasilera a la Formación Solimoes y en la región amazónica peruana a la Formación Pebas. La influencia marina durante el depósito de los sedimentos de las Formaciones Solimoes y Pebas, ha sido ampliamente analizada por Carina Hoorn (Hoorn, 1993, 1994 y 2006).

La zona baja del Río de la Plata que bordea el extremo sur del Escudo Brasileño, también fue utilizada como vía de penetración del Mar Miocénico a la parte sur de Sur América. Testimonios de esta trasgresión se presentan como parches en varias localidades de la Cordillera Central de Argentina y en el Piedemonte de la Región de Puna (Ramos y Alonso, 1995). Ramos y Alemán (2000), Ramos

(2006) también reportan que los depósitos marinos del Mioceno Medio alcanzaron la región boliviana de Santa Cruz de la Sierra, (Formación Yecua). El área cubierta por el Mar del Mioceno Medio en el Cono Sur fue muy extensa dando origen a lo que Ramos y Alemán (2000) denominan el Mar Panarense.

Al final del Mioceno Medio se presenta un período orogénico que produce un levantamiento generalizado de la Cordillera de los Andes cambiando el patrón de drenaje y dando origen en la región ecuatorial al paleo-Río Amazonas (Hoorn, 1994). En lo que hace relación a los Andes Colombianos, este levantamiento se llevó a cabo con movimientos cortos pero continuos, los cuales fueron transformando paulatinamente los mares someros en pantanos salobres y posteriormente en ambientes fluviales. Este cambio paulatino, podría haber permitido la adaptación de fauna marina a ambientes fluviales y ello explicar la presencia en la Cuenca Amazónica de mamíferos (delfín rosado) y peces (rayas, pez globo) de origen marino (Hoorn, 2006).

Con cada pulso compresivo (choque de placas) a finales del Mioceno Medio se incrementa el levantamiento de la Cordillera Oriental y la deformación del Cinturón Frontal de la Cordillera Oriental que llega a convertirse en el Piedemonte Llanero. Dentro de este cinturón estrecho y alargado se forman los sinclinales de Zapatosa y Nunchia.

La Cordillera Oriental, convertida en zona de aporte de sedimentos, provee el material para rellenar esta Cuenca Frontal. Corrientes fluviales torrenciales del Mioceno Tardío arrastran hacia el oriente, por primera vez en la Cuenca de los Llanos Orientales, gran cantidad de material. En la Cuenca Frontal, poco a poco va depositándose el material de denudación, al mismo tiempo que se va depositando la materia orgánica *in situ* la cual incluye polen y esporas provenientes de las plantas que habitan la cuenca y las zonas aledañas. Esta mezcla de material retrabajado y sedimentos propios (*in situ*) de la Cuenca, dio origen a la secuencia estratigráfica que conforma la Formación Diablo Inferior cuya distribución areal se restringe a la Cuenca Frontal o Piedemonte Llanero. Mientras se producía el depósito de los sedimentos de la Formación Diablo Inferior en la Cuenca Frontal, en la Cuenca de los Llanos Orientales (Foreland) se presentaba un periodo de erosión o no depositación.

Los cortos y continuos pulsos compresivos, son el preámbulo de un proceso orogénico que levantó la Cordillera Oriental de un nivel aproximado de 700 metros de altura hasta alcanzar elevaciones superiores a los 3.000 metros en un periodo de tiempo geológico relativamente corto (Van der Hammen *et al* 1973). Este proceso orogénico



**Figura 5.** Extensión del mar y de las áreas fluviales durante el mioceno medio.  
Adaptado de: Ramos y Alemán, 2000 y de Hoorn, 2006.

abruptamente interrumpe el depósito de sedimentos de la Formación Diablo Inferior, y da paso a una muy gruesa avalancha de sedimentos gruesos (> 10.000' en el Piedemonte) que cubren por igual a los sedimentos depositados en la Cuenca Frontal (Foothills) y a los depositados en la Cuenca de los Llanos (Foreland).

El depósito de sedimentos de la Formación Diablo Inferior, se comporta como un relleno restringido a la Cuenca Frontal que es fosilizado muy rápidamente por la caótica y muy abundante sedimentación posterior. Muchos de los pozos perforados en el área del Piedemonte Llanero reportan la presencia de estos sedimentos.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a HOCOL S.A. por autorizarnos publicar la información relacionada con la columna estratigráfica de la Formación Diablo Inferior y por el invaluable apoyo recibido durante la ejecución de este proyecto. Así mismo agradecemos a los Geólogos Alexis Rosero y Giancarlo Renzoni por sus valiosas opiniones sobre el contenido de este trabajo.

### Bibliografía

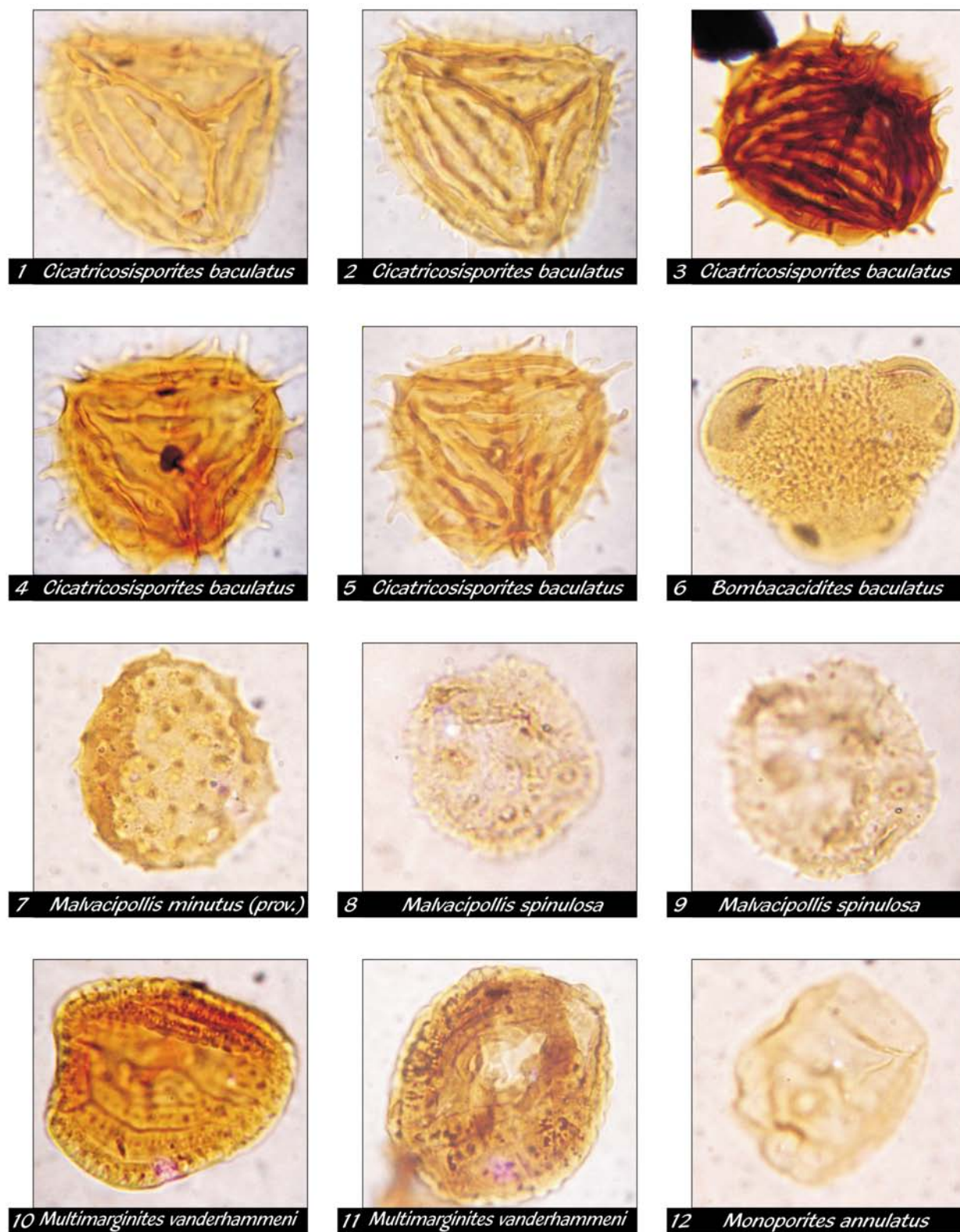
- Cooper, M.A., Addison, F.T., Alvarez, R., Hayward, A.B., Howe, S., Pulhan, A.J. & Taborda, A. 1995. Basin development and Tectonic history of the Llanos Basin, Colombia. AAPG Memoir 62: 659-665.
- Dueñas, H. 1985. Observaciones sobre la Nomenclatura Estratigráfica de la Cuenca de los Llanos Orientales. Colombia. Memorias II Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Sub-Andinas. Vol 2, Bogotá.
- Dueñas, H. 1999. Sequence analysis of Western Venezuelan Cretaceous to Eocene sediments using Palynology: Chrono-Paleoenvironmental and Paleovegetational approaches: Discussion. Palynology, 23(1999): 31-33.
- Germeraad, J.H., Hopping, C.A., & Muller, J. 1968. Palynology of Tertiary sediments from tropical areas. Rev. Palaeobot. Palynol. 6: 189-348.
- Hoorn, C. 1993. Marine incursions and the influence of Andean tectonics on the depositional history of north-western Amazonia: results of a palynological study. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 105, 267-309.
- Hoorn, C. 1994. Miocene palynostratigraphy and palaeoenvironments of north-western Amazonia. Evidence for marine incursions and the influence of Andean Tectonics. Doctoral Tesis, Hugo de Vries Laboratory, University of Amsterdam.
- Hoorn, C. 2006. The birth of the mighty Amazon. Scientific American. May 2006: 52-59.
- Lorente, M.A. 1986. Palynology and palynofacies of the Upper Tertiary in Venezuela. Diss. Bot., band 99, J. Cramer, Berlin: 222 pp.
- Miller, T.H. & Etayo, F. 1972. The geology of the Eastern Cordillera between Aguazul-Sogamoso-Villa de Leyva. Thirteenth Annual Field Conference. ACGGP. Bogotá. Colombia.
- Muller, J., Di Giacomo, E. & Van Erve, A. 1987. A palynological zonation for the Cretaceous, Tertiary and Quaternary of Northern South America. AASP. Contributions Series Number 19: 7-76.
- Notestein, F.B., Hubman, C.W. & Bowler, J. 1944. Geology of the Barco Concession. Republic of Colombia, South America. Bull. Geol. Soc. Amer. Vol 55, pp1165-1215. New Cork.
- Ramos, V. & Alonso, R. 1995. El Mar Paranense en la provincial de Jujuy. Revista Instituto de Geología y Minería, Jujuy, 10, 73-82.
- Ramos, V. & Aleman, A. 2000. Tectonic evolution of the Andes, in Tectonic evolution of South America, 31th International Geological Congress Rio de Janeiro August 6-17, 2000.
- Ramos, V. 2006 Curso sobre Tectónica Andina IX Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Cartagena Septiembre 24-27, 2006.
- Renzoni, G. 1985. Interpretación fotogeológica de la Plancha 193 – Yopal. Escala 1: 100.000. Informe 1951. Ingeominas, Bogotá.
- Renzoni, G. 1991. Notas sobre la Fotogeología de la Plancha 193-Yopal. Ingeominas, Bogotá.
- Ulloa, C. & Rodríguez, E. 1976. Mapa Geológico de la Plancha 211; Tauramena. Escala 1: 100.000. Ingeominas, Bogotá.
- Ulloa, C. & Rodríguez, E. 1981. Geología del Cuadrángulo K-13 Tauramena. Bol. Geol. 24 (2): 3-30 Bogotá.
- Van der Hammen, Th. 1954. El desarrollo de la Flora Colombiana en los períodos geológicos: I Maastrichtiano hasta Terciario más inferior. Bol. Geol. Vol 2 (1). Instituto Geológico Nacional. Bogotá.
- Van der Hammen, Th. 1956. Descripción de algunos géneros y especies de polen y esporas fósiles. Bol. Geol. Vol 4 (2, 3) Instituto Geológico Nacional. Bogotá.
- Van der Hammen, Th. 1960. Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos. Bol. Geol. Vol. VI (1-3): 67-128, Ingeominas, Bogotá.
- Van der Hammen, Th. 1961. Late Cretaceous and Tertiary stratigraphy and tectogenesis of the Colombian Andes Bol.Geologie en Mijnbouw, 40(5): 181-188.
- Van der Hammen, Th., Werner, J.H. & Van Dommelen, H. 1973. Palynological record of the upheaval of the Northern Andes: a study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of this High-Andean biota. Rev. Palaeobot. Palynol. 16: 1-122.

Recibido: junio 26 de 2007

Aceptado para su publicación: diciembre 17 de 2007

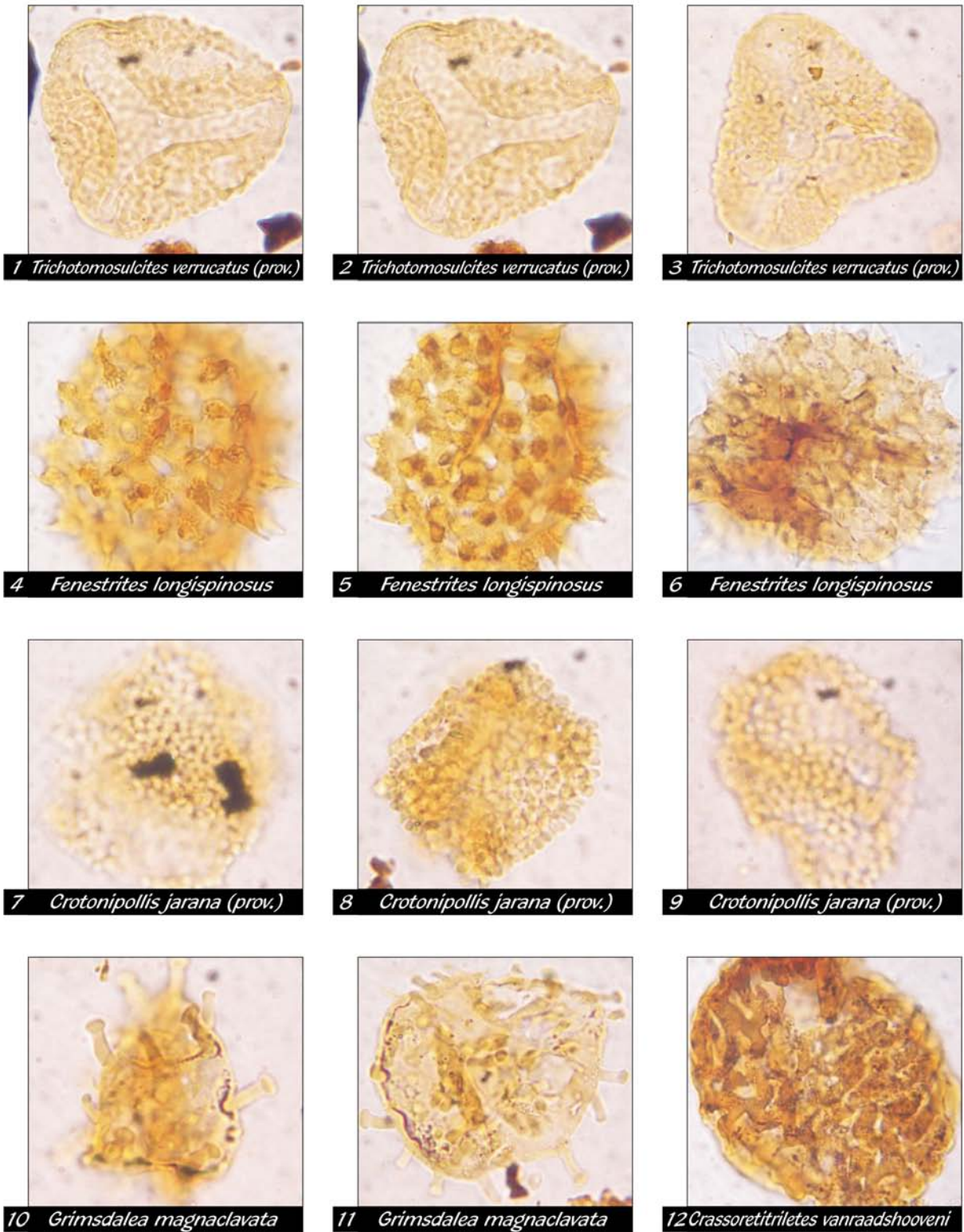




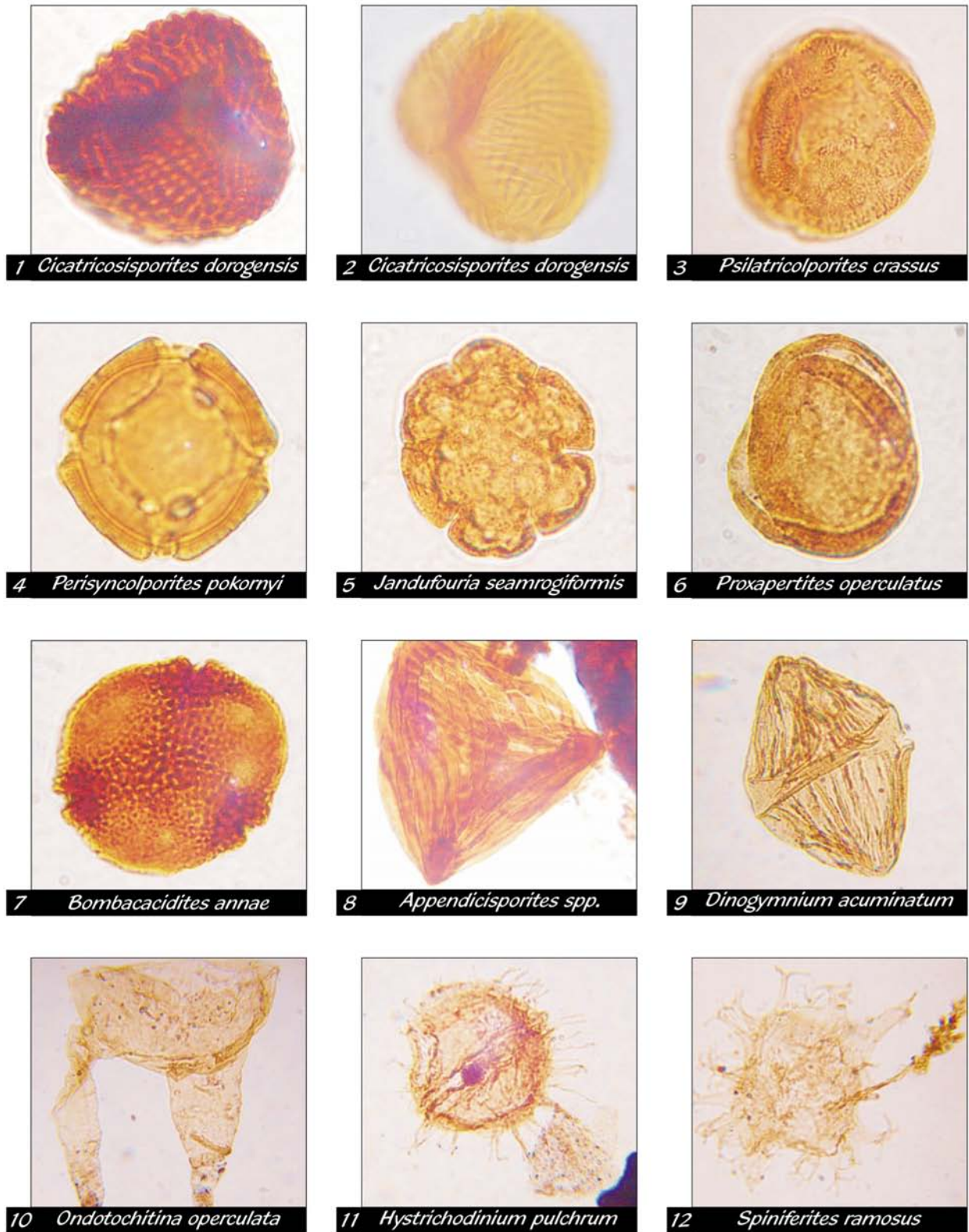


Plancha I. Figuras 1 a 12. Palinomorfos del Mioceno Tardío. Formación Diablo Inferior.





**Plancha II.** Figuras 1 a 9. Palinomorfos del Mioceno Tardío. Formación Diablo Inferior.  
 Figuras 10 a 12. Palinomorfos del Mioceno Medio. Formación San Fernando Superior.



Plancha III. Figuras 1 a 12. Palinomorfos Redepositados. Formación Diablo Inferior.

# EL ALBEDO TERRESTRE

por

Joaquín Pelkowski<sup>1</sup>

## Resumen

**Pelkowski, J.:** El albedo terrestre. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31(121): 499-520, 2007. ISSN 0370-3908.

El sistema climático de la Tierra se caracteriza por múltiples retroacciones. Una de las más importantes es la relacionada con la acción de la atmósfera y sus nubes sobre el flujo de energía radiante solar que las atraviesa. De la fracción de energía solar desechada a los espacios siderales (albedo terrestre) depende la energética del clima. El artículo ofrece una condensada visión panorámica de los modelos clásicos, así como un modelo de tres capas, destinados a calcular los flujos verticales de radiación solar, teniendo en cuenta la absorción y el esparcimiento debidos a las partículas suspendidas en la atmósfera.

**Palabras clave:** transferencia radiativa atmosférica, albedo planetario, modelos bipotámicos.

## Abstract

Earth's climate is characterized by multifarious feedbacks. Of paramount importance is one in which the solar radiation is modified by the atmosphere and its clouds, determining the amount of solar radiation returned to the starry spaces (the terrestrial albedo) and thus affecting the energetics of climate. This paper offers both a condensed survey of classical twostream models, based here on a singular phase function, and a trilayered model to account for the vertical fluxes of solar radiation, modified by the particles in the air by the processes of absorption and scattering.

**Key words:** atmospheric radiative transfer, planet albedo, two-stream models.

## 1. Introducción

La descripción matemática de la transferencia de energía por medio de radiación electromagnética ha alcanzado un alto nivel de desarrollo, figurando actualmente como una teoría espléndidamente coherente. No menos asombrosas son sus aplicaciones a distintas ramas de la ciencia y la tecnología. Sin embargo, los físicos de pura cepa se han mantenido un tanto reservados hacia ella, considerándola como demasiado fenomenológica al faltarle aparentemente el cordón umbilical con alguna de las teorías fundamentales a las que el físico está acostumbrado a reducir su cosmovisión. El meteorólogo o astrofísico, por otro lado, la considera imprescindible en su afán de comprender e interpretar los hechos fotométricos (o, más generalmente, radiométricos) de las atmósferas planetarias o estelares. La radiación visible, por ejemplo, proveniente de un sol suele ser parcialmente reflejada por las atmósferas y las superficies planetarias sobre las que incide, y su medición incumbe a la fotometría. La emisión de ondas electromagnéticas, que tiene lugar como consecuencia del estado térmico de dichas atmósferas, es un aspecto de suma importancia en la transmisión de energía planetaria por radiación que no tocaremos en este ensayo.

Nuestro objetivo es más bien cercenar la teoría general de la transferencia radiativa, buscando enfocar específicamente la interacción entre la radiación solar (visible) y las moléculas y partículas que componen una atmósfera planetaria cualquiera. Trataremos en particular de la interacción conocida como el esparcimiento atmosférico de la radiación electromagnética<sup>2</sup>.

Antes de ofrecer la visión panorámica de los esfuerzos recientes, que se discutirán más adelante, no será considerado ocioso repasar, con mayor concisión que fidelidad, unos pocos hitos históricos en la evolución de nuestro tema. La teoría de la transferencia radiativa avanzó prodigiosamente a partir de la primera mitad del siglo pasado, en que se sentaron sus sólidas bases fenomenológicas. Sus raíces experimentales y teóricas, no obstante, datan del siglo de las Luces. Cabría recordar las mediciones de la intensidad de la luz realizadas por el padre de la fotometría como ciencia moderna, **Pierre Bouguer**, quien destila de aquellas un debilitamiento exponencial, estudiando rayos estelares y lunares en su travesía por la atmósfera terrestre, e instituyendo

así su famosa ley en 1729, a la cual **J. H. Lambert** dio forma analítica en 1760, pero que suele ser atribuida, con escasa justificación, al malogrado **A. Beer**, quien le dio la forma definitiva en 1854. En el siglo XIX se establece la ecuación de transferencia en los medios que absorben e irradian energía, en una obra magistral de **Poisson**, *Théorie mathématique de la chaleur*, publicada en 1835. La ecuación, basada en la entonces algo trasnochada teoría del calórico (radiante), no logró llamar la atención que merecía. Décadas más tarde se volvería a proponer, y así se explica el que hoy en día los meteorólogos la denominen "ecuación de Schwarzschild". En 1887 **Lommel** establece, en Baviera, al mismo tiempo que **Chwolson** en San Petersburgo, la ecuación integral de transferencia por esparcimiento isotrópico, y en 1914 **Schwarzschild** formula definitivamente la ecuación de transferencia radiativa, tal como se suele emplear en la mayoría de las investigaciones atmosféricas desde entonces. En 1924, **Gans** incluye la polarización lineal, pero sólo a partir de 1950 puede considerarse completa la teoría fenomenológica que nos interesa aquí, quedando consignada en la celeberrima monografía de **Chandrasekhar** (1950), donde es presentada en forma definitiva la ecuación *vectorial* de la transferencia radiativa, teniendo en cuenta el estado de polarización de una onda electromagnética. A fines de la década de los cincuenta, **Rozanov** extiende la ecuación vectorial al caso de medios anisótropos, y con la monografía de van de **Hulst** (1957) aparece una obra que resume las investigaciones de las décadas anteriores, sobre todo las relacionadas con el esparcimiento de la radiación electromagnética que incide sobre una pequeña partícula esférica. En las últimas tres décadas se hacen notables algunos esfuerzos por conectar la teoría fenomenológica con la electrodinámica clásica, y actualmente este problema parece estar resuelto (véase la importante monografía recién publicada por **Mishchenko et al.**, 2006), en el sentido de que las magnitudes que intervienen en la ecuación de transferencia radiativa están claramente relacionadas con magnitudes derivables de la electrodinámica clásica, es decir, de las ecuaciones de Maxwell. Así, disponemos hoy en día de una teoría no menos coherente y poderosa que elegante, con la cual es posible describir, en principio, el esparcimiento de radiación electromagnética en medios continuos, e incluso en medios con dispersiones de partículas discretas (partículas sólidas o líquidas de

<sup>2</sup>"Esparcimiento" es el término recomendado por la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en su Vocabulario científico y técnico. Los otros términos en uso, el de "dispersión" o el de "difusión", no se debieran favorecer por impropios, puesto que ambos significan procesos físicos bien definidos en otros contextos. Pese a la anglofilia universal de nuestros tiempos, no utilizaré el espantoso anglicismo "scattering", que algunos astrofísicos españoles parecen considerar como adecuado a sus propios gustos.

los aerosoles, gotículas acuosas de las nubes, polvo intergaláctico, etc).

En este artículo me propongo extender, una vez más, mis modestas contribuciones anteriores, pero aún excluyendo los efectos de polarización, cuya importancia estriba ante todo en el problema conocido como “inverso” al de la transferencia, que consiste en inferir parámetros físicos (como la reflectividad de una superficie planetaria o las propiedades de una población de gotículas nubosas) a partir de mediciones de la energía transferida, problema de gran actualidad en la percepción remota de las atmósferas planetarias.

Pretendo, más específicamente, aplicar la teoría de la transferencia radiativa al sistema de nuestro clima terrestre, mediante un modelo diseñado para elucidar la *esencia* de un aspecto del problema que acosa actualmente a la humanidad. Lo que hoy en día suelen llamar los diarios, con un tonillo de alarmismo acaso justificable, “el cambio climático”, no deja de ser una vaga alusión al hecho de que el clima –sea cual fuere su definición– necesariamente cambia, como todo en nuestro universo, en reacción a modificaciones de las condiciones en sus fronteras.

Una de las variables climatológicas que más se barajan, en el contexto científico del cambio climático, es la temperatura superficial del planeta. Hay quienes la interpretan como la temperatura del aire en superficie, mientras que otros (el autor incluido), ven en ella la temperatura de la superficie misma, sin que nadie se detenga normalmente en las ambigüedades que su medición implica (algunas dificultades se ventilan en el reciente trabajo de **Anduckia**, 2007). En cualquier caso, la temperatura “superficial” es considerada como un importante *indicador* del cambio climático (global). Y, efectivamente, hay buenas razones para ello, como lo ponen de manifiesto algunos de mis trabajos anteriores, donde he buscado aclarar, mediante modelos teóricos *elementales*, algunas de las relaciones entre el campo de la radiación telúrica y la temperatura superficial del planeta.

Otra variable vital es la que se conoce como el *albedo* de un cuerpo celeste, iluminado externamente. Del valor climatológico del albedo de nuestra Tierra depende la energética global, al igual que la de su atmósfera y la de las otras “esferas” (los océanos, por ejemplo, que conforman la hidrosfera). Con el objeto de ofrecer al lector algunos elementos básicos para facilitar el discurso informado sobre el “cambio global”, presentaré un modelo convencional, que aunque aproximado, permite aprehender las relaciones esenciales entre el campo de

radiación solar y los constituyentes de la atmósfera terrestre, así como los efectos macroscópicos sobre la temperatura atmosférica y la de la superficie terrestre. Las características de la atmósfera a las cuales prestaremos la mayor atención son el albedo global de la Tierra y el poder atmosférico de transmisión (también global) de la energía de “onda corta”; ésta es la responsable de los matices celestes y los colores crepusculares, así como de todos los fenómenos que constituyen la óptica atmosférica. Al albedo terrestre se debe el brillo de la Tierra que se aprecia desde el espacio exterior, mientras que la transmisividad controla la cantidad de energía solar que baña la vasta superficie terrestre, determinando así su temperatura (y cuya variación geológica interviene en los ciclos glaciales, por ejemplo).

Huelga apuntar que dentro del marco limitado de este artículo no es posible recordar todos los fundamentos y aspectos necesarios en la construcción del modelo, ni siquiera la terminología y notación, a veces harto divergentes si no confusas, de una disciplina cuya literatura no deja de crecer. El esfuerzo presente se inscribe en un campo de investigación que ha avanzado vertiginosamente en las últimas décadas. Son numerosas las monografías y los libros de texto recientes, publicados no sólo con el ánimo de dar a conocer los métodos modernos para entender ciertos procesos radiativos de gran complejidad, sino suministrar las herramientas necesarias para deducir información cuantitativa acerca de nuestro medio ambiente, aprovechando en particular la tecnología de la percepción remota (desde plataformas espaciales, por ejemplo), y cuyos resultados dependen (a menudo delicadamente) de los fenómenos que intervienen en el mismo balance energético del clima. La importancia de estos temas justifica un tratamiento simplificado de algo sumamente complejo en sus detalles reales, tratamiento que ofrezco con la esperanza de granjear el beneplácito del lector no familiarizado con un campo de gran actualidad e indiscutible valor estético.

## 2. Generalidades acerca del albedo

La fracción de energía solar que la Tierra devuelve –sin aprovecharla– al espacio estelar, se conoce como el albedo terrestre. (Albedo planetario, en el caso de lunas y planetas iluminados por el Sol). El término “albedo” fue introducido por el ya mencionado sabio alsaciano, Lambert, en su *Photometria* de 1760. Lambert reconoció que el poder de reflexión variaba con la longitud de onda, e introdujo la noción de albedo monocromático (hablando de “rubedo”, por ejemplo, en el caso del poder

de reflexión respecto del color rojo). Su importancia en la investigación del brillo de los planetas fue reconocida definitivamente hacia 1860, en trabajos de un excéntrico científico alemán, **Karl Friedrich Zöllner** (1834-1882), a quien recientemente se viene considerando como el padre de la astrofísica, por haber propugnado precisamente el estudio del albedo de los planetas, con el objetivo de inferir su constitución física (lo que hoy en día se conoce como el “problema inverso” de la teoría de transferencia, ya aludido anteriormente).

En meteorología y climatología, el albedo es uno de los factores clave en los balances energéticos de los distintos subsistemas geofísicos, y de su valor dependen muchas características estadísticas, o sea, climatológicas; de él también depende, pero indirectamente, el vigor de la dinámica de los geofluidos. Un cambio ínfimo en el albedo terrestre implica cambios significativos en las temperaturas globales y en el régimen de vientos, por mencionar solamente dos efectos.

Los actuales modelos numéricos de predicción del clima buscan modelar los diversos procesos atmosféricos y climatológicos con un realismo cada vez más pormenorizado, tanto así que la mente humana escasamente puede aprehender los múltiples circuitos que se tienen en cuenta, en lo que es un complejo tejido de retroacciones físico-químicas dentro del sistema. Los resultados numéricos pueden ser tan correctos como realistas, pero en muchos casos resulta insondable su conexión con una o varias de las causas originales.

Por esta razón, muchos investigadores del clima y de la atmósfera se sirven de ciertos modelos preliminares, calificados a menudo de “conceptuales”, y cuya función principal es reducir a su esencia, y de una manera cualitativamente acertada, la patente complejidad cuantitativa de los procesos naturales, sacrificando parcialmente la fidelidad cuantitativa.

En la presente exposición me propongo elucidar los factores determinantes del albedo terrestre mediante un modelo conceptual de factura propia, extendiendo así la jerarquía de modelos cualitativos ya existentes. Más específicamente, con este modelo se hace posible examinar algunas de las posibles causas que alteran la fracción de energía que la Tierra desecha sin incorporarla al sistema climatológico. Por supuesto, no es posible, ni siquiera deseable, incluir todos los detalles de los procesos involucrados en la determinación del albedo de la atmósfera terrestre; como en modelos anteriores, me limito exclusivamente a contemplar la interacción entre la atmósfera (supuesta en reposo) y los campos de radiación visible,

haciendo caso omiso de la gran variabilidad espectral que caracteriza los fenómenos ópticos y térmicos. Es, claro está, la suposición más precaria del modelo. De hecho, se considerará un modelo de transferencia exclusivamente radiativa, a través de una atmósfera planetaria “semigris” (“gris” en el régimen de ondas visibles). No se considerará la interacción con los flujos de energía radiante emitida por el suelo y por la atmósfera misma. La consideración del campo de la radiación infrarroja rebasaría los límites de esta exposición y su inclusión queda reservada para un estudio monográfico (véase también un artículo en curso de publicación, **Pelkowski et al.** 2008).

### 3. La base teórica del modelo

El modelo se basa en la física y cinemática que subyace tras la ecuación de transferencia radiativa (ETR), formulada en lo que sigue para una radiación no polarizada, en interacción con la materia, y para una geometría plana y de capas estratificadas paralelamente. La polarización es una característica física de toda radiación electromagnética, pero en los estudios de la energética global afortunadamente puede despreciarse, autorizando por consiguiente el uso de la clásica ecuación de transferencia *escalar*, a diferencia de la ecuación general para el llamado tetravector de Stokes, el cual contiene la información elipsométrica sobre el estado de polarización de una onda electromagnética. En la gran mayoría de los estudios del siglo pasado, no se solía tener en cuenta el estado de polarización de los rayos de luz o de “calor”, pero recientemente se está recalando su importancia para el “problema inverso”, el de inferir ciertas propiedades físico-químicas de la materia irradiada a partir de las observaciones y los cálculos de la radiancia (**Hovenier et al.** 2004). En estudios actuales, en torno a cirros y aerosoles, se está explorando la utilidad de incluir dichos estados, con el fin de obtener información acerca de las partículas esparcedoras que los componen (**Liou** 2002; **Kokhanovsky** 2003, 2006).

Partiendo, pues, de la ecuación de transferencia radiativa para una atmósfera poco profunda, en comparación con el radio del planeta, y por ende asimilable a una capa plana y estratificada paralelamente, con la consiguiente uniformidad en direcciones acimutales, podemos expresar dicha ecuación de la siguiente manera:

$$\mu \frac{dI_\lambda}{d\tau_\lambda} = I_\lambda - \frac{a_\lambda(\tau_\lambda)}{2} \int_{-1}^1 P_\lambda(\tau_\lambda, \mu, \mu') I_\lambda(\tau_\lambda, \mu') d\mu' - [1 - a_\lambda(\tau_\lambda)] B_\lambda(\tau_\lambda). \quad (1)$$

La ecuación es válida para cada longitud de onda,  $\lambda$ , de la radiación electromagnética en cuestión. La letra griega  $\mu$  designa el coseno del ángulo cenital  $\theta \in [0, \pi]$  de un haz (rayo) de luz, cuya radiancia (intensidad) monocromática suele designarse por  $I_\lambda$  ( $\theta$  se mide con respecto al vector unidad dirigido hacia alturas crecientes);  $a_\lambda$  se conoce como el albedo de esparcimiento de primer orden, o primario (en la literatura anglosajona: *single scattering albedo*), pero no hay ambigüedad en llamarlo simplemente el "albedo de esparcimiento", ya sea el de una partícula o el de un volumen elemental de un medio continuo, que hemos de distinguir del albedo de una superficie o de un planeta;  $B_\lambda$  es la fuente interna de energía radiante, que para atmósferas en equilibrio termodinámico local viene dada por la distribución espectral de Planck,  $B_\lambda(T)$ , función de la temperatura local del medio,  $T$ ; la función espectral (o monocromática)  $P_\lambda(\tau_\lambda, \mu, \mu')$  de cuatro argumentos, entre ellos dos (cosenos de) ángulos cenitales, se conoce como la función de fase, sobre todo en la astrofísica anglosajona, pero en los trabajos originales que he consultado se definía, apropiadamente, como diagrama o función de esparcimiento, mientras que en la literatura rusa (traducida) se conoce bajo el nombre de "indicatriz de esparcimiento". También depende de la altura  $z$  o, equivalentemente, de la profundidad óptica,  $\tau_\lambda$ , que a su vez depende generalmente de la longitud de onda de los rayos del haz de luz, y que se define, como de costumbre, para una capa de espesor geométrico  $H_t - z$ , entre una cota  $z$  y la altura de la frontera superior de la atmósfera,  $H_t$ , por la siguiente fórmula:

$$\tau_\lambda = \int_z^{H_t} \rho k_\lambda dz',$$

en donde  $\rho$  representa la densidad de aquellos componentes del medio que afectan a la radiación del color que corresponde a  $\lambda$ . El coeficiente de extinción específico (esto es, por unidad de masa),  $k_\lambda$ , se define como la suma del coeficiente específico de esparcimiento ( $k_\lambda^{(s)}$ ) y del de absorción ( $k_\lambda^{(a)}$ ). Podemos, entonces, expresar el albedo de esparcimiento (monocromático) como el cociente entre el coeficiente de esparcimiento y el de extinción:

$$a_\lambda = \frac{k_\lambda^{(s)}}{k_\lambda} = \frac{k_\lambda^{(s)}}{k_\lambda^{(a)} + k_\lambda^{(s)}}.$$

A continuación, supondremos que sea posible definir estos coeficientes (como medias espectrales, por ejemplo) de tal manera que se puedan aplicar a toda la gama de ondas electromagnéticas (visibles), simplificando así decisivamente los cálculos analíticos en nuestra indagación

del albedo global. Este proceder define lo que se conoce como atmósfera semigris. Sin embargo, muchas fórmulas mantienen su validez para la radiación monocromática.

En casi todas las investigaciones contemporáneas de la radiación telúrica, es habitual y conveniente descomponer la radiancia solar en dos partes, cada una de sendos orígenes físicos:

$$I_\lambda = I_\lambda^* + I_\lambda^\odot. \quad (2)$$

El primer sumando representa la intensidad de la radiación que ha sido esparcida por el medio (el brillo del medio gracias a la luz "prestada"), mientras que el segundo sumando se refiere a la radiancia de la radiación solar directa (la emitida por el Sol e interceptada por la Tierra). Esta última es sometida, en su travesía por la atmósfera, a un debilitamiento según la ley de extinción de Bouguer (o de Bouguer-Lambert, o incluso, pero con poca justicia, como ya vimos, de Beer):

$$\mu \frac{dI_\lambda^\odot}{d\tau} = -I_\lambda^\odot. \quad (3)$$

Esta ecuación diferencial ordinaria y de primer orden puede integrarse inmediatamente, siempre y cuando se conozcan los valores de la radiancia en cada frontera de la atmósfera. Efectivamente, la condición de contorno para la radiancia que incide sobre la frontera superior de la atmósfera (donde  $\tau = 0$ ) es uno de los factores determinantes de la meteorología y climatología terrestres, cuyo valor se conoce con precisión inusitada, y que expresaremos formalmente así:

$$I_\lambda^\odot(0, \mu) = \frac{Q_{0\lambda}}{2\pi} \delta(\mu + \mu_0) [1 - H(\mu)]. \quad (4)$$

La función de Heaviside (o de escalón),  $H(\mu)$ , es igual a la unidad para valores positivos del argumento  $\mu$ , e igual a cero en el caso contrario; la función generalizada (o de Dirac)  $\delta$  permite expresar que la condición de contorno hace sentir su efecto sólo si el valor absoluto del coseno del ángulo cenital de un rayo incidente (para el cual  $\theta > \pi/2$ , o sea,  $\mu < 0$ ) es igual al coseno del ángulo cenital del disco solar ( $\mu_0$ ), o sea, para  $-\mu = \mu_0$ .  $Q_{0\lambda}$  es la llamada constante solar espectral, definida como la energía monocromática que fluye a través de la unidad de una superficie perpendicular a los rayos solares, situada en el tope de la atmósfera, es decir, a una distancia igual a la unidad astronómica  $D_0$ , y cuyo flujo holocromático (integrado espectralmente) representa la constante solar por excelencia:

$$Q_0 = \int_0^\infty Q_{0\lambda} d\lambda = \pi \Gamma_0 \int_0^\infty B_\lambda(T_\odot) d\lambda = 1370 \text{ W/m}^2.$$

El "factor de dilución"  $\Gamma_0$  de la energía solar se expresa mediante la importante ley óptica de Kepler, según la cual la irradiancia disminuye inversamente al cuadrado de la distancia al Sol:  $\Gamma_0 \equiv \left(\frac{R_\odot}{D_0}\right)^2$ , siendo  $R_\odot$  el radio del Sol, cuya temperatura "efectiva" asciende aproximadamente a  $T_\odot = 5780$  K.

Omitiremos de ahora en adelante el subíndice  $\lambda$ , puesto que para la determinación del albedo global sólo importa considerar la energía reflejada a lo largo de todo el espectro de ondas visibles, y el tratamiento analítico se facilita bajo el supuesto de esparcimiento "gris" respecto a los rayos solares, lo que significa que la atmósfera esparce la radiación visible indiferentemente de su color. La radiancia  $I_\lambda$ , despojada de su subíndice, se convierte, como en el caso anterior de la constante solar, en la radiancia "holocromática", implicando que ha sido integrada sobre el espectro de ondas, o sea  $I = \int I_\lambda d\lambda$ .

La solución de la ecuación diferencial (3), bajo la condición de contorno (4), se expresa entonces para la radiancia holocromática como

$$I^\odot(\tau, \mu) = \frac{Q_0}{2\pi} \delta(\mu + \mu_0) [1 - H(\mu)] e^{\tau/\mu}.$$

La radiancia solar reflejada por la superficie terrestre (a la profundidad óptica de la atmósfera entera,  $\tau_b = \int_0^{H_t} \rho k dz$ ), es debilitada nuevamente en su segunda travesía por la atmósfera. Debemos resolver la misma ecuación (3), pero ahora bajo una condición de contorno distinta, que en el caso más sencillo corresponde a la ley de reflexión de Lambert (reflexión isotrópica):

$$I^\odot(\tau_b, \mu > 0) = r_s \mu_0 \Gamma_0 \mathcal{B}(T_\odot) e^{-\tau_b/\mu_0};$$

aquí aparece el poder de reflexión de la superficie terrestre (en el visible), o albedo superficial, designado por  $r_s$  (Pelkowski 1998).

Insertando ahora la radiancia (2) en la integral de (1), se obtienen contribuciones de dos fuentes distinguidas:

$$\frac{a}{2} \int_{-1}^1 P(\tau, \mu, \mu') [I^*(\tau, \mu') + I^\odot(\tau, \mu')] d\mu' =$$

$$\frac{a}{2} \int_{-1}^1 P(\tau, \mu, \mu') I^*(\tau, \mu') d\mu' + \frac{aQ_0}{4\pi} P(\tau, \mu, -\mu_0) e^{-\tau/\mu_0}$$

De esta manera expresamos la ETR en la forma en que aparece a menudo en la literatura especializada (cf. Liou 2002, p. 261):

$$\mu \frac{dI^*}{d\tau} = I^* - \frac{a(\tau)}{2} \int_{-1}^1 P(\tau, \mu, \mu') I^*(\tau, \mu') d\mu' \quad (5)$$

$$- \frac{a(\tau)Q_0}{4\pi} P(\tau, \mu, -\mu_0) e^{-\tau/\mu_0} - [1 - a(\tau)] \mathcal{B}(\tau).$$

Dadas las correspondientes condiciones de frontera, podemos determinar la radiancia "difusa"  $I^*$ , resolviendo esta ecuación integro-diferencial.

La razón de la descomposición de la radiancia, que no parece sugerirse de por sí misma, aparentemente tiene que ver con el hecho de que en la solución aproximada de los modelos originales, que prescindían del artificio, el albedo de una capa nubosa resultaba ser independiente de la posición del sol en el cielo, en contradicción con lo que se observa realmente. En cambio, cualquier solución aproximada de la ecuación anterior depende patentemente del ángulo cenital del sol, quedando así remediada la dificultad.

Para la solución de la ecuación de transferencia radiativa (5) vamos a suponer, como en la gran mayoría de las investigaciones del pasado, que el esparcimiento es homogéneo dentro de la capa, eliminando así la dependencia de la profundidad óptica en las funciones  $a$  y  $P$ . Mientras que el albedo de esparcimiento se reduce a una constante arbitraria, para poder acometer la tarea matemática de resolver la ETR, es preciso conocer, o al menos prescribir, la función de fase. En la siguiente sección definiremos una función de fase peculiar.

**3.1. La función de fase del modelo.** La función de fase  $P(\mu, \mu')$  describe la probabilidad con que la energía radiante, que incide bajo un ángulo  $\theta'$  (entre el rayo y la normal a la atmósfera) sobre un volumen elemental de la materia, es esparcida en dirección  $\theta$ . Así, por ejemplo,  $P(0, -1)$  indica la probabilidad de que un rayo dirigido verticalmente hacia abajo sea esparcido en cualquier dirección horizontal (sin privilegiar a ninguna dirección, gracias a la simetría rotacional de la atmósfera planiparalela). Generalmente, los diagramas de esparcimiento para un volumen elemental del medio se obtienen sumando las contribuciones de los centros esparcedores dentro de aquél, lo cual está permitido si los centros, fluctuantes, se suponen estar suficientemente distanciados entre sí, sin interferir destructivamente, de modo que los resultados de tal suma dependen del diagrama de esparcimiento de cada una de las partículas, a menudo consideradas como idénticas.



El diagrama de una *partícula* presenta típicamente una gran variabilidad angular, y se describe mediante funciones matemáticas sumamente complejas, que dependen en cada caso particular de las características físico-químicas de las moléculas o partículas que intervienen en el esparcimiento de la energía incidente. Para las moléculas atmosféricas se conoce su forma desde los trabajos clásicos de **Rayleigh** (con una corrección debida a la asimetría molecular, propuesta por **Cabannes**), y uno de los grandes éxitos de la teoría del electromagnetismo ha sido la deducción teórica de dicho diagrama, que ostenta una simetría especular con respecto al plano perpendicular al rayo que incide sobre la molécula (considerada por **Rayleigh** como simétrica). Dentro del marco de nuestro modelo, la función de fase de Rayleigh, para una atmósfera puramente esparcedora, adopta la forma:

$$P(\mu, \mu') = \frac{3}{4}[1 + \mu^2\mu'^2 + \frac{1}{2}(1 - \mu^2)(1 - \mu'^2)]$$

(**Ishimaru** 1978). Es fácil comprobar que la integral de esta función sobre todos los valores posibles de  $\mu$  es igual a 2.

En lo que sigue no entraremos en los detalles de la determinación de una función de fase general, por tratarse de un problema demasiado complejo y que incumbe a la electrodinámica clásica. Para nuestros objetivos dentro del esquema de una energética global y promediada, en la que sólo los flujos verticales de energía radiante son importantes, basta con tener en cuenta la fracción de la energía total esparcida, en cualquier punto del medio, tanto hacia el hemisferio delantero de una esfera unitaria con centro en dicho punto (energía esparcida "hacia adelante"), como hacia el hemisferio trasero (o "hacia atrás"), puesto que de esa fracción dependen el albedo global del clima terrestre y la transmisividad total de la atmósfera. Dicha fracción, llamémosla  $f$ , depende, entre otros factores, del tamaño de las partículas esparcedoras. Para las moléculas atmosféricas, como ya señalábamos en la discusión del diagrama de Rayleigh,  $f = 0.5$ , de modo que si la energía solar incide verticalmente sobre una molécula atmosférica (aproximadamente simétrica), la mitad es esparcida hacia la superficie terrestre y la otra mitad lo es hacia los espacios siderales. En cuanto a las partículas nefélicas, por ejemplo las gotas de agua de las nubes cálidas, la fracción  $f$  es netamente más cercana a la unidad, implicando que las gotículas de nubes cálidas "esparcen" la energía incidente preponderantemente hacia adelante; a los cristales de hielo de las nubes heladas corresponde, como veremos más adelante, un factor de asimetría semejante

al de las gotas acuosas, aunque la fracción  $f$  oscila en un rango de valores más amplio. La energía esparcida por un conjunto (población) de gotas se calcula, como ya se indicó, sumando las contribuciones debidas a los esparcimientos individuales, gracias al hecho de que las gotículas se encuentran suficientemente separadas unas de otras (**Mishchenko et al.** 2002).

Para simplificar entonces un problema de gran complejidad, me atrevo a proponer una función de fase que permite describir un esparcimiento asimétrico según la dirección de propagación: la fracción  $f$  de la radiancia  $I(\mu')$  es "esparcida" si, y solamente si, su dirección, indicada por su ángulo cenital  $\theta' \in [0, \pi]$ , coincide con la del haz de radiación cuyo balance energético se está considerando, y que obedece a la ETR que corresponde al ángulo cenital  $\theta \in [0, \pi]$ , siendo entonces  $1 - f$  la fracción desviada en la dirección opuesta ( $\pi - \theta$ ). En direcciones  $\mu' \neq \pm\mu$ , la intensidad esparcida es nula. Esta singular distribución puede expresarse bajo la siguiente forma matemática:

$$P(\mu, \mu') \equiv 2 \{ f\delta(\mu - \mu')H(\mu') + (1 - f)\delta(\mu + \mu')[1 - H(\mu')] \} H(\mu) + 2 \{ f\delta(\mu - \mu')[1 - H(\mu')] + (1 - f)\delta(\mu + \mu')H(\mu') \} [1 - H(\mu)]. \quad (6)$$

Los ángulos cenitales de los rayos siempre están referidos a la normal de las capas atmosféricas, dirigida hacia el cenit. Un rayo descendente, por ejemplo, forma un ángulo cenital  $\theta > \pi/2$  con dicha normal. En general, la función de esparcimiento es función de la profundidad óptica, pero se suele simplificar el tratamiento matemático suponiendo capas esparcedoras homogéneas (suficientemente delgadas). En la función de fase anterior se podría tener en cuenta la inhomogeneidad vertical haciendo depender la fracción  $f$  de la profundidad óptica  $\tau$ , pero, como ya lo señalábamos en la sección anterior, nos limitaremos al caso ópticamente homogéneo, y por consiguiente, ni  $f$  ni el albedo de esparcimiento  $a$  dependen de la profundidad óptica. La inclusión de tales dependencias constituye un campo activo de la investigación actual en transferencia radiativa (véase p.ej., **Yanovitsky** 1997). Igualmente se está teniendo en cuenta la irregularidad geométrica de las partículas suspendidas en el aire seco o brumoso, de constitución bioquímica variable (**Mishchenko et al.** 2000).

La función de fase de nuestro modelo está normada:

$$\frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(\mu, \mu') d\mu' = 1,$$

y, como propiedad esencial de una función de esparcimiento espacialmente homogéneo, es simétrica:

$$P(\mu, \mu') = P(\mu', \mu).$$

Por medio de esta función, deducimos las siguientes relaciones:

$$\frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(\mu, \mu') I^*(\tau, \mu') d\mu' = f I^*(\tau, \mu) + (1-f) I^*(\tau, -\mu)$$

y

$$P(\mu, -\mu_0) = 2(1-f)\delta(\mu - \mu_0)H(\mu) + 2f\delta(\mu + \mu_0)[1 - H(\mu)].$$

La integral que figura en la ecuación de transferencia radiativa (5) es, pues, reemplazada por la suma ponderada de dos radiancias, una en dirección del rayo bajo investigación, la otra en el sentido opuesto de dicha dirección. El problema matemático se simplifica considerablemente, puesto que la ecuación integrodiferencial queda reducida a una ecuación diferencial ordinaria.

**3.1.1. Factor de asimetría.** En la teoría de la transferencia radiativa se emplea una magnitud que encierra información acerca de la asimetría del diagrama de esparcimiento. Me refiero al *factor de asimetría*,  $g$ , que se define como el primer momento angular de la función de fase, o, lo que equivale a lo mismo, como el coseno promedio del ángulo de esparcimiento, ángulo formado por la dirección de propagación del rayo incidente y la de un determinado haz esparcido. Adaptado a nuestra hipótesis de esparcimiento independiente del acimut, se define así:

$$g \equiv \frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(\mu, \mu') \mu' d\mu' = \langle \mu \rangle.$$

Se trata de una medida de la asimetría en la distribución de la energía esparcida respecto de un plano perpendicular al rayo incidente.

Una relación importante, para cuya demostración no disponemos de espacio aquí (remito a **Goody & Yung** 1989), es la siguiente:

$$\frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(\mu, \mu') \mu' d\mu' = g\mu.$$

Nótese que si el esparcimiento es isotrópico ( $P \equiv 1$ ), el factor de asimetría se anula:  $g = 0$ . Generalmente,  $g \in [-1, 1]$ . Para la función particular (6), es fácil comprobar que

$$\frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(\mu, \mu') \mu' d\mu' = (2f - 1)\mu$$

y por lo tanto,

$$f = \frac{1+g}{2}.$$

Esta simple relación permite vincular los valores de  $g$ , citados en la literatura contemporánea, con la fracción  $f$  de nuestro modelo elemental. En el caso de esparcimiento isotrópico, o para un diagrama de esparcimiento simétrico (como el de Rayleigh),  $g = 0$ , y por lo tanto  $f = 0.5$ : la fracción de energía radiante esparcida hacia "adelante" es igual a la esparcida en la dirección opuesta a la de propagación. Si  $f = 1$ , el "esparcimiento" del rayo es equivalente a la ausencia de esparcimiento.

**3.2. Los flujos de energía radiante.** En virtud de la función de esparcimiento introducida en la sección anterior, la ecuación (5) se expresa ahora así:

$$\begin{aligned} \mu \frac{dI^*(\tau, \mu)}{d\tau} &= I^*(\tau, \mu) - a[fI^*(\tau, \mu) + (1-f)I^*(\tau, -\mu)] \\ &\quad - \frac{aQ_0}{4\pi} \{2(1-f)\delta(\mu - \mu_0)H(\mu) \\ &\quad + 2f\delta(\mu + \mu_0)[1 - H(\mu)]\} e^{-\tau/\mu_0} \\ &\quad - (1-a)B(\tau), \end{aligned}$$

o, abreviadamente,

$$\mu \frac{dI^*(\tau, \mu)}{d\tau} = I^*(\tau, \mu) - S(\tau, \mu), \quad (7)$$

donde hemos introducido la función fuente de energía radiante,

$$\begin{aligned} S(\tau, \mu) &\equiv a[fI^*(\tau, \mu) + (1-f)I^*(\tau, -\mu)] + \\ &\quad (1-a)B(\tau) + \\ &\quad \frac{aQ_0}{4\pi} \{2(1-f)\delta(\mu - \mu_0)H(\mu) + \\ &\quad 2f\delta(\mu + \mu_0)[1 - H(\mu)]\} e^{-\tau/\mu_0}. \quad (8) \end{aligned}$$

Radiancias y coeficientes dependen generalmente de la longitud de onda. Omitiremos esa dependencia para mayor claridad de notación, pero también porque en los ejemplos numéricos posteriores se emplearán valores representativos de toda la gama de colores que engloba la radiación visible (esparcimiento semigris).

Integrando la ecuación (7) con respecto a los valores posibles de  $\mu$ , resulta una ecuación diferencial ordinaria para lo que se conoce como la densidad del flujo de energía radiante, es decir,

$$\frac{1}{2\pi} \frac{dF^*}{d\tau} = 2(\hat{I}^* - \hat{S}), \quad (9)$$

siendo la definición de dicho flujo:

$$F^*(\tau) \equiv 2\pi \int_{-1}^{+1} I^*(\tau, \mu) \mu d\mu.$$

En (9) hemos introducido la siguiente media angular:

$$\overline{(\quad)} \equiv \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} (\quad) d\mu.$$

Multiplicando enseguida la ecuación (7) por  $\mu$  e integrando de nuevo con respecto a esta variable, resulta:

$$4\pi \frac{dK}{d\tau} = F^* - 2\pi \int_{-1}^{+1} S(\tau, \mu) \mu d\mu,$$

donde ahora aparece el segundo momento del campo radiativo, en la notación introducida por Eddington (Mihalas 1978):

$$K \equiv \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} I^*(\tau, \mu) \mu^2 d\mu.$$

Esta magnitud representa  $c/4\pi$  veces la presión normal de la radiación,  $c$  designando la velocidad de la luz. Repitiendo este proceso de multiplicación por  $\mu$  e integración de la ecuación resultante respecto de esta variable angular, se obtiene una sucesión infinita de ecuaciones, cuya solución es extremadamente difícil, si no imposible de hallar (el famoso problema de "cierre").

Con el fin de obviar esta dificultad matemática, se introducirá más adelante una "hipótesis de cierre". Para ello, reescribiremos, aprovechando el teorema del valor medio del cálculo integral, el segundo momento de la radiancia de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \int_{-1}^{+1} I^*(\tau, \mu) \mu^2 d\mu &= \int_{-1}^0 I^*(\tau, \mu) \mu^2 d\mu \\ &+ \int_0^{+1} I^*(\tau, \mu) \mu^2 d\mu \\ &= \mu_*^-(\tau) \int_{-1}^0 I^*(\tau, \mu) \mu d\mu + \mu_*^+(\tau) \int_0^{+1} I^*(\tau, \mu) \mu d\mu \\ &= -\frac{\mu_*^-(\tau)}{2\pi} F^{*\downarrow}(\tau) + \frac{\mu_*^+(\tau)}{2\pi} F^{*\uparrow}(\tau), \end{aligned}$$

donde las nuevas funciones son cocientes de magnitudes físicamente interpretables:

$$\mu_*^\pm(\tau) = \frac{\int_0^{\pm 1} I^*(\tau, \mu) \mu^2 d\mu}{\int_0^{\pm 1} I^*(\tau, \mu) \mu d\mu}; \quad (10)$$

para iluminar el significado de los denominadores, recordemos que

$$F^{*\downarrow}(\tau) = -2\pi \int_{-1}^0 I^*(\tau, \mu) \mu d\mu > 0 \quad (11)$$

$$F^{*\uparrow}(\tau) = 2\pi \int_0^{+1} I^*(\tau, \mu) \mu d\mu > 0 \quad (12)$$

$$F^* = F^{*\uparrow}(\tau) - F^{*\downarrow}(\tau) \quad (13)$$

representan las densidades de los flujos descendente, ascendente y neto, respectivamente. Así, la ecuación que satisface el segundo momento se transforma en

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} [\mu_*^+(\tau) F^{*\uparrow}(\tau) - \mu_*^-(\tau) F^{*\downarrow}(\tau)] \\ = F^* - 2\pi \int_{-1}^{+1} S(\tau, \mu) \mu d\mu. \end{aligned}$$

Examinemos algunos casos particulares.

3.2.1. Fuente isotrópica. Con esparcimiento isotrópico, se tiene  $f = 1/2$ . La función fuente (8) se reduce entonces a

$$\begin{aligned} S(\tau, \mu) &\equiv \frac{a}{2} [I^*(\tau, \mu) + I^*(\tau, -\mu)] + (1-a)B(\tau) + \\ &\frac{aQ_0}{4\pi} \{ \delta(\mu - \mu_0)H(\mu) + \delta(\mu + \mu_0)[1 - H(\mu)] \} e^{-\tau/\mu_0}, \end{aligned}$$

con media angular igual a

$$\hat{S}(\tau) = a \hat{I}^*(\tau) + (1-a)B(\tau) + \frac{aQ_0}{4\pi} e^{-\tau/\mu_0}, \quad (14)$$

y cuyo primer momento se anula:

$$\int_{-1}^{+1} S(\tau, \mu) \mu d\mu = 0.$$

Por consiguiente,

$$\frac{d}{d\tau} [\mu_*^+(\tau) F^{*\uparrow}(\tau) - \mu_*^-(\tau) F^{*\downarrow}(\tau)] = F^*.$$

Un cierre posible del esquema consiste en exigir que  $\mu_*^\pm$  sean independientes de  $\tau$ , y, además, tengan magnitudes iguales:  $-\mu_*^- = \mu_*^+ \equiv \mu_2$ . Por lo tanto,

$$2\mu_2 \frac{d\overline{F^*}}{d\tau} = F^*, \quad (15)$$

donde

$$\overline{F^*} \equiv \frac{1}{2} [F^{*\uparrow}(\tau) + F^{*\downarrow}(\tau)] \quad (16)$$

representa la densidad media del flujo a la profundidad  $\tau$ .

Diferenciando el primer momento de la ecuación de transferencia (9) con respecto a  $\tau$ , resulta una ecuación diferencial de segundo orden:

$$\frac{d^2 \overline{F^*}}{d\tau^2} = 4\pi \left( \frac{d\hat{I}^*}{d\tau} - \frac{d\hat{S}}{d\tau} \right). \quad (17)$$

Aprovechando nuevamente el teorema del valor medio para inferir la existencia de dos cosenos  $-\mu^-$  y  $\mu^+$ , y suponiendo sus magnitudes iguales a  $\mu_1$ , tal que se tenga  $\overline{F^*} = 2\pi\mu_1 \hat{I}^*$ , además de postular que, como en el

caso de  $\mu_2$ , el coseno  $\mu_1$  sea independiente de  $\tau$ , obtenemos de las ecuaciones (15) y (17) una sola ecuación diferencial para el flujo neto:

$$\frac{1}{4\pi} \frac{d^2 F^*}{d\tau^2} = \frac{F^*}{4\pi\mu_1\mu_2} - \frac{d\hat{S}}{d\tau}.$$

Esta ecuación se puede reescribir mediante la función fuente media (14) y la ecuación (15):

$$\frac{d^2 F^*}{d\tau^2} = (1-a) \frac{F^*}{\mu_1\mu_2} - 4\pi(1-a) \frac{dB}{d\tau} + \frac{aQ_0}{\mu_0} e^{-\tau/\mu_0}. \quad (18)$$

Si prescribimos la función fuente  $B(\tau)$  (que depende de la temperatura de la atmósfera), esta ecuación diferencial de segundo orden permite determinar los flujos de radiación difusa bajo determinadas condiciones de frontera.

**3.2.2. Esparcimiento puro.** Otro caso particular es el de esparcimiento puro, sin absorción simultánea de energía radiante, que corresponde a  $a = 1$ . Esta condición define lo que se conoce como una atmósfera conservadora, y en tal caso la última ecuación reza:

$$\frac{d^2 F^*}{d\tau^2} = \frac{Q_0}{\mu_0} e^{-\tau/\mu_0},$$

cuya integración no presenta ninguna dificultad.

**3.2.3. Transferencia sin esparcimiento.** En este caso se tiene  $a = 0$ , y la ecuación (18) se reduce a

$$\frac{dB}{d\tau} = -\frac{1}{4\pi} \frac{d^2 F^*}{d\tau^2} + \frac{F^*}{4\pi\mu_1\mu_2}.$$

Igualando y fijando el valor de los cosenos "libres", seleccionando por ejemplo el valor típico de  $1/\sqrt{3} = \mu_1 = \mu_2$ , conduce a

$$\frac{dB}{d\tau} = -\frac{1}{4\pi} \frac{d^2 F^*}{d\tau^2} + \frac{3}{4\pi} F^*,$$

ecuación en la que se basan mis anteriores investigaciones acerca del tema (Pelkowski 1993, 1998, 2000), y que corresponde perfectamente con una aproximación clásica, debida a Eddington (Goody & Yung 1989). En las secciones siguientes, sin embargo, nos ocuparán sendas ecuaciones para los flujos ascendente y descendente.

#### 4. Modelos bipotámicos

Con el fin de obtener, a partir de la ETR, dos ecuaciones de transferencia para los flujos ascendente y descendente, es preciso distinguir las radiancias de los rayos que contribuyen a cada flujo. Mantendremos en este contexto la suposición simplificadora de dos direcciones

óptimas,  $\theta_{\pm}^{\pm}$ , con  $\mu_{\pm}^{\pm} = \cos \theta_{\pm}^{\pm}$ , según las definiciones (10), (12) y (11):

$$\mu_{\pm}^{+} = 2\pi \frac{\int_0^1 \mu^2 I^* d\mu}{F^{\uparrow}} > 0,$$

$$\mu_{\pm}^{-} = -2\pi \frac{\int_{-1}^0 \mu^2 I^* d\mu}{F^{\downarrow}} < 0.$$

Estos cosenos directores dependen, en general, tanto de la frecuencia de la radiación como de la profundidad óptica. Imitando los pasos de la sección anterior de multiplicar la ETR por  $\mu$  e integrarla sobre intervalos correspondientes de esta variable, se logra establecer las ecuaciones de los flujos difusos ascendente y descendente, los únicos que intervienen en los modelos plani-paralelos que llamaremos *bipotámicos* (de dos flujos), y cuyo origen se remonta a un trabajo seminal, publicado en 1905, del astrofísico Sir Arthur Schuster, sobre la transferencia radiativa a través de medios neblinosos.

Procederemos, pues, de la forma siguiente. Empezamos por distinguir las dos ecuaciones del modelo. La primera hace referencia a las radiancias "ascendentes", para las cuales  $\mu > 0$  (véase la ecuación (7)):

$$\mu \frac{dI^*}{d\tau} = I^* - a[fI^*(\tau, \mu) + (1-f)I^*(\tau, -\mu)] - \frac{a(1-f)}{2\pi} Q_0 \delta(\mu - \mu_0) e^{-\tau/\mu_0} - (1-a)B(\tau),$$

mientras que la segunda se refiere a las descendentes,  $\mu < 0$ :

$$\mu \frac{dI^*}{d\tau} = I^* - a[fI^*(\tau, \mu) + (1-f)I^*(\tau, -\mu)] - \frac{af}{2\pi} Q_0 \delta(\mu + \mu_0) e^{-\tau/\mu_0} - (1-a)B(\tau).$$

Observando ahora que

$$\int_0^1 I^*(\tau, -\mu) \mu d\mu = \int_0^{-1} I^*(\tau, u) u du$$

$$= - \int_{-1}^0 I^*(\tau, \mu) \mu d\mu = \frac{F^{\downarrow}(\tau)}{2\pi}$$

y

$$\int_{-1}^0 I^*(\tau, -\mu) \mu d\mu = \int_1^0 I^*(\tau, u) u du$$

$$= - \int_0^1 I^*(\tau, \mu) \mu d\mu = - \frac{F^{\uparrow}(\tau)}{2\pi},$$

podemos comprobar que las ecuaciones anteriores, multiplicadas por  $\mu$  e integradas sobre los respectivos intervalos de los valores de este coseno, se transforman en:

$$\frac{d}{d\tau} [\mu_*^+ (\tau) F^\uparrow (\tau)] = F^\uparrow (\tau) - a [f F^\uparrow (\tau) + (1-f) F^\downarrow (\tau)] - a(1-f) \mu_0 Q_0 e^{-\tau/\mu_0} - (1-a) \pi B(\tau)$$

y

$$\frac{d}{d\tau} [\mu_*^- (\tau) F^\downarrow (\tau)] = F^\downarrow (\tau) - a [f F^\downarrow (\tau) + (1-f) F^\uparrow (\tau)] - a f \mu_0 Q_0 e^{-\tau/\mu_0} - (1-a) \pi B(\tau).$$

Para extraer de estas dos ecuaciones las ecuaciones clásicas de los distintos modelos bipotámicos que se han propuesto, basta suponer que los cosenos óptimos no son funciones de la profundidad, obteniéndose así:

$$\mu_*^+ \frac{dF^\uparrow (\tau)}{d\tau} = F^\uparrow (\tau) - a [f F^\uparrow (\tau) + (1-f) [f F^\downarrow (\tau)]] - S^-(\tau)$$

$$\mu_*^- \frac{dF^\downarrow (\tau)}{d\tau} = F^\downarrow (\tau) - a [f F^\downarrow (\tau) + (1-f) [f F^\uparrow (\tau)]] - S^+(\tau)$$

donde nos hemos servido de la siguiente definición:

$$S^\pm (\tau) \equiv \frac{a}{2} (1 \pm g) \mu_0 Q_0 e^{-\tau/\mu_0} + (1-a) \pi B(\tau).$$

La función fuente  $S^-(\tau)$  se anula para  $g = 1$ , como cabe esperar físicamente (no así en otros modelos bipotámicos, véase, v.g., **Liou** 2002). El primer término en estas fuentes igualmente se anula cuando el centro del disco solar roza el horizonte, puesto que no puede haber flujo de energía solar en el tope de la atmósfera ( $\tau = 0$ ) para  $\mu_0 = 0$  (no se tienen en cuenta aquí los efectos de la refracción, por lo general despreciables en la energética del sistema climático).

En el llamado modelo de Eddington (véase, por ejemplo, la monografía de **Goody & Yung** 1989) se suele suponer que las radiancias son hemisféricamente isotrópicas, y entonces se tiene:

$$\mu_*^\pm = \frac{\int_0^1 \mu^2 d\mu}{\int_0^1 \mu d\mu} = \frac{2}{3} = -\frac{\int_{-1}^0 \mu^2 d\mu}{\int_{-1}^0 \mu d\mu} = -\mu_*^-.$$

En la literatura no es raro suponer que  $\mu_*^\pm = -\mu_*^\mp = 2/3$ , lo cual sólo es, como acabamos de ver, estrictamente válido en el modelo de Eddington. Para un tratamiento de la radiación de onda larga dentro del marco del modelo de Eddington, me permito remitir a unos trabajos anteriores (**Pelkowski** 1993, 1998). De ahora en adelante admitiremos, más generalmente, que el valor de  $\mu_*^\pm = -\mu_*^\mp = \mu^\pm$  sea arbitrario en  $[0, 1]$ .

**4.1. Modelo bipotámico particular.** Tratándose en nuestro enfoque deliberado exclusivamente de la transferencia atmosférica de flujos de onda corta, podemos recurrir a nuestra notación original (**Anduckia & Pelkowski** 2000), reemplazando los flujos holocromáticos  $F$  por los holocromáticos de onda corta,  $Q$ . Por lo tanto, las ecuaciones para los flujos ascendente y descendente de la sección anterior se presentan bajo la forma siguiente:

$$\frac{dQ^\uparrow (\tau)}{d\tau} = \gamma_1 Q^\uparrow (\tau) - \gamma_2 Q^\downarrow (\tau) - \frac{1-a}{\mu^+} \pi B - \gamma_s^- a Q_0 e^{-\tau/\mu_0} \quad (19)$$

$$\frac{dQ^\downarrow (\tau)}{d\tau} = -\gamma_1 Q^\downarrow (\tau) + \gamma_2 Q^\uparrow (\tau) + \frac{1-a}{\mu^+} \pi B + \gamma_s^+ a Q_0 e^{-\tau/\mu_0}, \quad (20)$$

donde  $\gamma_1 \equiv [1 - a(1+g)/2]/\mu^+$ ,  $\gamma_2 \equiv a(1-g)/2\mu^+$  y  $\gamma_s^\pm = \mu_0(1 \pm g)/2\mu^+$  (la forma de estas ecuaciones se amolda a las de **Liou** 2002, p.309; sólo el coeficiente  $\gamma_s^\pm$  es distinto en el caso presente).

En este régimen de ondas electromagnéticas cortas podemos despreciar la fuente interna que representa la emisión de ondas largas, es decir, los términos proporcionales a  $B$ , quedando entonces unas ecuaciones diferenciales no homogéneas que se pueden resolver mediante los métodos clásicos de la teoría de ecuaciones diferenciales. Los flujos en cuestión se obtienen como combinaciones lineales de exponenciales que son función de la profundidad óptica. Aquí me limito a reproducir el resultado, tal como se encuentra, por ejemplo, en el libro de **Liou** (2002):

$$Q^\uparrow (\tau) = p_+ C_1 e^{\kappa \tau} + p_- C_2 e^{-\kappa \tau} + \zeta^- e^{-\tau/\mu_0} \quad (21)$$

$$Q^\downarrow (\tau) = p_- C_1 e^{\kappa \tau} + p_+ C_2 e^{-\kappa \tau} + \zeta^+ e^{-\tau/\mu_0}, \quad (22)$$

con nuevos coeficientes, definidos a continuación:

$$\kappa^2 = \gamma_1^2 - \gamma_2^2,$$

$$p_\pm = \frac{1}{2} [1 \pm (\gamma_1 - \gamma_2)/\kappa]$$

$$\zeta^\pm = \mp \left[ \gamma_s^\pm \left( \frac{1}{\mu_0} \pm \gamma_1 \right) \pm \gamma_2 \gamma_s^\mp \right] \mu_0^2 a Q_0.$$

Los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$  se determinan a partir de las condiciones de contorno (**Salby** 1996 da un ejemplo). Las soluciones son manifiestamente función del ángulo cenital del sol.

En lugar de deducir los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$  bajo determinadas condiciones de frontera, optamos por simplificar el análisis matemático de las ecuaciones diferenciales, deshaciendo un paso anterior. La radiancia del campo de radiación solar, que descompusimos según (2), obedeciendo a una tradición sacrosanta en meteorología, en una radiancia directa y otra difusa, será de ahora en adelante tratada como una entidad individida, representando la radiancia total, que comprende tanto la directa como la difusa. Por consiguiente, en las ecuaciones (19) y (20) no puede aparecer explícitamente la "fuente interna" que resulta del debilitamiento de la radiación solar directa en la atmósfera. Recordando además que la fuente atmosférica de radiación propia en régimen de ondas "cortas" es despreciable, las nuevas ecuaciones a resolver son:

$$\mu^+ \frac{dQ^\uparrow(\tau)}{d\tau} = (1-a)Q^\uparrow(\tau) + \frac{a}{2}(1-g)[Q^\uparrow(\tau) - Q^\downarrow(\tau)]$$

$$\mu^+ \frac{dQ^\downarrow(\tau)}{d\tau} = -(1-a)Q^\downarrow(\tau) + \frac{a}{2}(1-g)[Q^\uparrow(\tau) - Q^\downarrow(\tau)].$$

Esta simplificación formal de la estructura de las ecuaciones diferenciales, privadas de sus fuentes proporcionales a  $Q_0$ , se consigue a expensas de una condición de frontera no nula en el tope de la atmósfera. La radiancia se anulaba en el procedimiento anterior, puesto que sobre la atmósfera no incide radiación difusa desde arriba. La interpretación de los dos planteamientos matemáticos es distinta, pero los resultados tienen que coincidir.

La solución de este problema modificado, aunque no es difícil de obtener, es tediosa; se puede repasar en nuestros artículos precedentes (Anduckia & Pelkowski 2000), o en un libro sobre el tema (p.ej., Petty 2004).

Es esencial prescribir correctamente las condiciones de frontera, que serán escogidas conforme al espíritu de los trabajos anteriores, en los que no incluíamos el esparcimiento, salvo en una capa continua de nubes, mientras que ahora el propósito es abarcar el caso general de esparcimiento en cada punto de la atmósfera. Teniendo, por consiguiente, en cuenta que la energía solar es reflejada en la superficie terrestre, y adoptando, sin menoscabo en los balances energéticos, la hipótesis de una reflexión isotrópica (superficie "lambertiana"), de albedo superficial igual a  $r_s$ , tenemos como condiciones de contorno: 1) en la frontera superior de la atmósfera, donde, por definición, su profundidad óptica es igual a 0,

$$Q^\downarrow(0) = Q_0\mu_0,$$

y 2) en la frontera inferior, donde la profundidad óptica  $\tau_b$  es máxima,

$$Q^\uparrow(\tau_b) = r_s Q^\downarrow(\tau_b) = r_s T Q^\downarrow(0).$$

Hemos expresado, en esta última ecuación, el flujo descendente de la radiación solar (directa + global, en términos meteorológicos),  $Q^\downarrow(\tau_b)$ , en función de la transmisividad atmosférica respecto del flujo de energía que incide en su frontera superior (transmisividad "reonomica", para distinguirla de la transmisividad de un rayo particular en cierta dirección, o transmisividad radial), definida como el cociente

$$T = \frac{Q^\downarrow(\tau_b)}{Q^\downarrow(0)}.$$

Esta fracción de energía solar que incide sobre la superficie terrestre es una medida de la transparencia de la atmósfera. Podemos aprovechar este paréntesis para introducir desde ahora el concepto de albedo, o sea, la fracción de energía solar que emerge de la atmósfera terrestre, y que designaremos por  $A$ :

$$A = \frac{Q^\uparrow(0)}{Q^\downarrow(0)}.$$

Un aumento en este parámetro implica que la Tierra dispone de menos energía solar para los procesos que tienen lugar en su seno.

Con las condiciones actuales de contorno se obtienen las siguientes soluciones del problema:

$$Q^\uparrow(\tau) = \frac{Q^\downarrow(0)}{e^{\gamma\tau_b^*} - r_\infty^2 e^{-\gamma\tau_b^*}} \times \left[ r_s T (e^{\gamma\tau^*} - r_\infty^2 e^{-\gamma\tau^*}) + r_\infty (e^{\gamma(\tau_b^* - \tau^*)} - e^{-\gamma(\tau_b^* - \tau^*)}) \right]$$

$$Q^\downarrow(\tau) = \frac{Q^\downarrow(0)}{e^{\gamma\tau_b^*} - r_\infty^2 e^{-\gamma\tau_b^*}} \times \left[ r_\infty r_s T (e^{\gamma\tau^*} - e^{-\gamma\tau^*}) + e^{\gamma(\tau_b^* - \tau^*)} - r_\infty^2 e^{-\gamma(\tau_b^* - \tau^*)} \right].$$

Hemos introducido las abreviaturas  $\tau^* = \tau/\mu^+$ ,

$$\gamma \equiv \sqrt{(1-a)(1-ag)}. \quad (23)$$

y

$$r_\infty \equiv \frac{a(1-g)}{2-a(1+g)+2\gamma} = \frac{\sqrt{1-ag} - \sqrt{1-a}}{\sqrt{1-ag} + \sqrt{1-a}}. \quad (24)$$

$r_\infty$  es el valor asintótico del albedo (albedo límite) de una capa cuya profundidad óptica es infinita ( $\tau_b \rightarrow \infty$ ), como veremos enseguida. Para mayor legibilidad de las

fórmulas hemos recurrido a la profundidad óptica dilata-  
da  $\tau^* = \tau/\mu^+$ . El albedo y la transmisividad se despren-  
den fácilmente de las últimas expresiones de los flujos:

$$A = \frac{r_s T (1 - r_\infty^2) + r_\infty (e^{\gamma\tau_b^*} - e^{-\gamma\tau_b^*})}{e^{\gamma\tau_b^*} - r_\infty^2 e^{-\gamma\tau_b^*}}$$

$$T = \frac{1 - r_\infty^2}{e^{\gamma\tau_b^*} - r_\infty^2 e^{-\gamma\tau_b^*} - r_s r_\infty (e^{\gamma\tau_b^*} - e^{-\gamma\tau_b^*})}$$

Estas expresiones pueden transformarse, empleando las  
expresiones correspondientes al caso en que la superfi-  
cie terrestre no refleja (superficie "negra", para la cual  
 $r_s = 0$ ). Indiquemos las fórmulas que resultan:

$$A = r + \frac{r_s t^2}{1 - r_s r} \quad (25)$$

y

$$T = \frac{t}{1 - r_s r}, \quad (26)$$

donde

$$r = r_\infty \frac{1 - e^{-2\gamma\tau_b^*}}{1 - r_\infty^2 e^{-2\gamma\tau_b^*}} \quad (27)$$

y

$$t = \frac{1 - r_\infty^2}{e^{\gamma\tau_b^*} - r_\infty^2 e^{-\gamma\tau_b^*}} \quad (28)$$

representan la reflectividad y transmisividad "intrínse-  
cas" de la atmósfera, en el sentido de que no dependen  
del poder de reflexión de la frontera inferior.

Para una capa infinitamente profunda (el caso apro-  
ximado de la atmósfera de Venus), se tiene:

$$\lim_{\tau_b \rightarrow \infty} r = r_\infty$$

$$\lim_{\tau_b \rightarrow \infty} t = 0.$$

Nótese que en general el albedo en cada lugar geo-  
gráfico de un planeta suele depender del ángulo cen-  
ital del disco solar. Pero la magnitud que nos interesa  
aquí es el albedo global, que se obtiene por integración  
con respecto a las latitudes del hemisferio iluminado por  
el sol, conocido en astrofísica como el albedo esférico, o  
de Bond (quien lo propuso en 1861), definido así:

$$A = 2 \int_0^1 A \mu_0 d\mu_0. \quad (29)$$

(Véase, por ejemplo, la ilustración geométrica de esta  
definición en el libro de **Thomas & Stamnes 1999**.) Si  
 $A$  no depende de  $\mu_0$ ,  $A = A$ . El albedo de nuestro mo-  
delo simplificado no depende de la posición del sol en  
el cielo y por lo tanto podemos utilizar ambos albedos  
indistintamente. Una definición análoga es válida para  
la transmisividad global  $T$ . El albedo que resultaría de  
las soluciones (21) es por contraste una función de  $\mu_0$ .

En el caso particular de esparcimiento isotrópico  
(atmósfera molecular, pura, descontaminada), el albedo  
y la transmisividad globales son función de dos paráme-  
tros:  $a$  y  $\tau_b$  (además de, claro está, la reflectividad  $r_s$   
de la superficie terrestre). En la sección siguiente veremos  
que las relaciones aproximadas de esta sección resisten la  
comparación con las que resultan de la solución rigurosa  
del problema.

**4.2. Modelo bipotámico conservador.** Este caso  
corresponde al esparcimiento puro, sin absorción de e-  
nergía solar dentro del volumen elemental esparcedor, y  
equivale a suponer  $a \equiv 1$ . En tal caso, las ecuaciones an-  
teriores presentan expresiones indeterminadas del tipo  
0/0, y en lugar de aplicar la regla de l'Hôpital, es más  
fácil resolver de nuevo las correspondientes ecuaciones  
para los flujos, a saber:

$$\mu^+ \frac{dQ^1(\tau)}{d\tau} = (1 - f)[Q^1(\tau) - Q^1(\tau)]$$

$$\mu^+ \frac{dQ^1(\tau)}{d\tau} = (1 - f)[Q^1(\tau) - Q^1(\tau)],$$

El caso particular  $\mu^+ = 1$  ha sido tratado por muchos  
autores (entre ellos, **Anduckia & Pelkowski 2000**).  
Para nuestros propósitos actuales, basta remitir a éstos,  
de cuyo artículo solamente citaré los siguientes resul-  
tados relativos a la reflectividad y transmisividad,  $r$  y  
 $t$ , respectivamente, de una capa de nubes conservativa-  
mente esparcedoras, de profundidad óptica igual a  $\tau_{cb}$ :

$$r = \frac{(1 - f)\tau_{cb}^*}{1 + (1 - f)\tau_{cb}^*} \quad (30)$$

$$t = \frac{1}{1 + (1 - f)\tau_{cb}^*}. \quad (31)$$

La solución actual aporta un elemento de flexibilidad a  
la modelación de atmósferas, al permitir dilatar la pro-  
fundidad óptica:  $\tau_{cb}^* = \tau_{cb}/\mu^+$ . Como veremos más ade-  
lante, el esquema de la jerarquía de modelos presentada  
en las secciones anteriores permite fijar, según ciertos  
criterios, el parámetro  $\mu^+$ . Nótese que  $r + t = 1$ .

## 5. Teoría rigurosa del esparcimiento isotrópico

En este caso especial, en el que el factor de asimetría  
toma el valor cero, es posible transformar la ETR en  
una ecuación integral (**Pelkowski 2003**):

$$S(\tau) - \frac{a}{2} \int_0^{\tau_b} E_1(|\tau - t|) S(t) dt =$$

$$\frac{a}{4\pi} Q_0 e^{-\tau/\mu_0} + \frac{ar_s}{2\pi} Q^1(\tau_b) E_2(\tau_b - \tau),$$

en donde sólo hace falta recordar la definición de las exponenciales integrales de orden  $n \geq 1$ :

$$E_n(\tau) = \int_0^1 e^{-\tau/\mu} \mu^{n-2} d\mu.$$

La solución analítica no puede resumirse aquí con suficiente detalle y por lo tanto se omite, pero puede hallarse en **Sobolev (1990)**, o, dentro de un contexto más general y con la notación utilizada en esta sección, en investigaciones actuales (**Chevallier et al. 2007**, **Pelkowski et al. 2008**). Dicha solución permite calcular los flujos ascendente y descendente, y de éstos se deducen, como vimos más atrás, los coeficientes de interés, es decir, el albedo y la transmisividad (esféricos) de la atmósfera:

$$A(a, \tau_b) = R_{11}(a, \tau_b) + \frac{r_s T_{11}^2(a, \tau_b)}{1 - r_s R_{11}(a, \tau_b)} \quad (32)$$

$$T(a, \tau_b) = \frac{T_{11}(a, \tau_b)}{1 - r_s R_{11}(a, \tau_b)}, \quad (33)$$

donde

$$R_{11}(a, \tau_b) = 1 - (2 - a\alpha_0)\alpha_1 - a\beta_0\beta_1$$

$$T_{11}(a, \tau_b) = (2 - a\alpha_0)\beta_1 + a\beta_0\alpha_1$$

son los bimotoes de primer orden de las funciones (o coeficientes) de reflexión (brillo) y transmisión (**Pelkowski 2003**), respectivamente, que a su vez dependen de las siguientes funciones de  $a$  y  $\tau_b$ :

$$\alpha_n(a, \tau_b) = \int_0^1 X(\mu; a, \tau_b) \mu^n d\mu$$

$$\beta_n(a, \tau_b) = \int_0^1 Y(\mu; a, \tau_b) \mu^n d\mu.$$

Se suele atribuir la introducción de las funciones auxiliares  $X$  e  $Y$  a Chandrasekhar, aunque el astrofísico armenio Viktor Ambartsumian las había presentado anteriormente en 1943 (**Ambartsumian 1998**), por lo que también se conocen bajo el nombre de Ambartsumian-Chandrasekhar (**van de Hulst 1980**). Sus valores han sido tabulados por diversos autores.

Obsérvese que  $R_{11}(0, \tau_b) = 0$  y  $T_{11}(0, \tau_b) = 2E_3(\tau_b)$ , y por lo tanto, a falta de esparcimiento atmosférico, se tiene:

$$A(0, \tau_b) = r_s T^2(0, \tau_b) \quad (34)$$

$$T(0, \tau_b) = 2E_3(\tau_b). \quad (35)$$

Esta última transmisividad atmosférica puede compararse con la deducida anteriormente (**Pelkowski 1998**) bajo el supuesto de que la atmósfera absorbía la radiación solar, mas no la esparcía (cielo lóbrego con disco solar visible). Allí se había obtenido  $T = e^{-\tau_b/\mu_0}$ , expresión que depende de la posición del disco solar; si

la integramos según la definición (29) para obtener la transmisividad global, vemos que concuerda con (35):

$$T = 2 \int_0^1 e^{-\tau_b/\mu_0} \mu_0 d\mu_0 = 2E_3(\tau_b). \quad (36)$$

El albedo global del modelo también concuerda con (34). En mi trabajo anterior, en lugar de utilizar albedo y transmisividad globales, busqué reproducir el promedio global y anual de la constante solar mediante el artificio de un valor fijo para el ángulo cenital del sol ( $\mu_0 = 0.25$ ).

En una atmósfera conservadora, el albedo de esparcimiento toma su mayor valor posible,  $a = 1$ , y entonces se tiene

$$R_{11}(1, \tau_b) = 1 - \beta_0(\alpha_1 + \beta_1) \quad (37a)$$

$$T_{11}(1, \tau_b) = \beta_0(\alpha_1 + \beta_1), \quad (37b)$$

de modo que

$$R_{11}(1, \tau_b) + T_{11}(1, \tau_b) = 1.$$

Si el esparcimiento no es isotrópico, las relaciones exactas son mucho más complejas, y su tratamiento requiere desarrollos en series de armónicos esféricos (véase, por ejemplo, el libro de **Sobolev 1975**). Aquí nos hemos de contentar con el caso isotrópico, que sirve de referencia para evaluar la calidad de las relaciones aproximadas que propondremos en las secciones siguientes.

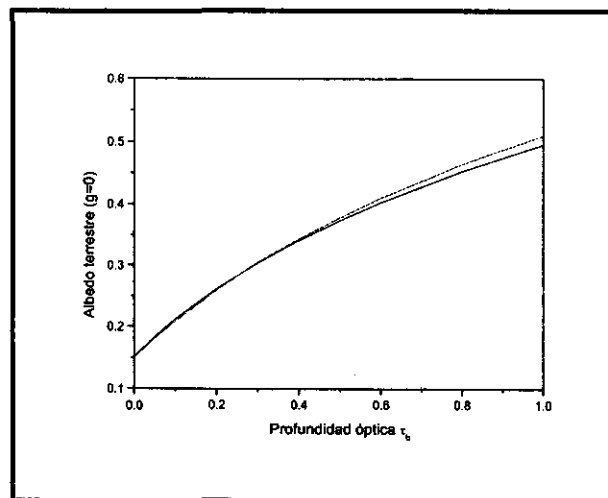


Figura 1. Albedo terrestre en el caso de esparcimiento isotrópico (la curva que menos se eleva corresponde al modelo riguroso; la otra, al aproximado).

La figura 1 compara el albedo exacto (32) y el aproximado (25) para  $\mu^+ = 1/\sqrt{3}$  ("factor de difusividad", **Salby 1996**) en función de la profundidad óptica, en el caso de esparcimiento conservador ( $a = 1$ ) e isotrópico ( $g = 0$ ).



## 6. Modelo de tres capas

Una de las características más conspicuas de la atmósfera terrestre es su estratificación o inhomogeneidad vertical. Además, los productos de condensación, genéricamente conocidos como aerosoles, las nubes siendo los más visibles entre ellos, acentúan esa inhomogeneidad, especialmente en dirección horizontal. Es, pues, imprescindible relajar el presupuesto de coeficientes ópticos constantes dentro de la atmósfera.

Desafortunadamente, el tratamiento analítico de atmósferas inhomogéneas, aun cuando sólo lo sean en sentido vertical, no es posible salvo en casos muy particulares, que no incluyen a las nubes reales.

Un expediente común es dividir la atmósfera en un cierto número de capas homogéneas y empalmar los resultados a propósito de cada capa. A continuación presentaremos una división mínima de la atmósfera en tres capas.

Procedamos a ampliar el modelo homogéneo de las secciones anteriores, introduciendo tres capas: 1) atmósfera superior (de la tropopausa para arriba), 2) capa termodinámicamente activa con formación interrumpida de nubes (“atmósfera libre” o troposfera superior) y, finalmente, 3) capa adyacente a la superficie de la Tierra (troposfera inferior).

En la capa intermedia, que llamaremos a menudo capa de nubes o capa nefélica, admitiremos la posibilidad de una nubosidad variable, teniendo en cuenta la fracción del área total cubierta por las nubes ( $n$ ). Las nubes esparcen la radiación solar y la absorben en menor grado. A lo contrario de lo que ocurre con las moléculas, el esparcimiento por gotitas se caracteriza por su fuerte anisotropía, de modo que no podemos aplicar las relaciones exactas de la sección anterior, sino que tenemos que acudir a las aproximadas de la penúltima sección.

Los aerosoles, que generalmente constan de partículas microscópicas e irregulares, tampoco esparcen isotrópicamente la radiación solar. La capa inferior puede asimilarse a un aerosol en aire más o menos húmedo, por cuanto contiene, al encontrarse en contacto con la superficie terrestre (cubierta de la biosfera, antroposfera y esferas de agua y hielo), contaminantes, sales marinas, partículas orgánicas y otras suspensiones. Supondremos por otro lado que la capa superior consiste de aire seco

y generalmente descontaminado, pero con la posibilidad de convertirse en un aerosol por un enturbiamiento repentino, a raíz, por ejemplo, de una erupción volcánica. El esparcimiento en dicha capa será considerado como normalmente isotrópico (del tipo Rayleigh y preponderantemente cerúleo). La capa inferior, en cambio, tendrá una tonalidad blancuzca, mientras que la intermedia se supondrá constituida de aire más o menos contaminado, en los “intersticios”, y de nubes con características ópticas netamente distintas.

La profundidad óptica de la atmósfera entera, en el régimen de la radiación solar, se igualará a  $\tau_b^3$ . La capa superior tendrá por definición la profundidad óptica  $\tau_{ub}$  ( $= \tau_1$ ). A la capa intermedia, donde esté exenta de nubes (tiempo despejado), se le asignará la profundidad óptica  $\tau_{\Delta b}$ , tal que  $\tau_{ub} + \tau_{\Delta b} = \tau_2$ . Finalmente, a la capa inferior, o infranefélica, haremos corresponder la profundidad óptica  $\tau_{lb} = \tau_b - (\tau_{ub} + \tau_{\Delta b}) = \tau_b - \tau_2$ . Las profundidades ópticas dentro de las correspondientes capas se denotarán por  $\tau_u$ ,  $\tau_{\Delta}$  y  $\tau_l$ . El límite  $n = 1$  significa que el cielo está completamente cubierto de nubes, y en tal caso la profundidad óptica de la capa intermedia se confunde con la de la capa de nubes (llámese  $\tau_{cb}$ ); suele ser de varios órdenes de magnitud mayor que las profundidades ópticas de una atmósfera despejada. El caso de nubosidad total fue tratado por **Anduckia & Pelkowski** (2000) en el contexto de una atmósfera en equilibrio radiativo, modelo de atmósfera que permite estudiar el efecto invernadero en su estado depurado. En el presente artículo nos interesa ante todo el efecto de la nubosidad sobre el albedo de la Tierra, efecto que contribuye a una de las más importantes retroalimentaciones en el sistema climático global.

**6.1. Albedos y transmisividades reonómicas de las capas.** El albedo de este modelo de tres capas se puede expresar como el siguiente producto:

$$A = r_s T_u T_u^+ T_n T_n^+ T_l T_l^+,$$

donde hemos introducido las transmisividades catarreónicas,

$$T_x = \frac{Q^1(\tau_{xb})}{Q^1(\tau_x = 0)}, \quad (38)$$

<sup>3</sup>Esta hipótesis ha sido cuestionada, puesto que las profundidades ópticas varían notablemente según el color (**Melnikova & Vasilyev** 2005). Es preciso, entonces, definir un valor representativo de la profundidad, pero prescindiremos del examen de esta cuestión. En **Pelkowski** (1998), la profundidad óptica media respecto de las radiaciones visibles se había designado por  $\tau_{\odot b} = \epsilon \tau_b$ , siendo  $\tau_b$  la profundidad óptica de la atmósfera respecto a las ondas infrarrojas. La distinción es innecesaria en el contexto actual.

que se refieren a los flujos descendentes, y las anarreónicas,

$$T_x^+ = \frac{Q^\uparrow(\tau_x = 0)}{Q^\uparrow(\tau_{xb})} \quad (39)$$

con respecto a los flujos ascendentes.  $x$  representa cualquiera de los índices  $u, n$  o  $l$  ( $n$  para la capa nefélica).

Las transmisividades en los casos extremos de ausencia de nubosidad (cielo despejado,  $n = 0$ ) y nubosidad completa (cielo cubierto,  $n = 1$ ) se obtienen considerando los flujos de onda corta para cada caso por separado. Más adelante, examinaremos ejemplarmente el flujo que emerge de la atmósfera, y de la misma manera se puede proceder para obtener los flujos que figuran en las definiciones de las distintas transmisividades.

Contemplemos primero el caso de una atmósfera libre de nubosidad. Las transmisividades catarreónicas de cada capa se expresan entonces por la fórmula (26):

$$T_x = \frac{t_x}{1 - \underline{A}r_x}, \quad (40)$$

con  $x = u, \Delta, l$  ( $\Delta$  se refiere a la capa intermedia libre de nubes, o sea, para  $n = 0$ ). El albedo  $\underline{A}$  se refiere al de la atmósfera por debajo de la capa que se está considerando. En el caso de la capa infranefélica se tiene  $\underline{A} = r_s$ .

De acuerdo con (28), la transmisividad de una capa depende del coseno  $\mu^+$  (a través de  $\tau_b^* = \tau_b/\mu^+$ ), cuyo valor entre 0 y 1 queda a nuestra discreción. En lugar de fijarlo arbitrariamente, aplicaremos un criterio que desarrollaremos a continuación.

Si por un momento suponemos que las capas no esparcen la radiación solar, sus reflectividades intrínsecas se anulan ( $r_u = r_\Delta = r_l = 0$ ), y entonces obtenemos el caso particular que ha sido tratado en un artículo anterior (Pelkowski 1998). Para la atmósfera, las transmisividades catarreónicas y anarreónicas son:

$$T_0 = e^{-\tau_b/\mu_0} \quad (41)$$

$$T_0^+ = \frac{Q^\uparrow(0)}{Q^\uparrow(\tau_b)} = 2E_3(\tau_b). \quad (42)$$

(El subíndice "0" nos quiere recordar que las magnitudes se calculan en ausencia de todo esparcimiento.) La transmisividad catarreónica es exponencial, mientras que la anarreónica no lo es, tratándose de radiación solar que ha sido reflejada isotrópicamente en superficie y es devuelta al espacio en forma difusa, tras un debilitamiento "exponencial-integral" a lo largo de la atmósfera. Es razonable esperar que el modelo de tres

estratos reproduzca estas expresiones límite. Asignando a cada capa el mismo valor  $\mu^+$ , el producto de las tres transmisividades catarreónicas da:

$$\begin{aligned} e^{-\tau_{ub}/\mu^+} e^{-\tau_{\Delta b}/\mu^+} e^{-\tau_{lb}/\mu^+} &= e^{-(\tau_1 + \tau_2 - \tau_1 + \tau_b - \tau_2)/\mu^+} \\ &= e^{-\tau_b/\mu^+}. \end{aligned}$$

Identificando a  $\mu^+$  con  $\mu_0$  se tendría un modelo de tres capas cuya transmisividad catarreónica,  $T_0$ , es función de una determinada posición  $\mu_0$  del sol en el cielo (variable según la estación, la latitud y la hora). Pero para un modelo del clima se requieren valores válidos global y anualmente, de modo que recurriremos a la transmisividad catarreónica global dada por (36), que no depende sino del promedio global de la profundidad óptica de la atmósfera. Requerimos entonces que se cumpla la igualdad:

$$e^{-\tau_b/\mu^+} = 2E_3(\tau_b), \quad (43)$$

permitiéndonos calcular el valor de  $\mu^+$  en función de la profundidad óptica de la atmósfera en el visible:

$$\mu^+(\tau_b) = \frac{-\tau_b}{\log[2E_3(\tau_b)]}. \quad (44)$$

Por supuesto que se pueden proponer otros criterios. Podríamos preferir la determinación del coseno  $\mu^+$  de cada capa según la transmisividad anarreónica en el caso límite que estamos examinando ( $a = 0$ ). Por ejemplo, podríamos exigir que la transmisividad anarreónica de la capa intermedia coincida con el valor que resulta del modelo de tres capas sin esparcimiento, a saber:

$$T_{\Delta 0}^+ = \frac{E_3(\tau_b - \tau_1)}{E_3(\tau_b - \tau_2)},$$

en cuyo caso obtendríamos un coseno correspondiente a la capa intermedia determinable gracias a

$$\mu_\Delta^+(\tau_b, \tau_{ub}, \tau_{\Delta b}) = \frac{-\tau_{\Delta b}}{\log\left[\frac{E_3(\tau_b - \tau_{ub})}{E_3(\tau_b - \tau_{ub} - \tau_{\Delta b})}\right]}.$$

Algunas pruebas numéricas realizadas con este tipo de expresión demuestran que no hay desventaja en valernos de la navaja de Occam para modelar cada capa con el mismo valor de  $\mu^+$ . Más adelante, veremos que la transmisividad anarreónica del modelo, si empleamos el valor fijado mediante (44), reproduce la transmisividad correspondiente a (42).

En cuanto al coseno  $\mu_c^+$  de la capa de nubes, no es razonable determinarlo según el mismo criterio, ya que las nubes se caracterizan por su gran capacidad esparcedora y el límite contemplado pierde toda justificación. Por lo tanto, fijaremos a  $\mu_c^+$  a través del límite opuesto,

el de esparcimiento conservativo, en el cual  $a_c = 1$ . (A las nubes suelen asignarse valores de  $a_c$  muy cercanos a la unidad.) En este caso, tanto la reflectividad como la transmisividad intrínsecas se describen mediante las fórmulas (30) y (31). Ahora, como disponemos de las expresiones rigurosas en el caso particular del esparcimiento isotrópico, ecuaciones (37a,b), podemos igualar las expresiones aproximadas (con  $f = 1/2$ ) y los valores exactos, obteniendo la función:

$$\mu_c^+(\tau_{cb}) = \frac{\tau_{cb} T_{11}(1, \tau_{cb})}{2 R_{11}(1, \tau_{cb})}. \quad (45)$$

Empleando esta función, la ecuación (25) reproduce exactamente la curva de la solución rigurosa (32) en la figura 1.

Con estas estipulaciones, y sin más rodeos, vamos a establecer a continuación los albedos y las transmisividades, sucesivamente para cada capa y teniendo en cuenta la nubosidad variable. Las transmisividades anarreonómicas se deducen en cada caso gracias a la definición (39). Cada albedo  $A$  se refiere al de la capa atmosférica caracterizada por su subíndice (capa cuyo límite superior es "el fondo" de la capa contemplada). Para la capa superior se tiene entonces:

$$\begin{aligned} T_u &= \frac{t_u}{1 - A_n r_u}, \\ T_u^+ &= t_u + \frac{r_u(1 - A_n r_u)}{A_n t_u}; \quad (A_n \neq 0) \\ \lim_{r_u \rightarrow 0} T_u^+ &= n T_{u1}^+ + (1 - n) T_{u0}^+; \\ T_{u0}^+ &= \frac{E_3(\tau_b)}{E_3(\tau_b - \tau_1)}; \quad T_{u1}^+ = 2E_3(\tau_{ub}); \\ A &= A_u = r_u + \frac{A_n t_u^2}{1 - A_n r_u}, \end{aligned}$$

mientras que para la capa nefélica resulta

$$\begin{aligned} T_n &= \frac{t_n}{1 - A_l r_n}, \\ T_n^+ &= t_n + \frac{r_n(1 - A_l r_n)}{A_l t_n} \quad (A_l \neq 0), \\ t_n &= n t_c + (1 - n) t_\Delta; \quad r_n = n r_c + (1 - n) r_\Delta; \\ A_n &= r_n + \frac{A_l t_n^2}{1 - A_l r_n}. \end{aligned}$$

El albedo y la transmisividad de esta capa resultan de una minuciosa contabilidad de flujos descendentes y ascendentes, que realizan un vaivén entre la capa intermedia y la superficie terrestre, y cuyas contribuciones conjuntas conducen a una serie infinita de términos, de suma afortunadamente conocida y sencilla. Siguiendo el mismo razonamiento de **Anduckia & Pelkowski**

(2000) en la derivación del albedo de la capa nubosa, se obtienen las anteriores expresiones del albedo con nubosidad variable,  $A_n$ , además de las dos transmisividades. El ejercicio es penoso y no disponemos de espacio para detallarlo aquí.

Para la capa inferior se tiene:

$$\begin{aligned} T_l &= \frac{t_l}{1 - r_s r_l}, \\ T_l^+ &= t_l + \frac{r_l(1 - r_s r_l)}{r_s t_n} \quad (r_s \neq 0), \\ A_l &= r_l + \frac{r_s t_l^2}{1 - r_s r_l}. \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (27) y (28), expresamos ahora la reflectividad y la transmisividad intrínsecas de cada capa como

$$r_x = r_{\infty x}^2 \frac{1 - t_{x0}^{2\gamma_x}}{1 - r_{\infty x}^2 t_{x0}^{2\gamma_x}}$$

y

$$t_x = \frac{(1 - r_{\infty x}^2) t_{x0}^{\gamma_x}}{1 - r_{\infty x}^2 t_{x0}^{2\gamma_x}},$$

donde

$$t_{x0} = e^{-\tau_{xb}/\mu^+} = [2E_3(\tau_b)]^{\tau_{xb}/\tau_b}$$

acorde al criterio (44).  $x = u, \Delta, l$ , mientras que para la capa nubosa podemos conservar las expresiones originales. Nótese que si una capa se supone no esparcer ( $a_x = 0$ , implicando  $r_x = 0$ ), entonces:

$$\lim_{r_x \rightarrow 0} t_x = t_{x0}.$$

Este caso límite, sin nubes, corresponde al de un modelo anterior (**Pelkowski 1998**), y para su transmisividad anarreonómica obtendríamos:

$$\begin{aligned} T^+ &= \lim_{r_x \rightarrow 0, \forall x} T_l^+ T_\Delta^+ T_u^+ = t_{l0} t_{\Delta 0} t_{u0} = \\ &= [2E_3(\tau_b)]^{\tau_{lb}/\tau_b} [2E_3(\tau_b)]^{\tau_{\Delta b}/\tau_b} [2E_3(\tau_b)]^{\tau_{ub}/\tau_b} = \\ &= [2E_3(\tau_b)]^{(\tau_{lb} + \tau_{\Delta b} + \tau_{ub})/\tau_b} = 2E_3(\tau_b), \end{aligned}$$

o sea, la expresión límite (42).

**6.1.1. Albedo y transmisividad globales.** De las ecuaciones anteriores se deduce que el albedo global terrestre es función de los siguientes parámetros:

$$A(n, r_s, a_c, g_c, a_l, g_l, a_u, g_u, \tau_{ub}, \tau_{cb}, \tau_{lb}, \tau_b).$$

La transmisividad global de la atmósfera,  $T = T$ , que se obtiene multiplicando las transmisividades catarreonómicas de cada capa,

$$T = T_u T_n T_l = \frac{t_u t_n t_l}{(1 - A_n r_u)(1 - A_l r_n)(1 - r_s r_l)},$$

evidentemente depende de los mismos parámetros que el albedo global. De ella depende la cantidad de energía que recibe la superficie terrestre en promedio anual, determinando así el régimen térmico del clima terrestre.

Con el fin de ilustrar algunas de las dependencias del albedo, nos limitaremos a considerar una sola capa atmosférica, desprovista de nubes ( $n = 0$ ,  $\tau_{\Delta b} = \tau_{lb} = 0$ ), y cuyo albedo distinguiremos mediante el subíndice "1":

$$\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_1(r_s, a, g, \tau_b).$$

Al albedo de superficie y a la profundidad óptica les asignamos los valores  $r_s = 0.15$  y  $\tau_b = 0.28$ , respectivamente. En la figura 2 están representadas las funciones  $\mathcal{A}_1(0.15, a, 0, 0.28)$  y  $\mathcal{A}_1(0.15, a, 0.85, 0.28)$ , mientras que la figura 3 muestra las funciones  $\mathcal{A}_1(0.15, 0.85, g; 0.28)$  y  $\mathcal{A}_1(0.15, 0.99, g, 0.28)$ .

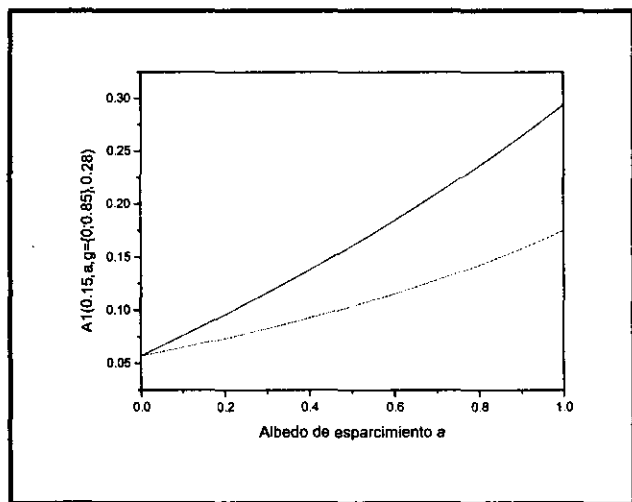


Figura 2. Albedo terrestre en función del albedo de esparcimiento isotrópico (curva superior) y para  $g = 0.85$  (curva inferior).

En la figura 4 se puede apreciar el cambio del albedo terrestre con la profundidad óptica en el visible, cuando se hacen variar algunos parámetros. Salvo la curva con el mayor valor de  $\mathcal{A}_1$  a mayores profundidades ópticas (válida para una atmósfera casi conservadora,  $a = 0.99$ ), las demás curvas corresponden a un albedo de esparcimiento  $a = 0.85$  y valores crecientes del factor de asimetría:  $g$  crece a medida que  $\mathcal{A}_1(0.15, 0.85, g, 1)$  disminuye:  $\mathcal{A}_1(\dots, g = -0.5, 1) > \mathcal{A}_1(\dots, g = 0, 1) > \mathcal{A}_1(\dots, g = 0.5, 1) > \mathcal{A}_1(\dots, g = 0.85, 1) > \mathcal{A}_1(\dots, g = 0.95, 1)$ . Nótese que para  $a = g = 0.85$  el albedo apenas depende de la profundidad óptica, mientras que para  $g = 0.95$  el albedo llega a disminuir con la profundidad

óptica, ilustrando claramente la sensibilidad del sistema climático ante variaciones de ciertos parámetros.

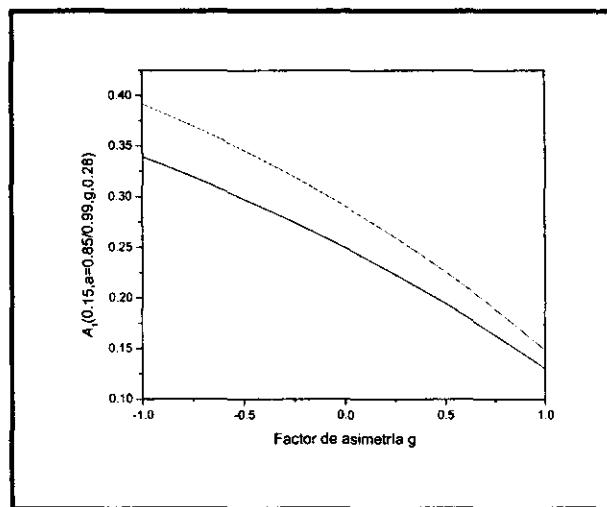


Figura 3. Albedo terrestre en función del factor de asimetría. La curva superior corresponde a  $a = 0.99$ , la inferior a  $a = 0.85$ .

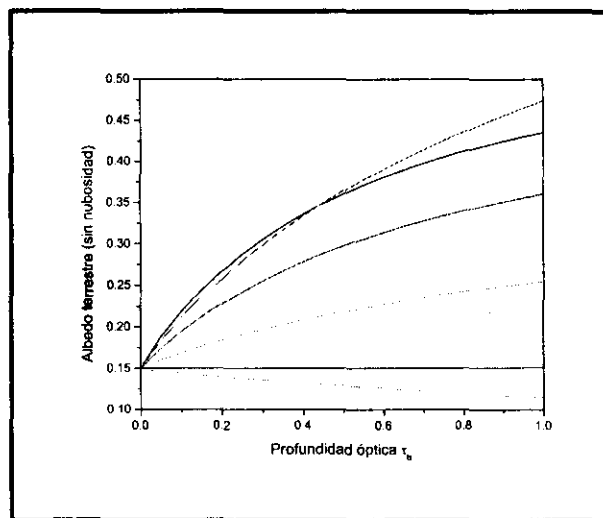


Figura 4. Albedo terrestre en función de la profundidad óptica en el visible, para valores crecientes del factor de asimetría y un albedo de esparcimiento  $a = 0.85$ , excepción hecha de la curva que más se eleva, la cual corresponde al caso de  $a = 0.99$  y esparcimiento isotrópico  $g = 0$ .

**6.2. Ejemplo numérico.** Esta exposición no pretende ofrecer resultados numéricos definitivos, puesto que los parámetros involucrados en las fórmulas anteriores no solamente reclaman una discusión aparte y esmerada, con recurso a complejas teorías y parametrizaciones que no se podrían invocar sin rebasar los

límites de esta presentación lacónica, sino porque no disponemos aún de valores climatológicos globalmente estables. Para dar una idea de las dificultades implicadas, consideremos el caso de una nube compuesta enteramente de gotitas de agua. Como es sabido, las diminutas esferas tienen tamaños diferentes y su composición química es variable.

Dejando de lado esta última variabilidad, generalmente se describen los tamaños presentes en la unidad de volumen de una nube mediante una función de distribución según los radios de las gotitas, llamémosla  $n(r)$ ; su integración sobre todos los valores posibles del radio  $r$  (efectivamente de 0 a  $\infty$ ) representa la concentración de gotículas por unidad de volumen nuboso. En nuestro contexto actual necesitamos considerar solamente el contenido en agua líquida de una nube, así como el radio efectivo de la población de gotas, definido como

$$r_e = \frac{\int_0^{\infty} n(r)r^3 dr}{\int_0^{\infty} n(r)r^2 dr}$$

(Kokhanovsky 2006). El numerador es proporcional al contenido en agua líquida  $C_{LW}$ . Se define como (donde  $\rho_l$  representa la densidad del agua líquida):

$$C_{LW} = \frac{4\pi}{3} \rho_l \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr.$$

Estos parámetros se utilizan en física de nubes con el fin de “parametrizar” la compleja microestructura de una nube. En el caso del esparcimiento conocido como de Mie, y con miras a simplificar las aparatosas relaciones matemáticas que suministra la teoría, se ha llegado a proponer como “muy buena” la siguiente parametrización (Thomas & Stamnes 1999):

$$\begin{aligned} k_c &= C_{LW}(a_1 r_e^{b_1} + c_1) \\ 1 - a_c &= a_2 r_e^{b_2} + c_2 \\ g_c &= a_3 r_e^{b_3} + c_3, \end{aligned}$$

siendo  $k_c = \int_0^{\infty} Q_{ext} r^2 n(r) dr$  el coeficiente de extinción de un elemento de volumen nefélico ( $Q_{ext}$  denota la eficacia de extinción). Estas fórmulas, cuyos coeficientes se dan en la literatura citada en aquel libro, ilustran perfectamente cómo es posible obtener, a partir de teorías específicas, los parámetros de la capa nubosa de nuestro modelo, a saber,  $a_c$ ,  $g_c$  y  $\tau_{cb}$  (en función de  $k_c$ ), determinables tan pronto se especifiquen el radio efectivo de una distribución concreta y el contenido (medio) en agua líquida de una nube.

El ejemplo numérico que presentamos enseguida se refiere al sistema global del clima, de modo que no podremos utilizar sin más los valores correspondientes a

ciertos tipos de nubes. Desafortunadamente, no existe todavía una climatología fiable de los parámetros de nuestro modelo, por lo que recurriremos solamente a valores típicos que se citan en la literatura sobre aerosoles y nubes, sin que, repito, sean necesariamente los valores representativos de una rigurosa climatología cuantitativa. Se trata solamente de ilustrar el potencial del modelo con el fin de comprender cualitativamente el comportamiento del albedo global y la transmisividad atmosférica, operando de operar “cambios globales” en el clima al variar uno u otro parámetro.

La capa supranefélica, como ya se señaló, está compuesta por una mezcla de gases, entre ellos el ozono, que absorbe un 3% de la radiación solar. El esparcimiento de la mezcla puede asimilarse al de un medio molecular (esparcimiento Rayleigh). La función de fase pertinente se imita simplemente eligiendo para el factor de asimetría el valor cero ( $g_u = 0$ ). El albedo de esparcimiento es más difícil de prescribir, pero no podrá suponerse igual a uno, ya que como acabamos de ver el ozono absorbe energía solar. El valor que seleccionaremos tiene en cuenta este hecho, y un valor cercano a uno corresponde al caso que estamos suponiendo. Sea, pues,  $a_u = 0.97$ . Pero cualquiera que sea el valor climatológico “justo” o apropiado, el hecho es que puede variar a largo plazo. Por ejemplo,  $a_u$  disminuye netamente tras una erupción volcánica, cuyo penacho inyecta en la estratosfera partículas parcialmente absorbedoras con un factor de asimetría distinto de cero (véase, por ejemplo, el caso concreto tratado por Eslava, 1994). Y, naturalmente, lo mismo ocurriría si la humanidad tuviera que padecer un *invierno nuclear*: “Un minuto después de la última explosión, ... el polvo y el humo de los continentes en llamas derrotarán a la luz solar, y las tinieblas absolutas volverán a reinar en el mundo” (García Márquez 1986). En este caso drástico,  $a_u = 0$  y  $\tau_b \rightarrow \infty$ , de manera que la transmisividad  $\mathcal{T} \rightarrow 0$ , quedando efectivamente “derrotada” la luz.

La profundidad óptica de la atmósfera molecular, o “de Rayleigh”, es del orden de 0.2-0.3. Eligiémos, como en las figuras de la última sección,  $\tau_b = 0.28$ . Para la profundidad óptica de la atmósfera superior tomaremos el valor de  $\tau_{ub} = 0.01$  (Götz et al. 1991). A la capa intermedia, libre de nubes, le asignamos el valor de  $\tau_{\Delta b} = 0.14$ , a la infranefélica el de  $\tau_{lb} = 0.13$ , un poco menor al tratarse de una capa de extensión geométrica menor. Ambos valores tienen en cuenta la profundidad óptica global del aerosol “de fondo”, igual a 0.12 (Fu 2002); la capa de nubes suele ser ópticamente mucho más profunda, hasta dos órdenes de magnitud ( $\tau_{cb} = 10-40$ ),

pero aún no es posible indicar un valor global promedio fidedigno. Se ha propuesto un valor medio igual a 3.8, valor sospechosamente pequeño y paradójico, según comenta Wiscombe, quien habla de la profundidad óptica de las nubes como una entidad de “múltiples personalidades” (véase su contribución al libro de **Marshak & Davis**, 2005). Este autor ha recomendado un valor de  $\tau_{cb} = 10$ ; ateniéndonos al mapa global de profundidades ópticas medias (loc. cit., p. 45), elijiremos el valor superior  $\tau_{cb} = 16$  (para el cual **van de Hulst**, 1980, ha tabulado los momentos que permiten evaluar (45)). Una vez prescritos los valores de  $\tau_b$  y  $\tau_{cb}$ , quedan determinados los dos cosenos del modelo de acuerdo con (44) y (45):  $\mu^+ = 0.584$  y  $\mu_c^+ = 0.663$ .

A propósito de la capa nefélica, cuya nubosidad fijaremos en un 50% ( $n = 0.5$ , véase por ejemplo, **Kondratyev** 1999, aunque recientemente se está discutiendo un valor global mayor, hasta del 67%, cf. **Marshak & Davis** 2005), optaremos por los siguientes valores: en los intersticios libres de nubes,  $a_\Delta = 0.95$ ,  $g_\Delta = 0.9$ ; en las nubes mismas, si constan de gotas de agua pura, se sabe por teoría que  $a_c \sim 0.999$ , pero yo usaré un valor un tanto menor, fijándolo en  $a_c = 0.985$ , convencido de que en las nubes se absorbe más energía de lo que predice la teoría de esparcimiento de Mie (fenómeno calificado de calentamiento anómalo, y que ha conocido un debate enconado entre detractores y defensores, véase la síntesis de Wiscombe, en **Marshak & Davis** 2005, y las hipótesis de **Melnikova & Vasilyev** 2005).

El factor de asimetría se fijará en  $g_c = 0.85$  ( $g_c = 0.85$  para estratos,  $g_c = 0.81$  para nubes convectivas, y  $g_c = 0.73$  para nubes de hielo, véase **Melnikova & Vasilyev**, 2005). Desafortunadamente, los modelos son sensitivos respecto a los dos últimos parámetros, especialmente si se tiene en cuenta que el esparcimiento de las gotitas nubosas toma valores cercanos a la unidad, de manera que pequeñas variaciones de  $a_c$  acarrearán grandes “cambios climáticos” (véase la figura 5).

Con respecto a la capa infranefélica, que podemos considerar como más contaminada, utilizaremos los siguientes valores:  $a_l = 0.8$  (**Götz**, 1991; **Kondratyev** 1999),  $g_l = 0.95$ .

Dados los datos numéricos presentados, las fórmulas anteriores nos facilitan directamente los valores del albedo global y de la transmisividad atmosférica:

$$\begin{aligned} \mathcal{A} &= 0.31 \\ (1 - r_s)\mathcal{T} &= 0.50 \end{aligned}$$

El albedo terrestre es de un 31%, mientras que la energía que absorbe la superficie terrestre, igual a  $(1 - r_s)Q^{\downarrow}(\tau_b) = (1 - r_s)\mathcal{T}Q^{\downarrow}(0)$ , es del 50%, en buena concordancia con los valores climatológicos actualmente aceptados (**Zdunkowski et al.** 2007).

**Thomas & Stamnes** (1999) invocan un valor de nubosidad promedio del 60%, en lugar del 50% que se ha recomendado generalmente.

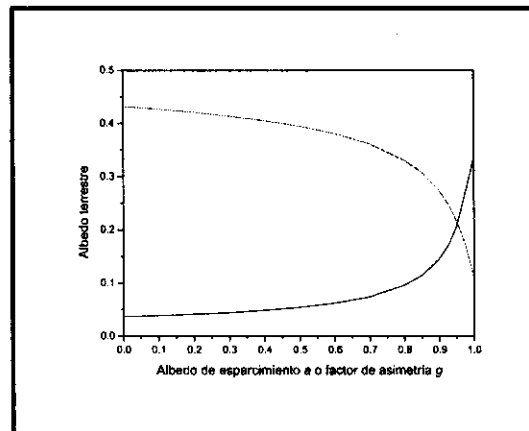


Figura 5. Albedo terrestre con capa semicubierta de nubes (ópticamente profundas) en atmósfera no esparcedora. La abscisa representa el albedo de esparcimiento nefélico (asociado a la curva creciente con  $g = 0.85$ ), o el factor de asimetría (curva decreciente con  $a = 0.985$ ).

Si mantenemos todo los demás valores fijos, variando en el último cálculo solamente la nubosidad (de  $n = 0.5$  a  $n = 0.6$ ), obtenemos para el albedo global  $\mathcal{A} = 0.347$ , un aumento notable de más de 3%, y para la energía absorbida por la superficie terrestre,  $(1 - r_s)\mathcal{T} = 0.44$ , una disminución aún más notable del 50 al 44%, con consecuencias drásticas para el balance de la energía interna de la superficie, implicando, entre otros posibles cambios, una disminución particularmente dramática de la temperatura superficial, que viene a contrarrestar el aumento debido a los gases invernadero (**Pelkowski** 1998).

## 7. Conclusiones

De los distintos factores relacionados con el “cambio climático”, el albedo global de nuestro planeta es uno de los más importantes. La comprensión del mecanismo de retroalimentación en los procesos climáticos se facilita rotundamente con el presente modelo. Éste permite interpretar el sentido de los efectos de ciertos cambios arbitrarios, sin explicarlos o modelarlos explícitamente.

Para ello sería menester diseñar un modelo dinámico (simplificado) que incorpore la bioquímica atmosférica, haciendo posible calcular, por ejemplo, los cambios de las características ópticas de cada capa, o un modelo que permitiera prever tanto los cambios en las condiciones de contorno, subalternas de la dinámica reflectividad de la superficie terrestre, como las variaciones de los parámetros orbitales de la Tierra.

El modelo elemental, con el cual pusimos de manifiesto las dependencias funcionales del albedo global, pertenece a la categoría de modelos bipotámicos que vienen proponiéndose desde hace aproximadamente un siglo. El gran atractivo de tales modelos es su docilidad matemática y su fidelidad energética. De ahí su encanto y popularidad entre los estudiosos de la transferencia de energía por radiación.

El modelo discutido en este ensayo se distingue de los demás por la función de fase elegida y la maleabilidad que le otorga el parámetro libre  $\mu^+$ , función de la profundidad óptica de la capa considerada. El modelo es a un tiempo suficientemente general y relativamente elemental, lo que permite recomendar su consideración en contextos diferentes. Por poner un ejemplo, podría aplicarse a la parametrización de ciertas retroalimentaciones cruciales en investigaciones del paleoclima, en las que destacan las variaciones seculares de: los parámetros orbitales (que afectan a  $\mu_0$ ), los albedos de superficie (valores distintos de  $r_s$ , según que la época sea glacial o interglacial) y las profundidades ópticas ( $\tau_b$  varía con la época geológica, debido a variables concentraciones de ozono, vapor de agua y dióxido de carbono), además de fluctuaciones de las características de las partículas suspendidas en el aire (que pueden provenir de impactos de meteoritos, de erupciones volcánicas, procesos de erosión potenciada etc.). Otra aplicación es su incorporación a un modelo de la película "fría" de los mares, cuya temperatura depende de la radiación solar incidente y variable según el estado de nubosidad de la atmósfera (Anduckia 2007). En este último caso se debería recurrir al sistema de ecuaciones cuya solución incluye explícitamente la dependencia de la posición del sol en el cielo. Por supuesto, no cabe esperar un acuerdo cuantitativo entre los resultados de un modelo tan simple y las observaciones de alta resolución que se vienen acopiando en años recientes, pero tampoco desdeñemos el hecho de que a cambio se disfruta de una comprensión cualitativa de los entrelazados procesos de radiación atmosférica, o, cuando menos se logra entrever la esencia del problema del "cambio global".

Señalemos finalmente que solamente se ha tratado un aspecto limitado del problema general de este cambio climático. En trabajos anteriores se había examinado el aspecto complementario, relacionado con cambios de la temperatura superficial y de la distribución de temperaturas atmosféricas, partiendo de la consideración de una atmósfera en equilibrio radiativo. Si se desea comprender, en los mismos términos elementales del modelo presentado, los cambios del clima exclusivamente relacionados con los efectos de la radiación, el siguiente paso sería combinar los esfuerzos pasados con los que aquí hemos compendiado, creando un modelo más completo de las principales retroalimentaciones del sistema climático. Tras haber indicado el camino a seguir, no nos queda más que manifestar la esperanza de poder consignar los siguientes desarrollos en un futuro no muy lejano.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido elaborado expresamente para cumplir con el requisito que trae consigo la designación como Miembro Correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, y a cuyos miembros deseo agradecer la excelente oportunidad de ofrecer la presente visión panorámica y novedosa de un tema tan actual como exigente. Al mismo tiempo, extendiendo mi agradecimiento al Académico Víctor Albis González por su experto y expedito apoyo en la producción del artículo.

## Bibliografía

- [1] **Ambartsumian, R. V.**, 1998: *A Life in Astrophysics. Selected Papers of Viktor A. Ambartsumian*. Allerton Press, Inc.
- [2] **Anduckia, J. C.**, 2007: *Estudio de la temperatura de la capa delgada en la interfaz océano-atmósfera mediante observaciones de campo en el mar Caribe*. Tesis de Maestría, Postgrado de Meteorología del Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, y Revista de Meteorología Colombiana (en prensa).
- [3] **Anduckia, J. C. y J. Pelkowski**, 2000: *Algunos resultados de equilibrio radiativo en atmósferas con nubes*. Meteorología Colombiana, No. 2, 23-31.
- [4] **Chandrasekhar, S.**, 1950: *Radiative Transfer*. Clarendon Press, Oxford.
- [5] **Chevallier, L., Pelkowski, J. y B. Rutily**, 2007: *Exact results in modeling planetary atmospheres I. Gray atmospheres*. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **104**, 357-376.
- [6] **Eslava Ramirez, J. A.**, 1994: *Características principales de los cambios atmosféricos asociados a la erupción del volcán Nevado del Ruiz y dispersión del material emitido el 13 de noviembre de 1985*. Atmósfera, N° 22, 3-24.
- [7] **Fu, Q.**, 2002: *Radiation (Solar)*. Artículo de la *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, Volumen 5, 1859-1863.

- [8] **García Márquez, G.**, 1986: *El cataclismo de Damocles*. Conferencia Ixtapa, México, Editorial La Oveja Negra, Bogotá.
- [9] **Goody, R. y Y.L. Yung**, 1989: *Atmospheric Radiation. Theoretical Basis*. Oxford University Press, Nueva York.
- [10] **Götz, G., E. Mészáros y G. Vali**, 1991: *Atmospheric Particles and Nuclei*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- [11] **Hovenier, J. W., C. van der Mee y H. Domke**, 2004: *Transfer of Polarized Light in Planetary Atmospheres*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda.
- [12] **Ishimaru, A.**, 1978: *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. Volume I. Academic Press, Nueva York.
- [13] **Liou, K.N.**, 2002: *An Introduction to Atmospheric Radiation*, (2ª edición). Academic Press, San Diego.
- [14] **Kokhanovsky, A. A.**, 2003: *Polarization Optics of Random Media*. Springer Praxis Publishing, Berlín, etc.
- [15] **Kokhanovsky, A. A.**, 2006: *Cloud Optics*. Springer, Dordrecht, Holanda.
- [16] **Kondratyev, K. Ya.**, 1999: *Climatic Effects of Aerosols and Clouds*. Praxis Publishing, Springer, Chichester.
- [17] **Marshak, A. y A.B. Davis**, 2005: *3D Radiative Transfer in Cloudy Atmospheres*. Springer, Berlín-Heidelberg.
- [18] **Melnikova, I. N. y A. V. Vasilyev**, 2005: *Short-Wave Solar Radiation in the Earth's Atmosphere*. Springer, Berlín-Heidelberg.
- [19] **Mihalas, D.**, 1978: *Stellar Atmospheres*, (2ª edición). W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- [20] **Mishchenko, M. I., J. W. Hovenier y L.D. Travis**, 2000: *Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications*. Academic Press, San Diego.
- [21] **Mishchenko, M. I., L.D. Travis y A. A. Lacis**, 2002: *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [22] **Mishchenko, M. I., L.D. Travis y A. A. Lacis**, 2006: *Multiple Scattering of Light by Particles*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [23] **Pelkowski, J.**, 1993: *Approximating the source function of an atmosphere in radiative equilibrium: A variational method*. *Contr. Atmos. Phys. / Beitr. Phys. Atmosph.* **66** (3), 259-271.
- [24] **Pelkowski, J.**, 1998: *Atmósfera y océano en equilibrio radiativo*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, **22** (82), 53-67.
- [25] **Pelkowski, J., L. Chevallier, B. Rutily & O. Titaud**, 2008: *Exact results in modeling planetary atmospheres. III. The general theory applied to the Earth's semi-gray atmosphere*. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **109** (1), 43-51.
- [26] **PETTY, G. W.**, 2004 (edición revisada en 2006): *A First Course in Atmospheric Radiation*. Sundog Publishing, Madison, Wisconsin.
- [27] **Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, 1996: *Vocabulario Científico y Técnico*. 3ª edición. Espasa, Madrid.
- [28] **Salby, M.**, 1996: *Fundamentals of Atmospheric Physics*. Academic Press, San Diego.
- [29] **Sobolev, V.V.**, 1975: *Light Scattering in Planetary Atmospheres*. Pergamon Press, Oxford.
- [30] **Sobolev, V.V.**, 1990: *Cours d'astrophysique théorique*. Éditions Mir, Moscú.
- [31] **Thomas, G. E. y K. Stamnes**, 1999: *Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [32] **Van de Hulst, H. C.**, 1957: *Light Scattering by Small Particles*. John Wiley & Sons Inc., Nueva York.
- [33] **Van de Hulst, H. C.**, 1980: *Multiple Light Scattering. Tables, Formulas and Applications*. (2 volúmenes.) Academic Press, Nueva York.
- [34] **Yanovitskij, E. G.**, 1997: *Light Scattering in Inhomogeneous Atmospheres*. Springer, Berlín. Zdunkowski W.,
- [35] **Zdunkowski W., T. Trautmann & A. Bott**, 2007: *Radiation in the Atmosphere. A Course in Theoretical Meteorology*. Cambridge University Press, Cambridge.

Recibido el 16 de abril de 2007

Aceptado para su publicación el 31 de octubre de 2007



# SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS PILARIZADAS CON ALUMINIO: EFECTO DE LA CARGA INTERLAMINAR SOBRE LA MODIFICACIÓN POR INTERCALACIÓN - PILARIZACIÓN

Por

Luis Alejandro Galeano<sup>1</sup>, Rafael Molina<sup>2</sup>, Sonia Moreno G.<sup>\*2</sup>

## Resumen

**Galeano, LA., R. Molina & S. Moreno G.:** Síntesis y caracterización de arcillas pilarizadas con aluminio: efecto de la carga interlamina sobre la modificación por intercalación - pilarización. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(121): 521-528, 2007. ISSN 0370-3908.

Dos esmectitas (arcillas dioctaédricas y trioctaédricas) han sido pilarizadas con aluminio, y sus propiedades comparadas con las del material obtenido mediante el mismo procedimiento aplicado sobre un aluminosilicato con alta carga interlamina (mica). Los materiales fueron caracterizados por DRX, CIC residual, cuantificación de acidez (adsorción de amoníaco), y textura por adsorción de nitrógeno. El proceso sobre la arcilla trioctaédrica generó un sólido con mejores características texturales y de acidez que su equivalente dioctaédrica. La mica mostró gran dificultad para el intercambio catiónico, requisito fundamental para la intercalación apropiada del material, pero su contenido ácido fue significativamente más elevado que el de las esmectitas pilarizadas con Al.

**Palabras clave:** Esmectita Pilarizada, carga interlamina de arcillas, modificación de mica.

## Abstract

Al-pillared smectites (dioctahedral and trioctahedral clays) were prepared and their properties compared with the material obtained following the same procedure on one aluminosilicate with higher interlayer charge (mica). The characterization of modified clays included X-ray diffractometry, residual cationic exchange capacity, acid-content measurements (ammonia adsorption) and textural properties from nitrogen adsorption isotherms. Pillaring process on the trioctahedral clay produced a solid with better textural characteristics and enhanced acid content than that produced on the

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Materiales Funcionales y Catálisis – Universidad de Nariño, Sede Torobajo, Pasto – Nariño, Colombia.

<sup>2</sup> Estado Sólido y Catálisis Ambiental, Departamento de Química – Universidad Nacional de Colombia, Ciudad Universitaria, Calle 45 Cra. 30, Bogotá D.C., Colombia.

\* Correo electrónico: smorenog@unal.edu.co

dioctahedral material. The mica-like aluminosilicate revealed a high difficulty to allow the cationic exchange, a requirement to get optimal intercalation. However, the total acid content of the Al-modified solid from the mica was substantially enhanced regarding typical Al-pillared smectites.

**Key words:** Pillared smectite, modified mica, interlayer charge of clays.

## Introducción

En los últimos años las arcillas pilarizadas han generado gran expectativa debido a su potencial aplicabilidad en el campo de la adsorción y la catálisis. Sin embargo, algunas de sus características como la baja estabilidad hidrotérmica han limitado fuertemente su aplicación por ejemplo, como sólidos activos en reacciones de catálisis ácida, haciendo más lenta su incursión decidida en procesos a escala industrial (A.P. Carvalho *et al.*, 2003). La mayoría de los trabajos publicados contemplan la modificación de arcillas tipo esmectita como montmorillonita, beidélita y saponita, donde se ha mostrado que la acidez de estos materiales se correlaciona entre otros, con el grado de sustitución isomórfica de Si por Al en su lámina tetraédrica (R. Molina *et al.*, 1994; A. Vieira-Coelho *et al.*, 1991; S. Moreno *et al.*, 1996).

De otro lado, las fases minerales caracterizadas por una alta carga interlaminar atribuible a un grado elevado de sustitución tetraédrica de Al en reemplazo de Si como en las micas y vermiculitas trioctaédricas, han sido investigadas ya que a pesar de ser difícilmente modificadas mediante métodos de intercalación convencionales, exhiben mayor resistencia al tratamiento hidrotérmico y alto grado de acidez asociado a su espacio interlaminar (K. Hashimoto *et al.*, 1999; F.J. Del Rey-Pérez-Caballero *et al.*, 2000). La dificultad para modificar este tipo de materiales de origen natural con alta carga interlaminar, radica en su estabilidad estructural intrínseca, la cual proporciona un importante orden de apilamiento asociado a fuertes interacciones electrostáticas entre las láminas de la arcilla. Esto se debe principalmente a que el K<sup>+</sup> (catión de compensación preferencial) presenta una alta especificidad por los espacios ditrigonales formados en las láminas tetraédricas de la estructura. Existen algunos reportes acerca de la intercalación exitosa de fluoromicas tetrasilícicas (TSM) sintéticas (J.W. Johnson *et al.*, 1993; M.C. Kerby *et al.*, 1994); estos materiales se caracterizan por tener la totalidad de su carga interlaminar asociada a la sustitución isomórfica en las láminas octaédricas, así como el hecho de que los grupos -OH octaédricos son sustituidos por F<sup>-</sup>. Lo anterior permite la intercalación de iones fácilmente hidratables como el Na<sup>+</sup>, cuya disposición en el espacio interlaminar provee las condiciones apropiadas

para la intercalación de polioxocaciones inorgánicas voluminosos basados en Al, Zr y Ga entre otros, siendo el más estudiado sin duda el de Al (Al<sub>13</sub><sup>7+</sup>) (J.Y. Bottero *et al.*, 1980; F. Figueras, 1988; M.L. Ocelli *et al.*, 2000).

K. Hashimoto y N. Toukai (1999) han logrado ingresar y estabilizar finas partículas de alúmina en una TSM en su forma potásica “no-expandible” (K<sup>+</sup>/TSM), optimizando de esa manera su acidez y por ende su actividad catalítica en la reacción de deshidratación de *tert*-butanol. F.J. Del Rey Pérez Caballero y G. Poncellet (2000), sintetizaron por primera vez una vermiculita completamente expandida con pilares de aluminio ( $d_{001}=18\text{Å}$ ), obteniendo un material con propiedades texturales características de arcillas exitosamente pilarizadas con aluminio (Al-PILCs), estabilidad térmica hasta 800°C y una acidez tipo Brønsted que duplica el valor de una saponita Al-pilarizada. Estos resultados plantean la posibilidad de obtener Al-PILCs a partir de materiales con carga interlaminar aún más elevada que la de las vermiculitas, como es el caso de las micas naturales.

El propósito del presente trabajo es evaluar el efecto de la carga interlaminar de arcillas naturales tipo 2: 1 como materiales de partida, en la modificación por intercalación - pilarización con el polication tipo Keggin (Al<sub>13</sub>O<sub>4</sub>(OH)<sub>24</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>12</sub>)<sup>7+</sup>.

## Parte experimental

### 1. Materiales

En el presente estudio se emplearon dos esmectitas de diferente naturaleza y origen: una montmorillonita colombiana de la región del Valle del Cauca (CM) sobre la cual J.A. Pinzón y J. Requena (1996) realizaron estudios de caracterización mineralógica y fisicoquímica; una saponita española (Esmectita de Yuncillos, YS) proporcionada por Tolsa S.A., Madrid, la cual fue caracterizada previamente por S. Moreno *et al.* (1996); y un material colombiano tipo mica (MK), originario de San Vicente del Caguán-Departamento del Caquetá, el cual presenta alta cristalinidad, pero cuya composición y características químico-mineralógicas aún no han sido establecidas, según la información personal proporcionada por los responsables del inventario mi-

nero nacional en INGEOMINAS, al igual que la que aparece en las fuentes bibliográficas disponibles (J.V. Mutis, 1983; Recursos Minerales de Colombia, 1987; Directorio Minero de Colombia MININCO, 1998).

Pequeñas cantidades de cuarzo y feldespato (<5% en cada caso) fueron detectadas en la montmorillonita (J.A. Pinzón, 1996). En el caso de la mica cruda (MK), se estimó la composición por espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS), la cual se compara en la Tabla 1 con los valores de las esmectitas expresados en su forma de óxidos.

El proceso de pilarización se efectuó sobre fracciones con tamaño de partícula <2µm, las cuales fueron obtenidas por sedimentación siguiendo la Ley de Stokes. Para el material tipo mica, la modificación se probó adicionalmente sobre la fracción recolectada luego de tamizar a malla 60 (muestra MK). En este trabajo se referirá la fracción con tamaños de partícula menores a 2µm de la mica como MNa, teniendo en cuenta que el tratamiento de separación por tamaño de partícula incluye la homoionización previa de los materiales por intercambio catiónico repetido con solución de NaCl 1M.

**Tabla 1.** Composición química de arcillas crudas (%p/p)

Muestra	CM	YS	MK <sup>a</sup>
SiO <sub>2</sub>	56,6	55,3	47,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,0	5,40	27,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,60	1,43	1,55 <sup>b</sup>
MgO	2,40	25,2	1,62
TiO <sub>2</sub>	0,84	0,15	-----
CaO	1,22	0,41	-----
Na <sub>2</sub> O	2,96	0,75	-----
K <sub>2</sub> O	0,79	0,30	11,4
Li <sub>2</sub> O	-----	-----	10,2

a. Determinado sobre la arcilla cruda

b. Fe total asumido como Fe<sup>3+</sup>

## 2. Método de pilarización

Las arcillas pilarizadas con Al se prepararon empleando solución 0,1M de Al-chlorhydrol (Reheis Chem. Co., Ireland<sup>®</sup>), con relación de hidrólisis OH/Al = 2,4, envejecidas durante 2h a 60°C. Volúmenes apropiados de esta solución fueron adicionados muy lentamente a suspensiones (2% p/v) del respectivo material de partida en agua desionizada, para proporcionar 20meq Al/g arcilla (A. Schutz *et al.*, 1987). Las suspensiones resultantes fueron

agitadas a 80°C durante 2h y luego dejadas en reposo por 12h. Los sólidos así obtenidos fueron lavados por diálisis hasta que la conductividad del agua de lavado descendió por debajo de 25µS/cm y por último, secados a 60°C.

## 3. Métodos de caracterización

La composición química de la mica cruda MK se determinó por XPS (Tabla 1), gracias a que su alto grado de orden estructural, previamente establecido por difracción de rayos X (DRX) en polvo, posibilita la aproximación de que la composición química en la superficie del material sea representativa de la totalidad del mismo. De igual manera, el espesor de análisis ( $\lambda$  (nm)) para la mayoría de los elementos, corresponde al espesor de lámina de la arcilla, permitiendo aproximar el resultado del análisis de superficie, a un análisis de la masa del sólido. Las relaciones atómicas fueron corregidas con los factores de sensibilidad del instrumento.

Los patrones de DRX fueron obtenidos con un instrumento Philips 1500 provisto con un anticátodo de Cu y filtros de Ni, sobre las muestras previamente secadas a temperatura ambiente o calcinadas durante 2h a diferentes temperaturas. Para los materiales modificados se adoptó la técnica de placa orientada. El cambio en los valores  $d_{001}$  como función de la temperatura de calcinación del material, proporciona una apreciación directa acerca de la estabilidad térmica de las especies intercaladas en los sólidos de partida.

La modificación por intercalación – pilarización involucra el intercambio de los cationes que originalmente neutralizan la carga de la estructura, por oligómeros (Al<sub>x</sub>(OH)<sub>y</sub>), por lo que una determinación de la capacidad de intercambio catiónico residual (CICres) de los sólidos modificados, proporciona un indicativo aproximado de la eficiencia del intercambio iónico. Los valores de CIC inicial y residual de los materiales (antes y después de la modificación respectivamente), se determinaron por análisis micro-Kjeldahl sobre las muestras previamente intercambiadas con solución 2M de acetato de amonio.

El contenido ácido de los sólidos se determinó por adsorción isotérmica de amoníaco (flujo = 5mL/min) a 150°C, seguida por desorción entre 150 – 400°C (rampa de 7°C/min) y tratamiento isotérmico a 400°C/12h sobre muestras previamente tratadas a 400°C/2h con 5mL/min de N<sub>2</sub>. Empleando este procedimiento, se asumirá que cada mmol de amoníaco corresponde a un mmol de H<sup>+</sup> en el sólido.

Las características texturales (área superficial y volumen de microporos) fueron obtenidas a partir de isothermas de

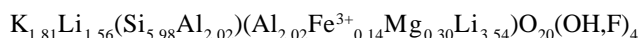
adsorción de  $N_2$  a la temperatura del nitrógeno líquido, empleando un sorptómetro Autosorb 1 de Quatromen Corporation®. Las muestras fueron desgasificadas a 300°C/8h. La superficie externa así como los volúmenes de microporo fueron determinados por medio del método propuesto por **M.J. Remy et al. (1996)**, para arcillas modificadas.

Los materiales modificados se denotan en adelante con el prefijo AIP- antecediendo la denominación abreviada correspondiente a cada material de partida.

## Resultados y discusión

### 1. Análisis químico de la muestra MK

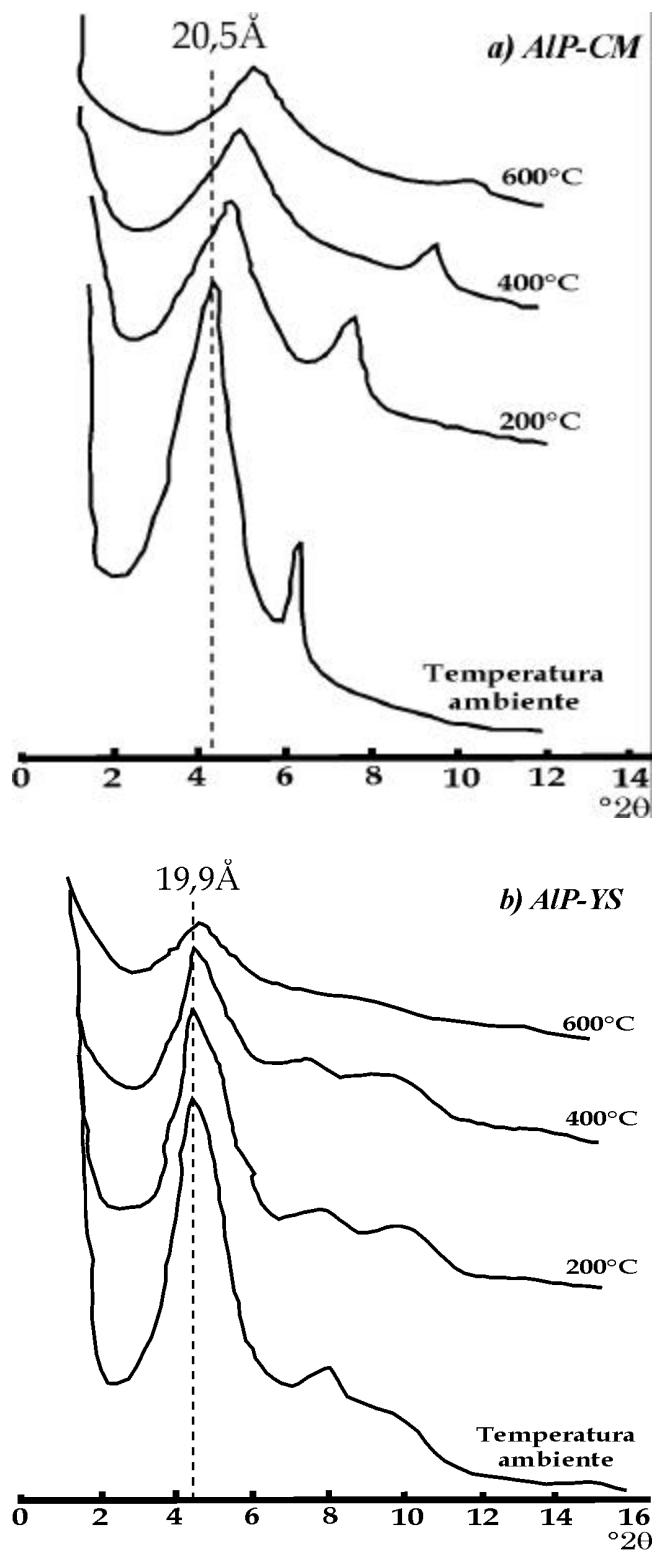
Aplicando el método propuesto por **D.C. Bain et al. (1995)** sobre los datos de XPS, la fórmula estructural tentativa para la mica natural MK sería:



Comparando la composición de litiomicas con diferentes cantidades de litio (desde litiomoscovitas a polilitionita) reportadas en literatura (**M.D. Foster et al., 1960**; **A.C.D. Newman et al., 1987**) con la obtenida para la muestra MK, la cantidad de Li parece anormalmente elevada, ya que proporciones tan grandes solo podrían estar acompañadas de una cantidad significativamente menor de Al. Desde un punto de vista analítico, el análisis por XPS es propenso a producir un resultado menos preciso para el litio ya que su factor de respuesta es diez veces menor que para el aluminio; en este caso además, el área del pico obtenida para el litio fue ocho veces menor que la del aluminio. En consecuencia, se puede suponer que la concentración de Li en este material fue sobreestimada por la técnica empleada en cuyo caso, los porcentajes atómicos de Si y Al en la muestra serían mayores, y el contenido de Li estaría preferiblemente asociado a las láminas octaédricas del material. De esta manera se puede considerar que la presencia de Li en la región interlaminar del

**Tabla 2.** Espaciados basales y anchos de pico a altura media (hhpw) como función de la temperatura de calcinación

Temperatura (°C)	AIP-CM		AIP-YS		AIP-MNa	
	$d_{001}$ (Å)	hhpw (°2θ)	$d_{001}$ (Å)	hhpw (°2θ)	$d_{001}$ (Å)	hhpw (°2θ)
Ambiente	20,5	1,90	19,9	1,50	10,0	0,15
200	18,7	1,50	19,0	1,30	-----	-----
400	18,3	1,60	18,0	1,40	10,1	0,15
600	17,1	2,50	16,7	1,40	-----	-----



**Gráfica 1.** Patrones DRX para las esmectitas modificadas, tratadas a diferentes temperaturas

material es despreciable y el sólido MK, puede corresponder a un mineral tipo lepidolita con alto grado de sustitución isomórfica tetraédrica de Si por Al, responsable mayoritaria de la carga interlamina del mismo. Otra característica sobresaliente de este material es un alto contenido de potasio como catión de compensación, tal como se puede deducir a partir de los resultados obtenidos por DRX-polvo, los cuales presentan buena concordancia con la base de datos DRX-polvo de ASTM para este tipo de materiales (L.A. Galeano, 2000).

## 2. Análisis por difracción de rayos X

Los valores  $d_{001}$  así como los anchos de pico a altura media (hhpw) observados luego de la calcinación de los sólidos intercalados a diferentes temperaturas se muestran en la tabla 2. La distancia interlamina  $d_{001}$  para las esmectitas (AIP-CM, AIP-YS), corresponde con los valores típicamente reportados para arcillas exitosamente modificadas por pilarización (M.J. Remy *et al.* 1996). En el caso de la arcilla AIP-MNa, no se encuentra un valor que permita inferir la formación de pilares. Este comportamiento evidencia la gran dificultad que existe para modificar las arcillas, en la medida en que la carga interlamina promedio por celda unitaria se incrementa por encima de cierto valor. De otro lado, se puede observar que para AIP-CM y AIP-YS calcinados a 600°C la estructura permanece pilarizada, pero su espaciado interlamina decrece en la medida en que se incrementa la temperatura de calcinación (Figura 1), y tal efecto es aparentemente más acentuado para la montmorillonita. El hhpw para la reflexión del plano 001 proporciona un estimativo acerca de la "calidad" de los pilares estabilizados en la estructura (R.A. Schoonheydt *et al.*, 1993). En la Tabla 2, se puede observar que la AIP-saponita muestra menores valores hhpw que la AIP-montmorillonita independiente de la temperatura de calcinación, lo cual indica un mejor orden de apilamiento en la dirección cristalográfica  $c$ , asociado a una distribución aparentemente más homogénea de los pilares en la saponita.

## 3. Capacidad de intercambio catiónico inicial (CIC) y residual (CICres)

La capacidad de intercambio catiónico residual de los materiales modificados provee un estimativo de la carga interlamina de las arcillas que no ha sido compensada con especies de Al cargadas positivamente (pilares u oligómeros). En la Tabla 3, se muestran los valores CIC y la fracción de carga que ha sido compensada por intercalación de policationes de aluminio en todos los sólidos. Valores menores obtenidos para los materiales crudos respecto a los separados por tamaño de partícula (no muestra-

do), reflejan la contribución de las fases contaminantes en los primeros. Naturalmente en todos los casos, las muestras modificadas presentaron menores valores de CIC respecto a las muestras crudas, lo cual confirma que los materiales han intercambiado parte de sus cationes de compensación originales por aluminio, y que éste ha ocupado posiciones fijas en la estructura (entre las láminas). En el caso de las esmectitas, fueron obtenidos valores muy similares para AIP-CM y AIP-YS, lo cual indica que la cantidad de aluminio estabilizado en cada caso, es muy probablemente equivalente.

En el caso de los materiales tipo mica, los resultados indican una mejor compensación de carga en la muestra MNa que en la muestra MK (simplemente tamizada), lo cual evidencia la importancia de partir de la forma homioónica de los materiales en el tratamiento de intercalación. Por último, los valores de CIC muestran una gran diferencia entre los materiales tipo esmectita y el material tipo mica, donde el contenido de potasio como catión de compensación, teniendo en cuenta su estado no solvatado y su localización muy específica en los espacios estructurales de la lámina tetraédrica, mantiene "cerrada" la estructura limitando seriamente el intercambio catiónico.

## 4. Contenido ácido de los materiales

Los contenidos ácidos calculados a partir de la adsorción isotérmica de amoníaco a 150°C y su posterior desorción entre 150°C y 400°C se comparan en la Tabla 3. Se puede notar que las arcillas modificadas en general muestran mayor acidez que sus respectivas muestras crudas. Esto evidencia el efecto positivo que tiene el proceso de modificación sobre ciertas características particu-

**Tabla 3.** Capacidad de intercambio catiónico (CIC), fracción de carga compensada y contenido ácido (desorción de  $\text{NH}_3$ ) de las arcillas

Muestra	CIC (meq/100g)	Fracción de Carga Compensada	Desorción de $\text{NH}_3$ (meq H <sup>+</sup> /100g)
CM	54	-----	13
AIP-CM	10	0,81	24
YS	57	-----	30
AIP-YS	13	0,77	40
MK	31	-----	35
AIP-MK	22	0,30	33
MNa	59	-----	34
AIP-MNa	27	0,54	63

lares de los sólidos con el propósito por ejemplo, de optimizar su actividad en reacciones de catálisis ácida. De igual manera, parece evidente que un alto grado de sustitución isomórfica tetraédrica Al/Si, correlaciona directamente con el contenido ácido de estos materiales, ya que mientras tal tipo de sustitución se incrementa en el material de partida en el orden  $CM < YS < MK$ , un mayor número de sitios protónicos son susceptibles a ser titulados por la molécula sonda ( $NH_3$ ) en el material modificado. Como se ha indicado en estudios previos (S. Chevalier *et al.*, 1994; S. Moreno *et al.*, 1997), el ataque protónico a enlaces tetraédricos Si-O-Al genera grupos silanol (Si-OH—Al) térmicamente estables, cuyo carácter ácido ha sido evidenciado por adsorción de piridina. Lo anterior sugiere que la acidez es mayor para las arcillas trioctaédricas (YS, MK) respecto a las dioctaédricas, puesto que la sustitución isomórfica octaédrica que prevalece en estas últimas, genera menos sitios ácidos y posiblemente menos fuertes. Finalmente, sobresale el valor del contenido ácido para AIP-MNa (63meq./100g), significativamente mayor a los obtenidos para los otros sólidos. Las propiedades ácidas de este material podrían ser interesantes para aplicaciones catalíticas, aunque otras características como el patrón de difracción de rayos X no evidencie claramente que la modificación por intercalación - pilarización haya logrado expandir la estructura.

### 5. Características texturales

Las características texturales obtenidas a partir de isotermas de adsorción – desorción de nitrógeno se resumen en la Tabla 4. El tipo de precursor de pilarización empleado, la carga de pilares y la naturaleza de la arcilla tienen un impacto sobre el tamaño y distribución de tamaño de poro, determinando la microporosidad del sólido (A. Gil *et al.*, 2000; Z. Ding *et al.*, 2001; Klopogge, J. T. 1998; A. Gil *et al.*, 2003). La macro- y mesoporosidad por su parte, se ven afectadas principalmente por el méto-

do de lavado y secado empleado en la obtención de las PILCs. Como se ha demostrado, existe una mayor capacidad de adsorción sobre las muestras pilarizadas que sobre las crudas (A. Molinard, 1994; P. Salerno *et al.*, 2001).

El incremento en la superficie específica BET ( $S_{BET}$ ) para las esmectitas después de la modificación, se puede atribuir preferencialmente a la formación de microporos, mientras que para las muestras tipo mica, éste se debe a la generación de superficie externa ( $S_{BET\ ext}$ ). Por su parte, el área superficial de la muestra MNa no se afecta por el tratamiento de modificación y probablemente su alta  $S_{BET}$  respecto a la de MK, obedece exclusivamente a sus diferencias en tamaño de partícula. En ambos materiales AIP-MK y AIP-MNa, los volúmenes de microporo tan bajos sugieren que los oligómeros de aluminio, durante el proceso de intercalación dado su alto impedimento para migrar hacia el interior de la región interlamina, se dispusieron mayoritariamente en muy pequeñas partículas de alúmina, vinculadas a la superficie externa de los materiales, produciendo sólidos con porosidad (meso y macro) similar a la de los materiales de partida. Respecto a las esmectitas modificadas, es de resaltar la mayor microporosidad generada sobre la saponita en comparación con la montmorillonita lo que confirma, al menos en parte, la mayor homogeneidad en la distribución del Al dentro de las láminas de saponita, lo cual fue igualmente señalado en el análisis DRX.

### Conclusiones

Los resultados del presente trabajo establecen que la expandibilidad de aluminosilicatos tipo 2: 1 se ve afectada fuertemente por la magnitud y localización de la sustitución isomórfica del material. Por un lado, aparentemente a mayor grado de sustitución isomórfica tetraédrica Al/Si, se logra una mayor especificidad en la interacción final pilar-estructura, y dentro de un rango de cargas interlaminares moderado, la modificación por intercalación - pilarización de arcillas trioctaédricas produce sólidos con mejores características texturales y sitios ácidos más abundantes y probablemente más fuertes que sus equivalentes dioctaédricas. Sin embargo, cuando se trata de expandir materiales con carga interlaminares elevada, se observa una gran dificultad para llevar a cabo el proceso de intercambio catiónico y generar la inserción de especies oligoméricas de aluminio.

Por otra parte, es interesante el fuerte incremento en el contenido ácido de la mica modificada (casi 60% más alto que el observado en una saponita totalmente expandida) cuando se practica homoionización con Na y sepa-

Tabla 4. Propiedades texturales de arcillas.

Muestra	$S_{BET}$ ( $m^2/g$ )	$S_{BET\ ext}$ ( $m^2/g$ )	$V_{poro}$ ( $cm^3/g$ )
CM	56	48	0,004
AIP-CM	118	18	0,053
YS	138	97	0,020
AIP-YS	212	51	0,084
MK	4	4	0,000
AIP-MK	25	20	0,003
MNa	51	47	0,002
AIP-MNa	52	47	0,003

ración por tamaño de partícula antes del proceso de intercambio, lo que sugiere que en el material modificado, tiene lugar una disposición morfológica significativamente diferente a la de la estructura de partida. De esta forma, el material AIP-MNa podría resultar un catalizador ácido apropiado en reacciones en donde el tamaño molecular de reactivos y productos sea lo suficientemente pequeño, para lograr que los problemas difusionales no limiten significativamente la reacción.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la VRI-DIB de la Universidad Nacional de Colombia, proyectos Códigos 20201008671 y 20201007579, y a la Vicerrectoría de Investigaciones (VIPRI) de la Universidad de Nariño, por el soporte financiero para esta investigación.

### Bibliografía

- Bain D.C. & Smith B.F.L.** 1995. Chemical analysis of clay minerals in clay mineralogy. Capítulo 8 en: Spectroscopic and chemical determinative methods. Editado por M.J. Wilson, Chapman & Hall, London.
- Bottero J.Y., Cases J.M., Fiessinger F. & Poirier J.E.** 1980. Studies of hydrolyzed aluminum chloride solutions I. Nature of aluminum species and composition of aqueous solutions, *J. Phys. Chem. A* **84**: 2933-2939.
- Carvalho A.P., Martins A., Silva J.M., Pires J., Vasques H. & Brotas de Carvalho M.** 2003. Characterization of the acidity of Al- and Zr- pillared clays, *Clays Clay Miner.* **5**(3): 340-349.
- Chevalier S., Frank R., Lambert J.F., Barthomeuf D. & Suquet H.** 1994. Characterization of the porous structure and cracking activity of Al-pillared saponites, *Appl. Catal., A* **110**(2): 153-165.
- Del Rey-Perez-Caballero F.J. & Poncelet G.** 2000. Microporous 18Å Al-pillared vermiculites: preparation and characterization, *Microporous Mesoporous Mater.* **37**(3): 313-327.
- Ding, Z.; Klopogge, J. T., Frost, R., Lu, G. & Zhu, H.** 2001. Porous Clays and Pillared Clays-Based Catalyst. Part 2: A Review of the Catalytic and Molecular Sieve Applications. *Journal of Porous Materials.* **8**: 273-293.
- Directorio Minero de Colombia MININCO.** 1998. Cámara de Comercio, Bogotá.
- Figueras F.** 1988. Pillared clays as catalysts, *Catal. Rev. – Sci. Eng.* **30**(3): 457-499.
- Foster M.D., Bryant B. y Hathaway J.** 1960. Iron-rich muscovite mica from The Grandfather Mountain area, North Carolina, *Amer. Miner.* **45**: 839-851.
- Galeano L.A.** 2000. Modificación y caracterización de mica colombiana y su evaluación catalítica en reacciones ácidas. Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia.
- Gil A.; Gandía, L. & Vicente, M. A.** 2000. Recent advances in the synthesis and catalytic applications of pillared clays. *Catalysis Reviews-Science and Engineering.* **42**: 145-212.
- Gil A. & Gandía, L. M.** 2003. Microstructure and quantitative estimation of the micropore-size distribution of a alumina-pillared clay from nitrogen adsorption at 77K and carbon dioxide adsorption at 273K. *Chemical Engineering Science,* **58**, 3059-3075.
- Hashimoto K. & Toukai N.** 1999. Non-expanding mica incorporating alumina in the interlayer regions: A new preparation technique of fine particles of alumina, *J. Mol. Catal. A: Chem.,* **138**: 59-66.
- Johnson J.W., Brody J.F., Alexander R.M., Yacullo L.N. & Klein C.F.** 1993. Zirconia-pillared tetrasilicic fluoromicas, *Chem. Mater.* **5**(1): 36-42.
- Kerby M.C., Riley K.L., Long F.M., Jhonson J.W. & Brody J.F.** 1994. Exxon Research and Engineering Company. Pillared Micac, Estados Unidos, Patente No. 5,340,657.
- Klopogge, J. T.** 1998. Synthesis of smectites and porous pillared clay catalysts: A review. *Journal of Porous Materials.* **5**: 5-41.
- Molina R., Schutz A. & Poncelet G.** 1994. Transformation of m-xylene over Al-pillared clays and Ultrastable Zeolite Y, *J. Catal.* **145**(1): 79-85.
- Molinard A.** 1994. Physicochemical and gas adsorption properties of ion exchanged Alumina Pillared Clays. Tesis doctoral, Antwerpen University (Belgium).
- Moreno S., Sun Kou R. & Poncelet G.** 1996. Hydroconversion of heptane over Pt/Al-pillared montmorillonites and saponites. A comparative study, *J. Catal.* **162**: 198-208.
- Moreno S., Sun Kou R. & Poncelet G.** 1997. Influence of preparation variables on the structural, textural, and catalytic properties of Al-pillared smectites, *J. Phys. Chem. B* **101**(9): 1569-1578.
- Mutis M.A.** 1983. Catálogo de los yacimientos, prospectos y manifestaciones minerales en Colombia. *Publ. Geol. Esp., Ingeominas* No. 13.
- Newman A.C.D. & Brown G.** 1987. The chemical constitution of clays en *Chemistry of clays and clay minerals.* Editado por A.C.D. Newman, Mineralogical Society – Monograph No 6, London. 48-81.
- Ocelli M.L., Bertrand J.A., Gould S.A. & Dominguez J.M.** 2000. Physicochemical characterization of a Texas montmorillonite pillared with polyoxocations of aluminum; part I: The microporous structure, *Microporous Mesoporous Mater.* **34**: 195-206.
- Pinzón J.A. & Requena J.** 1996. Caracterización y estudio reológico de una bentonita colombiana, *Boletín Soc. Esp. Ceram. y Vidrio* **35**(5): 337-344.
- Recursos Minerales de Colombia.** 1987. *Publ. Geol. Esp., Ingeominas* No. 1, 2° ed., Bogotá.
- Remy M.J., Vieira-Coelho A. & Poncelet G.** 1996. Surface area and microporosity of 1.8nm pillared clays from the nitrogen adsorption isotherms, *Microporous Mater.* **7**: 287-297.

**Salerno P., Asenjo M.B. & Mendioroz S.** 2001. Influence of preparation method on thermal stability and acidity of Al – PILCs, *Thermochim. Acta* **379**: 101-109.

**Schoonheydt R.A., Van den Eynde J., Tubbax H., Leeman H., Stuyckens M., Lenotte I. & Stone W.E.E.** 1993. The aluminum pillaring of clays: Part I, *Clays Clay Miner.* **41**(5): 598-607.

**Schutz A., Stone W.E., Poncelet G. & Fripiat J.J.** 1987. Preparation and characterization of bidimensional zeolite structures

obtained from synthetic beidellite and hydroxy-aluminum solutions, *Clays Clay Miner.* **35**(4): 251-261.

**Vieira-Coelho A. & Poncelet G.** 1991. Gallium, aluminum and mixed gallium-aluminum pillared montmorillonite: Preparation and characterization, *Appl. Catal., A* **77**(2): 303-314.

Recibido: agosto 14 de 2006

Aceptado para su publicación: diciembre 17 de 2007



# ESTUDIO DE LAS REACCIONES DE HIDRÓLISIS Y CONDENSACIÓN DEL TITANIO EN PRESENCIA DE ACETILACETONA

Por

A.M. Guzmán<sup>1</sup>, A.M. Fernández<sup>1</sup>, Y. Franco<sup>1</sup>, J.H. Bautista<sup>2</sup> & J.E. Rodríguez Páez<sup>1</sup>

## Resumen

**Guzmán A. M., A. M. Fernández, Y. Franco, J. H. Bautista & J.E. Rodríguez Páez:** Estudio de las reacciones de hidrólisis y condensación del titanio en presencia de acetilacetona. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(121): 529-536, 2007. ISSN 0370-3908.

El óxido de titanio,  $TiO_2$ , es un óxido de gran interés tecnológico. Se utiliza como pigmento, fotocatalizador, varistor y en los últimos años nanopartículas de  $TiO_2$  son usadas para la purificación de agua. En este trabajo se utilizó la técnica sol-gel para obtener soles de titanio. Para ello se usó como precursor de titanio el Tetrabutóxido de Titanio (TBT) y para controlar la velocidad de hidrólisis del TBT se adicionó a la solución Acetilacetona como acomplejante. Para estudiar las reacciones de hidrólisis y condensación en el sistema TBT- Acac-EtOH- $H_2O$  se utilizó espectroscopia Infrarroja de Fourier (FTIR) y espectroscopia UV-visible y se midió la viscosidad del sol y su evolución en el tiempo para conocer el desarrollo de las reacciones de hidrólisis y policondensación en el sistema y el punto de gelificación del mismo.

**Palabras clave:** sol-gel, reacción de hidrólisis, reacción de condensación, AcacH.

## Abstract

Titanium dioxide,  $TiO_2$ , is a compound with high technological importance.  $TiO_2$  is used as pigment, photocatalyst and varistor. In the last years  $TiO_2$  nanoparticles have been used for the photocatalytic degradation of organic pollutants in water. In this work  $TiO_2$  sols were obtained using Sol-gel technology. Titanium (IV) butoxide, TBT, was used as Ti precursor. The hydrolysis rate of TBT was controlled by adding acetyl acetone (Acac) to the system. Acac was used as complexing agent. The evolution of the system was studied following the hydrolysis and polycondensation reactions by means of infrared (FTIR) and UV- visible spectroscopies and viscosity measurements.

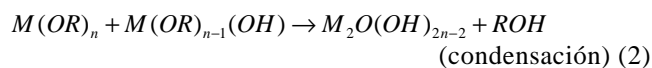
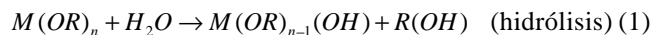
**Key words:** sol-gel, hydrolysis reaction, condensation reaction, AcacH.

<sup>1</sup> Grupo CYTEMAC. Departamento de Física – FACNED, Universidad del Cauca – Calle 5 N°4-70 / Popayán – Cauca.

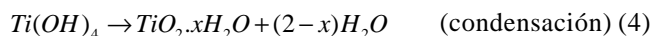
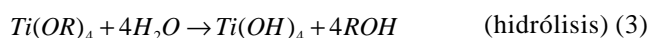
<sup>2</sup> Grupo de superficies, electroquímica y corrosión – UPTC / Tunja – Boyacá.

## Introducción

El método sol-gel se ha constituido en un proceso muy promisorio para la manufactura de vidrios y cerámicos (Brinker C. J. *et al.* 1990, Pierre A. C. 2002, Jolivet J. 2000). Este método ha generado gran interés científico y tecnológico y su futuro empleo dependerá de la posibilidad de fabricar mejores materiales o productos completamente nuevos (Hench L. L. *et al.* 1986, Klein L. C. 1988); esto exige un mayor conocimiento de los fenómenos fisicoquímicos que ocurren durante el proceso. El método sol-gel involucra el uso de precursores moleculares, principalmente alcóxidos metálicos (Bradley D. C. *et al.* 1978), los cuales permiten la obtención de redes macromoleculares que contienen oxígenos, a través de reacciones de hidrólisis y condensación que se pueden expresar esquemáticamente así (Brinker C. J. *et al.* 1990, Jolivet J. 2000, Pierre A. C. 2002):



Recientemente, el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) ha despertado gran interés por su alta actividad fotocatalítica que lo hace apto para diversas aplicaciones. El método normalmente empleado para sintetizar el TiO<sub>2</sub> es el proceso sol-gel debido a sus diversas ventajas (Kato K. *et al.* 1994, Cernigoy U. *et al.* 2006). En sus reacciones de hidrólisis y condensación, los alcóxidos de titanio cumplen la regla general indicada en las ecuaciones (1) y (2), tal que (Vorkapic D. *et al.* 1998):



Los grupos alcoxi utilizados más frecuentemente en la síntesis del TiO<sub>2</sub> contienen desde 2 (etóxido) hasta 4 (butóxido) átomos de carbono y su reactividad durante la hidrólisis decrece si se incrementa la longitud de la cadena. Aún así, la hidrólisis en la presencia de exceso de agua es rápida y exotérmica, y se completa en pocos segundos (Pierre A. C. 2002). Para moderar esta alta reactividad, los alcóxidos son usualmente diluidos en alcohol, previo a mezclados con el agua o se adicionan acomplejantes al sistema.

Una particularidad del titanio es que tres de sus precursores: el etóxido,  $Ti(OC_2H_5)_4$ , el isopropóxido,  $Ti(OC_3H_7)_4$ , y el butóxido,  $Ti(OC_4H_9)_4$ , forman complejos tipo peróxido que en solución generan un color naranja profundo. El  $Ti(O_2)(OH)_{acu}(OC_2H_5)$  es un ejemplo

de estos complejos pero el mecanismo que conduce a su formación aún no está muy bien entendido (Pierre A. C. 2002).

Por otro lado, el catión  $Ti^{4+}$  experimenta en soluciones acuosas hidrólisis a bajos valores de pH, formando complejos hidroxilo tales como  $Ti(OH)_2^{2+}$  y  $Ti(OH)_3^+$  (Otterstedt J. *et al.* 1998), complejos que existen a pH < 3. Además, la solubilidad del  $Ti(OH)_4$  es muy baja por encima de pH 2 y no se han encontrado policondensationes del  $Ti^{4+}$  debido, posiblemente, a que es muy difícil identificar tales especies en soluciones fuertemente ácidas.

A pesar de lo mencionado, una revisión de la literatura sobre el método sol-gel indica que la química del proceso real nunca es tan simple como se ha indicado hasta el momento. Es muy frecuente el uso de aditivos con el objetivo de mejorar el proceso y obtener mejores materiales. Algunos de los aditivos, como el ácido acético y la acetilacetona, reaccionan químicamente a nivel molecular con los alcóxidos, dando origen a nuevos precursores moleculares (Doeuff S. *et al.* 1987, Rodríguez J. E. *et al.* 2004), y es por esto que los procesos de hidrólisis y condensación generales se modifican. La reacción química de los alcóxidos en general (Bradley D. C. *et al.* 1978), y con los aditivos mencionados en particular, ha sido ampliamente estudiada pero se requiere más información sobre el efecto de estos aditivos en el proceso sol-gel (Doeuff S. *et al.* 1987, Sánchez A. *et al.* 1988).

En este trabajo se estudió el efecto sobre las reacciones de hidrólisis y condensación del tetrabutóxido de titanio por la incorporación de acetilacetona a la solución. Para ello se midió la variación de la viscosidad del sistema con el tiempo y se utilizaron las espectroscopias infrarroja y UV-visible para conocer la evolución de la suspensión coloidal durante su envejecimiento.

## Procedimiento experimental

### 1. Obtención de soles estables de Titanio

Soles estables de TiO<sub>2</sub> se obtuvieron a través de las reacciones de hidrólisis y policondensación del Tetrabutóxido de Titanio (TBT),  $Ti(OBu)_4$ —Aldrich, mezclándolo con Alcohol Etilico (Mallinckrodt), Acetilacetona-AcacH (J. T. Baker), y agua; el AcacH se adicionó al sistema para controlar la velocidad de hidrólisis del TBT. Para conformar el sol, inicialmente se mezcló el etanol con la AcacH, en continua agitación, durante 20 minutos, para garantizar la homogeneidad del sistema. A la mezcla se le adicionó el TBT de forma rápida para evitar que el precursor de titanio se hidrolizara al entrar en contacto con el medio ambiente.

Posteriormente, la solución obtenida se mantuvo en agitación continua, durante 40 minutos, al terminó de los cuales se adicionó el agua, manteniéndose el sistema en agitación continua, durante 120 minutos adicionales; esta fue la metodología que se utilizó para conformar el sol de titanio que se analizó.

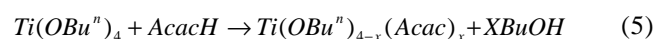
En la tabla 1 se indican las concentraciones molares de los diferentes reactivos utilizados para conformar los soles de titanio, considerando diferentes relaciones Ti/Acac en 50 mL de solución.

## 2. Caracterización

Para estudiar la evolución de los soles conformados se utilizó espectroscopia infrarroja (FTIR). Para ello se determinaron los grupos funcionales presentes en el sistema y como ellos evolucionaban con el tiempo durante el avance de las reacciones de hidrólisis y condensación; para este estudio se empleó un Espectrómetro Thermo electrón corporation – IR 200. La muestra de sol se mezcló con KBr, marca Fishew Scientifics grado espectroscópico, para conformar la pastilla que se colocó en el equipo. De forma similar se procedió con cada una de las muestras para realizar el seguimiento de los sistemas de interés, con diferente relación molar Ti/AcacH y que presentaban diferentes tonalidades de amarillo. Esta última característica fue la que motivó el uso de la espectroscopia UV-visible (equipo UV-visible Intralab DMS100) para hacerle seguimiento al sistema. En diferentes instantes del proceso se tomaron muestras del sol, que se depositaron en el interior de una celda de cuarzo, la cual se colocó en el portamuestra del equipo para obtener su espectro correspondiente. Otro parámetro que se analizó fue la viscosidad de cada uno de los soles y su variación con el tiempo. Para ello se usó un viscosímetro capilar, Cannon – Frenske, calibrado bajo la norma ASTM D 445. Estas técnicas de caracterización permitieron conocer el avance de las reacciones de hidrólisis y condensación en los sistemas de interés y su posterior gelificación.

## Resultados y discusión

La adición del AcacH al sistema TBT- alcohol -H<sub>2</sub>O permitió reducir la velocidad de hidrólisis del alcóxido de titanio y evitó la formación de un precipitado en la solución. La reacción que ocurre entre el TBT y la AcacH se puede expresar de la siguiente manera (Rodríguez – Páez J. E. *et al.* 2004):



favoreciéndose la formación de un nuevo complejo de titanio más estable.

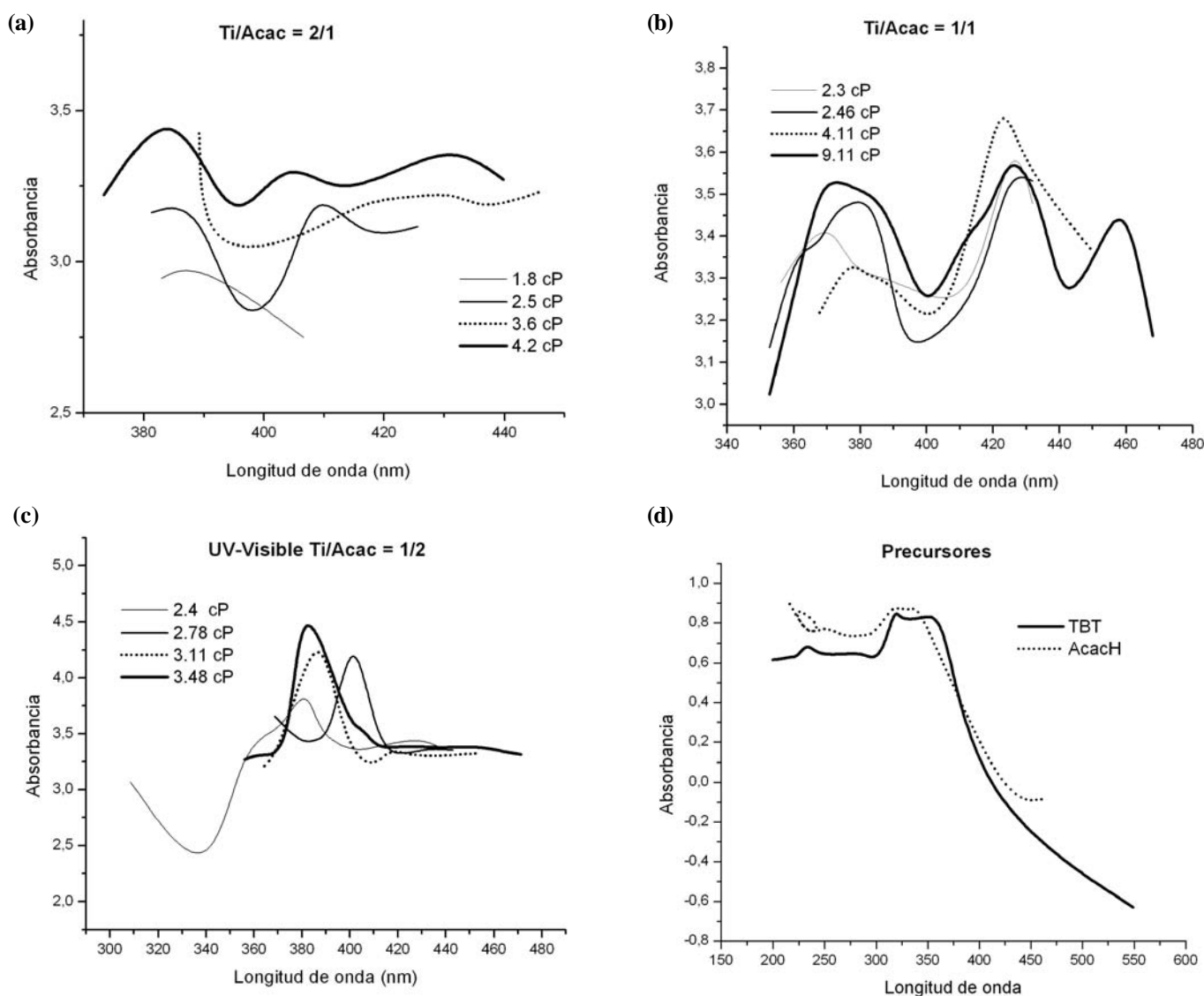
Los sistemas con relaciones [Ti/Acac] de  $1/1$  y  $2/1$  no presentaron precipitación, mientras que en el sistema con  $r_c = 1/2$  un precipitado apareció a los cuatro días de su preparación indicando que, aunque el AcacH redujo la velocidad de hidrólisis del TBT, la cantidad que se adicionó de este acomplejante alteró las reacciones que ocurrieron al interior del sistema. En general, la hidrólisis y la condensación de los alcóxidos de titanio son controladas, principalmente, por dos parámetros: la concentración de los reactivos de partida y la razón de hidrólisis ( $r_w = [H_2O]/[Ti]$ ) (Pierre A. C. 2002). Estos dos factores no solo modifican las velocidades de las reacciones sino que también cambian el grado de hidrólisis de los complejos que se forman en el sistema. Por otro lado, dependiendo de la relación molar [Ti/Acac], se observaron cambios de coloración en el sistema desde una suave tonalidad amarilla, para una alta concentración de titanio frente al AcacH, a un amarillo intenso para sistemas con baja concentración de titanio; la coloración que adquieren las suspensiones coloidales se puede deber a la transferencia de carga del ligando Acac al ión Ti<sup>4+</sup> (Livage J. 1986). Además, se pudo apreciar en los diferentes sistemas un cambio de coloración durante el envejecimiento, observándose una intensificación en la tonalidad amarilla. Estas observaciones motivaron el uso de la espectroscopia UV-visible para conocer las posibles transiciones electrónicas que ocurrirían en el sistema.

**Tabla 1.** Concentraciones molares, para una solución de 50 ml, de los diferentes reactivos utilizados para conformar los soles de Ti y las relaciones Ti/AcacH estudiadas.

rc = Ti/Acac	TBT (M)	ACAC (M)	Agua (M)	Etanol (M)
0.5	0.013	0.025	0.019(0.84ml)	15.771(45.92ml)
1.0	0.013	0.013	0.019(0.84ml)	10.896(31.72ml)
2.0	0.013	0.006	0.019(0.84ml)	12.559(36.56ml)

La figura 1 muestra las curvas de absorbancia óptica en función de longitud de onda que presenta cada sol de titanio en la región del UV-visible. Cabe aclarar que la escala en las figuras 1(a), 1(b) y 1(c) se ha reducido considerando los máximos que ocurren en las curvas. En los espectros se aprecia un incremento de la absorbancia del sistema al aumentar su viscosidad y la concentración de AcacH, comportamiento que se puede justificar considerando que en el interior del sol se está conformando una estructura más definida al aumentar la viscosidad, esto debido a que aumentan los enlaces Ti-O-Ti por el desarrollo de las reacciones de policondensación; otros aspectos

que pueden justificar el incremento de la absorbancia son la presencia de nuevos complejos producto de las reacciones de hidrólisis y condensación y porque se favorece la transferencia de carga entre el AcacH y el  $Ti^{4+}$ . Además, para cada viscosidad, la curva de absorbancia presenta una banda de máxima intensidad, a determinada longitud de onda, y que es diferente para cada relación Ti/Acac; para la relación  $2/1$  (Figura 1(a)), donde las curvas son bastante diferentes, la longitud a la que se presenta el máximo absoluto está en el intervalo entre 390 y 405 nm. Para las otras relaciones Ti/Acac, el máximo absoluto se presenta a  $\sim 420$  nm, relación  $1/1$ , y a  $\sim 390$  nm, relación  $1/2$ .



**Figura 1.** Curvas de Absorbancia en función de la longitud de onda para soluciones con relaciones Ti/Acac diferentes y distintos valores de viscosidad.

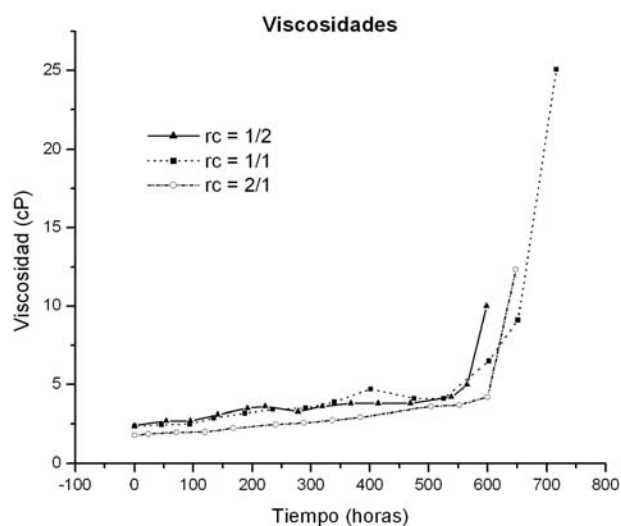
Por otro lado, los espectros UV-visible del TBT y la AcacH (figura 1(d)) presentan máximos absolutos de absorbancia a 318nm y 215 nm, respectivamente. En ninguna de las curvas de las figuras 1(a) a 1(c) aparece un máximo a estos valores, es más, los máximos se presentan, principalmente, en la región entre 370 y 460nm. Esto indica que tanto el TBT como la AcacH han reaccionado generando nuevos complejos, algunos de los cuales son los responsables de las transiciones electrónicas que se reflejan en las curvas de la figura 1. Además, los cambios en los espectros de absorción deben estar muy relacionados con la estructura local que se va formando en el sol ya que las posiciones de las bandas de absorción son muy sensibles al ambiente coordinativo de los átomos y a la naturaleza del enlace (West A. R. 1984).

En la figura 2 se muestran las variaciones de viscosidad de los soles estudiados en función del tiempo, para las diferentes relaciones de Ti/AcacH analizadas. Estas curvas presentan tres regiones: en la primera, la viscosidad presenta un valor prácticamente constante y ocurre durante las 120 horas iniciales de conformación de los soles. Este comportamiento es el resultado de las reacciones de intercambio de ligandos, Ec. 1, y de las primeras reacciones de hidrólisis que ocurren dentro de cada sol, donde hay que considerar el efecto del acomplejante. La segunda zona, comprendida entre las 120 y 475 horas, presenta un pequeño incremento en la variación de la viscosidad dando origen a una pequeña pendiente en la curva. Esta variación puede asociarse en parte a la volatilización del alcohol y al incremento del desa-

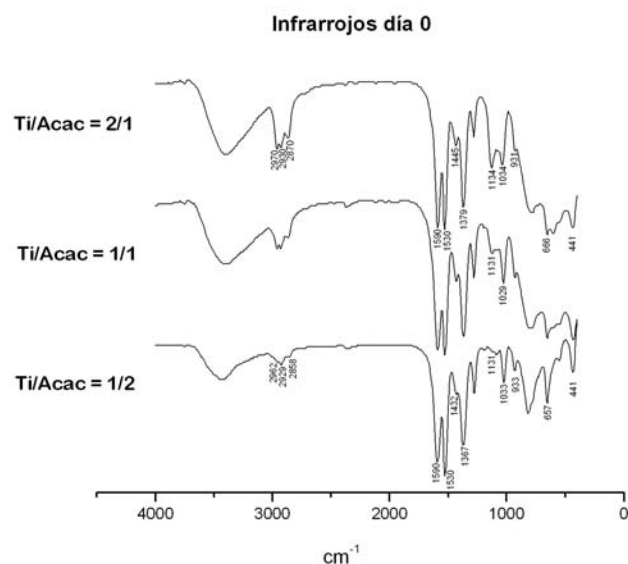
rollo de las reacciones de hidrólisis necesarias para que las reacciones de policondensación ocurran en el sistema. La tercera región corresponde al inicio de la gelificación del sol y se da de manera suave para la relación  $Ti/Acac = 1/1$  y abrupta para las relaciones molares  $1/2$  y  $2/1$ .

En la figura 3 se muestran los espectros IR correspondientes a las diferentes concentraciones de Ti/Acac tomados el primer día de la conformación del sol. No hay indicio de Acac libre en el sistema ya que no aparece su banda típica a  $1620\text{ cm}^{-1}$ . Las bandas a  $2970$ ,  $2930$  y  $2870\text{ cm}^{-1}$  corresponden a los modos vibracionales de los grupos alifáticos  $CH_2$  y  $CH_3$  del precursor de titanio, presentándose una mejor definición de estas bandas en la muestra con mayor concentración de titanio lo que indica que hace falta acetilacetona para el acomplejar a este catión.

Las bandas a  $1034\text{ cm}^{-1}$  y  $1134\text{ cm}^{-1}$  pueden ser asignadas, respectivamente, a ligandos terminales ( $OBu^{\eta}$ ) y tipo puente (Livage J. 1986); estas bandas presentan una variación relativa de la intensidad cuando el sistema tiene más titanio, haciéndose más pequeña la banda a  $1034\text{ cm}^{-1}$  y aumentando la ubicada a  $1134\text{ cm}^{-1}$  al incrementarse el valor de  $r_c$ . Adicionalmente, la banda de  $1134\text{ cm}^{-1}$ , inicialmente asociada al enlace Ti-O-C, también da información sobre el avance de la reacción de hidrólisis del TBT (Télez L. *et al.* 2004); la banda a  $1134\text{ cm}^{-1}$  está más definida en el espectro correspondiente a la muestra  $rc = 1/2$  indicando mayor avance de la reacción de hidrólisis del TBT en ella.



**Figura 2.** Curvas de viscosidad en función del tiempo de los soles estudiados y que contenían diferentes relaciones Ti/AcacH.

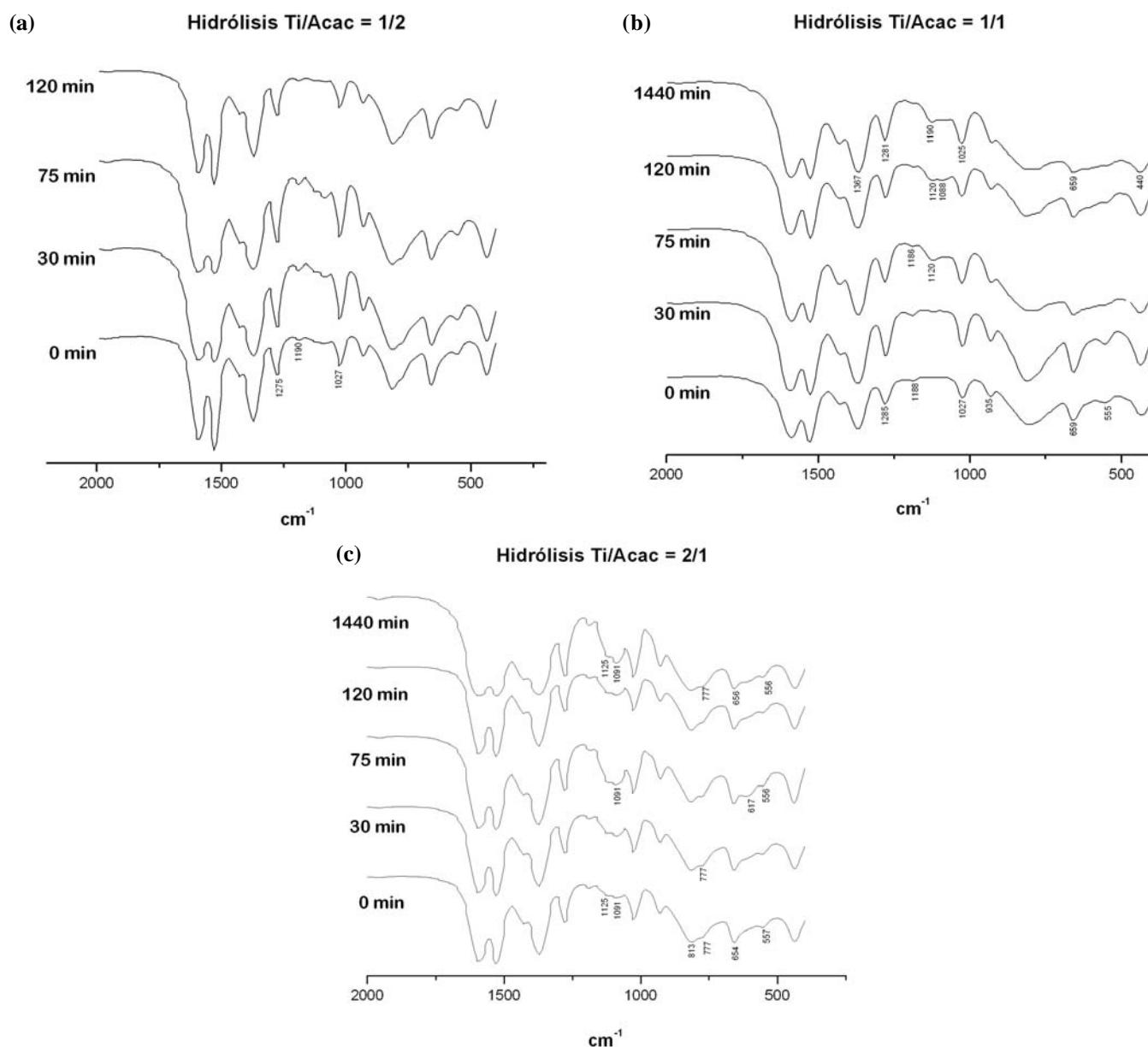


**Figura 3.** Espectro FTIR de soles frescos que contienen diferente relación Ti/AcacH.

Las bandas a  $1590\text{ cm}^{-1}$  y  $1530\text{ cm}^{-1}$  se pueden asignar a grupos del Acac enlazados al titanio, concretamente a los modos  $\nu(\text{C-O})$  y  $\nu(\text{C-C})$ ; al  $\nu(\text{Ti-O}(\text{AcacH}))$  se le puede asociar la banda a  $441\text{ cm}^{-1}$  (Klein L. C. 1988). Otras bandas relevantes que se pueden asociar al complejo titanio-Acac, que se forma en el sistema según la ecuación (5), son las siguientes: la banda a  $\sim 1445\text{ cm}^{-1}$  corresponde al modo vibracional combinado (CH) y (C-C); la banda a  $1379\text{ cm}^{-1}$  al  $\delta_s(\text{CH}_3)$ ; la ubicada a  $\sim 933\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a los mo-

dos  $\nu(\text{C-O}) + \nu(\text{C-C})$  y la banda a  $660\text{ cm}^{-1}$  se puede asociar a los modos  $\nu(\text{C-CH}_3)$  + la deformación del anillo +  $\nu(\text{Ti-O})$  (Rodríguez J. E. *et al.* 2004), esta última banda aumenta en intensidad al aumentar la concentración de acetilacetona.

Para conocer lo que ocurre en los soles de titanio durante su envejecimiento, por varios minutos (máximo 2 horas), se tomaron muestras a diferentes instantes y se realizó un estudio con espectroscopía IR; en la figura 4 se muestran los resultados para soles con diferente relación



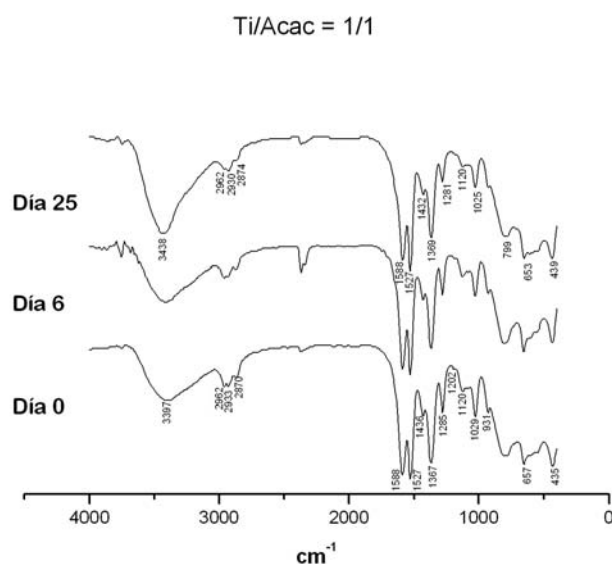
**Figura 4.** Espectros FTIR de muestras de soles estables con relaciones Ti/Acac de  $\frac{1}{2}$  (a),  $\frac{1}{1}$  (b) y  $\frac{2}{1}$  (c), para diferentes tiempos del proceso.

Ti/Acac, mostrando solo el rango entre 2000 y 400  $\text{cm}^{-1}$  que es la región donde se ubican las bandas de mayor interés para el estudio de los soles estables.

No se observan grandes variaciones en los espectros de la figura 4, lo que indica que el sistema es bastante estable. Las bandas a 3500  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\nu(\text{OH})$ , y 930  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\nu(\text{CO})$ , corresponden al butanol libre que se va formando por el desarrollo de las reacciones químicas, intercambio de ligandos e hidrólisis, al interior de las soluciones. La hidrólisis del nuevo complejo de titanio es muy lenta porque los grupos acomplejantes se enlazan fuertemente al titanio y por lo tanto es difícil su remoción (Rodríguez J. E. *et al.* 2004); los ligandos acomplejantes se comportan como grupos funcionales terminales (Livage J. 1994).

Por otro lado, no se observó formación de precipitados y la solución permaneció transparente. La lenta evaporación del solvente llevó a que la viscosidad del sistema se incrementara un poco pero continuó transparente durante todo el tiempo de estudio. El doblete asociado a los ligandos Acac, bandas alrededor de 1500  $\text{cm}^{-1}$ , es visible durante todo el proceso (figura 4) y se observa una banda de absorción ancha, más en la muestra con relación  $r_c = 1/1$ , a bajos números de onda del espectro. Esta banda debe corresponder a la envolvente del espectro fonónico debido a los enlaces Ti-O-Ti en una red de óxido de Titanio (Livage J. 1986).

En la figura 5 se indican los espectros FTIR obtenidos para soles con relación Ti/AcacH = 1/1, considerando su envejecimiento por varios días. El sistema fue transparente durante todo el tiempo de estudio y no se formó ningún precipitado. Esto indica que los ligandos Acac no se pueden remover completamente. Como lo expresan otros autores (Sánchez C. *et al.* 1988, Livage J. 1994), es posible obtener geles de este sistema en presencia de agua tal que el diámetro hidrodinámico de las partículas coloidales que se forman se incrementa de 2 a 40 nm durante la hidrólisis de la suspensión, tamaño de partícula mucho menor que las que se obtienen al no adicionar AcacH al sistema. Esto indica que el ligando Acac previene la condensación lo que permitiría controlar muy bien esta reacción a través del acomplejamiento y la hidrólisis lenta de las especies químicas (Rodríguez J. E. *et al.* 2004, Livage J. 1994), favoreciendo la estabilidad de los soles conformados por varios días condición necesaria para el uso tecnológico de los mismos. A pesar de este control, es evidente en el espectro de la muestra obtenida a los 25 días de envejecimiento que las intensidades relativas de las bandas a 3438  $\text{cm}^{-1}$ , que corresponde a los grupos OH, y 653 – 439  $\text{cm}^{-1}$ , relacionados con los enlaces Ti - O - Ti, son mayores que para los otros espectros (figura 5), indicando el avance de



**Figura 5.** Espectros FTIR correspondientes a muestras del sol con  $r_c = \text{Ti/Acac} = 1/1$  obtenidas a diferentes días de envejecimiento.

las reacciones de olación y oxolación de una manera lenta, debido a la presencia del acomplejante.

## Conclusiones

Este trabajo permitió obtener soles estables de titanio. La metodología desarrollada brindó la posibilidad de controlar la velocidad de hidrólisis y condensación del tetrabutoóxido de titanio, en una solución de alcohol y agua, utilizando para ello como acomplejante la Acetilacetona. Esta condición de estabilidad se verificó utilizando espectroscopía infrarroja y la variación de la viscosidad del sistema con el tiempo.

La reacción entre el TBT y la acacH favoreció la conformación de complejos del tipo  $\text{Ti}(\text{OBU}^n)_{4-x}(\text{Acac})_x$  cuya velocidad de hidrólisis fue mucho menor que la del  $\text{Ti}(\text{OBU}^n)_4$  puro. De los resultados del trabajo se concluye que la cantidad de Acac que se adicione a la solución, la cual contiene el TBT, altera las reacciones que ocurren en el interior del sistema modificando tanto las velocidades de las mismas como el grado de hidrólisis de los complejos que en él existen.

El estudio con espectroscopía UV-visible permitió ver que, dependiendo de la razón Ti/Acac, el sistema se estructura internamente de manera diferente, condición que se refleja en la posición de las bandas de absorción en los

espectros obtenidos para los sistemas estudiados; la posición de las bandas de absorción estarían determinadas por la naturaleza del enlace de los complejos y el ambiente coordinativo de los átomos.

Con base en los resultados de viscosidad y de espectroscopía se puede concluir que la adición del AcacH, a la solución de TBT, afecta las reacciones de hidrólisis y condensación que ocurren al interior del sistema, modificando la estructura del mismo y la naturaleza de los complejos que en él existen. Esto permite que los soles sean estables por más tiempo facilitando su uso a nivel industrial.

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto COLCIENCIAS código 1109-06-17621 (ID 1702). Agradecimientos especiales al Dr. Nelson Rojas coordinador del Laboratorio de Biología Celular y Molecular, por permitir el uso del equipo UV-visible, a la Dra. Mayte del Pilar Rada coordinadora de la Unidad de Química Industrial y a la VRI de la Universidad del Cauca por el apoyo logístico y administrativo.

### Bibliografía

- Bradley D.C., Mehrotra R. C., Gaur D. P.** 1978, "Metal alkoxides", Academic Press.
- Brinker C. J., Scherer G. W.** 1990, "Sol-gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-gel processing". Academic Press, Inc.
- Cernigoy U., Lavrençia Stangar U., Trebse P., Opara Krasovec U., Gross S.** 2006, "Photocatalytically active TiO<sub>2</sub> thin films produced by surfactant-assisted Sol-gel processing", *Thin Solid Films*, **495**, 327-332.
- Doeuff S., Henry M., Sanchez C., Livage J.** 1987 "Hydrolysis of Titanium alkoxides: modification of the molecular precursor by acetic acid", *J. Non-Cryst. Solids*, **89**, 2006-2016.
- Hench L. L., Ulrich D. R. (ed)** 1986, "Science of Ceramic Chemical processing", John Wiley & Sons, Inc.
- Jolivet J.** 2000, "Metal oxide Chemistry and Síntesis: from solution to solid state", John Wiley R Sons, Ltd.
- Kato K., Tsuzuki A., Taoda H., Toni Y., Kato T., Bulsugan Y.** 1994, "Cristal Structures of TiO<sub>2</sub> thin coatings prepared from the alkoxide solution via dip-coating technique affecting the photocatalytic decomposition of aqueous acetic acid", *J. Mater. Sci.*, **29**, 5911-5915.
- Klein L. C. (ed)** 1988, "Sol-gel technology for thin films, fiber, preforms, electronics and especial shapes", Noyes Publications.
- Livage J.** 1986, "Synthesis, structure and applications of TiO<sub>2</sub> gels", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **73**, 717-724.
- Livage J.** 1994, "Molecular design of transition metal alkoxide precursors", in: *Chemical Processing of Ceramics*, Editor B. I. Lee and E. J.A. Pope, Marcel Dekker, Inc., 3-22.
- Otterstedt J., Brandereth D. A.** 1998, "Small particles technology", Plenum press, New York.
- Pierre A. C.** 2002, "Introduction to sol-gel processing", Kluwer Academic Publishers.
- Rodríguez Páez J. E., Mafla A., Andrade G., Durán A.** 2004, "Modificación química del precursor de Titánico para obtener soles estables de Sílice-Titania: uso de acetilacetona", *Bol. Soc. Esp. Ceram. y vidrio*, **43** (1) 53-55.
- Sánchez C., Babommeau F., Doeuff S., Leautic A.** 1988, "Chemical modifications of titanium alkoxide precursors", in *Ultrastructure processing of ceramic glasses and composites*, Sand Diego, 77-87.
- Sánchez C., Livage J., Henry M., Babommeau F.** 1988, "Chemical modification of alkoxides precursors", *J. Non-Crys. Solids* **100**, 65-76.
- Vorkapic D., Matsoukas T.** 1998, "Effect of temperature and alcohol in the preparation of titania Nanoparticles from alkoxides", *J. Am. Ceram. Soc.*, **81** (11), 2815-2820.
- Téllez L., Rubio F., Peña-Alonso R., Rubio J.** 2004, "Seguimiento por espectroscopia infrarroja (FT-IR) de la copolimerización de TEOS (tetraetilortosilicato) y PDMS (polidimetilsiloxano) en presencia de TBT (tetrabutiltitanio)", *Bol. Soc. Esp. Ceram. y vidrio*, **43** (5), 883-890.
- West A. R.** 1984, "Solid State Chemistry and its applications", John Wiley & Sons Ltd.

Recibido: enero 30 de 2007

Aceptado para su publicación: diciembre 17 de 2007



# CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE ARCILLAS DEL MUNICIPIO DE GUAPI – COSTA PACÍFICA CAUCANA (COLOMBIA)

Por

Muñoz Meneses R. A.<sup>1</sup>, J. A. Muñoz Chaves<sup>1</sup>, P. Mancilla<sup>2</sup>, J. E. Rodríguez-Páez<sup>1</sup>

## Resumen

**R. A. Muñoz Meneses, J. A. Muñoz Chaves, P. Mancilla & J. E. Rodríguez-Páez:** Caracterización fisicoquímica de arcillas del municipio de Guapi - Costa Pacífica Cauca (Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31** (121): 537-544, 2007. ISSN 0370-3908.

Las arcillas son materia prima importante, principalmente, para la elaboración de cerámica tradicional. Es de gran interés, por lo tanto, caracterizarlas física y químicamente para poder optimizar sus propiedades y potencializar su uso; es por esto que la caracterización de las arcillas de la región de Guapi se torna en una actividad importante por el efecto tecnológico, económico y social que se puede generar. En este trabajo se indican los resultados obtenidos de esta caracterización. Para ello se utilizó espectroscopia infrarroja (FTIR), difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), análisis térmicos (ATD/TG) y microscopía electrónica de transmisión (MET). Además, se da información sobre los resultados obtenidos de los ensayos realizados de plasticidad, límites líquido y plástico, y peso específico del material arcilloso.

**Palabras clave:** Arcillas, caracterización, fases cristalinas, morfología y tamaño de partícula, plasticidad.

## Abstract

The clays are important raw material, mainly, for the elaboration of traditional ceramics. Therefore, it is very interest to characterize physically and chemically the clays in order to optimize their properties and to increase their use; that is why the characterization of clays in the region of Guapi becomes in an important activity by the technological, economic and social effect that can be generated. In this work are indicated the results obtained of this characterization. For this, it was used infrared spectroscopy (FTIR), X ray diffraction (XRD), X ray fluorescence (XRF), thermal analyses (ATD/TG) and Electronic microscopy of Transmission (MET). In

<sup>1</sup> Grupo CYTEMAC. Departamento de Física / Universidad del Cauca. Calle 5 N° 4 -70 – Popayán / Cauca

<sup>2</sup> Comunidad de Guapi-Cauca ramunoz@unicauca.edu.co, jmunozchaves@unicauca.edu.co, jnpaez@unicauca.edu.co

addition, information is given on the obtained results in the tests of plasticity, liquid and plastic limits, and specific weight of the raw material.

**Key words:** clays, characterization, crystalline phases, morphology and size of particle, plasticity.

## Introducción

Se considera a las arcillas como un mineral natural complejo constituido, principalmente, por una mezcla de aluminosilicatos cristalinos, a los que se denominan minerales arcillosos, y de otros silicatos y minerales de hierro, calcio, titanio, etc., acompañados frecuentemente por materia orgánica (Bernal, I., H. *et al.* 2003). Actualmente se conoce que los minerales arcillosos son numerosos y difieren entre sí por su forma, estructura, apilamiento de capas y por la simetría que presenta su red cristalina.

Químicamente, los minerales arcillosos están constituidos por láminas de tetraedros de silicio [ $\text{SiO}_4$ ] y de octaedros de aluminio [ $\text{AlO}_6$ ]. La combinación de estas láminas forma los diferentes tipos de estructuras arcillosas que a su vez dan origen a paquetes de capas y que al combinarse conforman una placa de mineral arcilloso visible (García Romero, E y Suárez Barrios, M. 2005).

Otros constituyentes frecuentes en las arcillas, particularmente en las de baja calidad, son los carbonatos de calcio y magnesio. Cuando se encuentran disgregados en partículas finas se constituyen en fundentes energéticos. Así, durante la cocción de artículos elaborados con estas arcillas, a temperaturas por encima de  $1000^\circ\text{C}$ , se desarrolla una fase vítrea que puede provocar la deformación del material; a temperaturas menores, los carbonatos se manifiestan reduciendo la resistencia de la pieza (Avgustinik A. I, 1983).

Entre los constituyentes nocivos se encuentran la piritita ( $\text{FeS}_2$ ) y el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que son fundentes energéticos durante la cocción a elevadas temperaturas ( $1200^\circ\text{C}$ - $1300^\circ\text{C}$ ). Otros constituyentes nocivos en las arcillas son las sales solubles, sulfatos y cloruros. Los sulfatos forman sales solubles que se depositan sobre los artículos de arcilla secos desmejorando el aspecto de estos.

Las fases orgánicas presentes en las arcillas influyen las propiedades técnicas de las mismas, contribuyendo al aumento de la capacidad higroscópica en la arcilla y al incremento de la plasticidad y cohesión; por otra parte, la presencia de C (fase orgánica) en las arcillas origina durante la cocción un medio reductor que favorece una más temprana sinterización de esta materia prima (Avgustinik A. I, 1983).

Los elevados índices de sílice en las arcillas indican que éstas se hallan enarenadas o que su principal material arcilloso es la caolinita. El alto porcentaje de alúmina, que está muy próxima a la caolinita de composición teórica, hace prever la refractariedad del material. El contenido de óxidos colorantes como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$  permite la aplicación de estas arcillas en la elaboración de artículos de tonalidad blanca, como porcelanas y loza.

Las arcillas que contienen poca alúmina, y muchos óxidos alcalinos y alcalinotérreos, son de fácil fusión y se emplean en la elaboración de cerámicos para la construcción. Si el contenido de alúmina es alto se debe considerar la capacidad de la arcilla para sinterizarse sin perder su refractariedad y se pueden elaborar artículos refractarios y antiácidos altamente densos.

Existen muchas formas de clasificar las arcillas dependiendo del área de estudio. No existe una sola clasificación que involucre todas las características de las arcillas, se puede decir que se agrupan de acuerdo a su composición, génesis, utilización, etc.

En este trabajo se indican los resultados de la caracterización fisicoquímica realizada a las arcillas del municipio de Guapi-Cauca. Para realizar esta caracterización se utilizó Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos X (DRX), Análisis Térmico (ATD/TG), Espectroscopia Infrarroja (FTIR) y Microscopia Electrónica de Transmisión (MET). Considerando su potencial aplicación, en la fabricación de piezas cerámicas, se complementó esta caracterización con la realización de los ensayos de plasticidad, límites líquido y plástico, peso específico y expansión del material arcilloso. Es de resaltar la gran importancia que tiene esta materia prima para la zona pacífica por su potencial uso en la fabricación de material de construcción, principalmente.

## Procedimiento experimental

El depósito del material arcilloso de interés se encuentra ubicado en la República de Colombia departamento del Cauca, municipio de Guapi (vereda la Codicia), la cual tiene un área de 3,8 hectáreas. Para el estudio de exploración y evaluación del depósito de arcilla se diseñó una red de perforaciones teniendo en cuenta la profundidad de las

excavaciones, además de características como color, textura y plasticidad de las arcillas, encontrando material arcilloso de un color amarillo-café en la parte superficial del depósito y en la parte más profunda una arcilla de color gris con presencia de franjas de arcilla roja; por lo tanto se tomaron de la mina dos muestras representativas las cuales se rotularon como ARGU-I y ARGU-II.

Para determinar la plasticidad del material arcilloso seleccionado se tomaron muestras sin ningún tratamiento y se les realizaron los ensayos de límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico), peso específico y expansión. Los límites de Atterberg, se determinaron según los procedimientos descritos en la Norma Técnica Colombiana 1493 de Suelos (Ensayo para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad), correspondientes a la norma ASTM (American Society of Testing of Materials) D 4318.

Para la obtención del límite plástico se determinó el contenido de humedad de una muestra plástica arcilla-agua, moldeada en forma cilíndrica, considerando la pérdida de cohesión como consecuencia de un esfuerzo mecánico suave ejercido con la palma de la mano del operador; el diámetro aproximado de la probeta, especificado en la norma, es de 3mm.

El límite líquido, menor contenido en agua que permite que la pasta se comporte como un líquido, se determinó utilizando un instrumento ideado por Casagrande (**Gippini, E.**, 1979), hoy conocido como cuchara de Casagrande. Se cubre de modo adecuado el receptáculo del instrumento y sobre la superficie de la pasta húmeda se practica un surco, de sección normalizada utilizando un acanalador normalizado. Se estima que la pérdida de resistencia a la cizalla de la pasta se consigue cuando el surco practicado se cierra, a lo largo de una longitud mínima normalizada (13 mm), como consecuencia de un número establecido de golpes (concretamente 25) del receptáculo a su base bajo la acción de una manivela (accionada manualmente o mecánicamente), en esas condiciones se determina el contenido en humedad de la porción de pasta en torno al cierre del surco (NTC 1493 de suelos).

Para la caracterización fisicoquímica de la materia prima se realizó un secado, a temperatura ambiente, con el fin de eliminar agua de la muestra. Para eliminar el agua residual por completo, la muestra se colocó en el interior de un horno a una temperatura de 100°C durante 24 horas. Finalmente, la muestra seca se maceró en un mortero de ágata para obtener el material en polvo que se utilizó para realizar los diferentes ensayos de caracterización de la materia prima.

El material arcilloso obtenido se caracterizó utilizando FRX, para conocer los elementos que, como óxidos, existen en las muestras y el porcentaje del mismo en el sólido.

Para este estudio, las muestras en polvo fueron homogeneizadas con agitación y se prepararon en forma de perlas. La medición se realizó utilizando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X PW – 2440 Philips. La señal resultante, de cada medición, fue calibrada mediante una curva cuantitativa implementada para determinar los elementos mayoritarios en los sedimentos, considerando la tipología de las muestras arcillosas.

La espectroscopia infrarroja se utilizó para determinar los grupos funcionales presentes en la muestra, suministrando información de los enlaces químicos presentes. Los espectros FTIR fueron obtenidos usando un espectrómetro Termo Nicolet IR 200. Para realizar el análisis se tomaron aproximadamente 100 mg del sólido seco molido y se mezclaron adecuadamente con KBr para obtener una pastilla que se colocó en el portamuestras del equipo para obtener su espectro.

La Difracción de Rayos X es una técnica que permite la identificación cualitativa de las fases cristalinas presentes en la muestra. Los difractogramas de las muestras sólidas fueron obtenidos con un equipo Siemens D-5000 utilizando la radiación de CuK $\alpha$  ( $\lambda=1.54'$ ), en el rango entre 10° y 70°. Dada la estructura tipo laminar que presentan los aluminosilicatos se trató de evitar, durante la preparación de la muestra, favorecer la orientación de la misma.

Para conocer la morfología y el tamaño de partícula del material arcilloso se utilizó un microscopio electrónico de transmisión JEOL-EX 1200. Para ello se secó la muestra hasta peso constante y luego se dispersó utilizando ultrasonido; se depositó sobre rejillas de cobre un poco de este material disperso y la rejilla se colocó en el portamuestras del microscopio.

La termogravimetría (TG) fue utilizada para determinar la pérdida de masa que experimenta la muestra sólida al ser sometida a la acción de la temperatura. Además, para determinar las reacciones endotérmicas y exotérmicas que ocurren en el material arcilloso, al tratarse térmicamente, se utilizó análisis térmico diferencial (ATD).

## Resultados y discusión

### Descripción general de las muestras

La muestra ARGU I presenta un color amarillo-café y al observarla cuidadosamente se evidenció la presencia de pequeñas franjas de color rojizo que hacen prever la existencia de óxido de hierro. Al palpar la arcilla su textura denota la presencia de arena y una buena plasticidad.

Por otro lado ARGU II es gris, y si se compara con la muestra anterior esta presentó menor cantidad de arena y su

textura hizo prever una mayor plasticidad; las franjas de color rojizo se presentaron en la muestra en menor proporción.

### Límites de Atterberg y peso específico

Siguiendo la norma ASTM D 4318, los valores que se determinaron con este método fueron: el límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, límite de contracción o retracción, valores que se indican en la Tabla 1 y son representados en el Diagrama de Casagrande, Figura 1.

La muestra ARGU-I presentó valores de límite líquido 74.4% y límite plástico 28.1%, obteniéndose un índice de plasticidad de 46.3. Por otro lado, la muestra ARGU-II presentó un límite líquido de 88.25% y límite plástico de 28.1%, para un índice de plasticidad de 60.15. Con estos valores y de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (USCS), estas muestras se pueden clasificar como material tipo CH, es decir, arcillas de alta plasticidad y se encontrarían por encima de la línea A en la carta de plasticidad, tal como se muestra en la Figura 1.

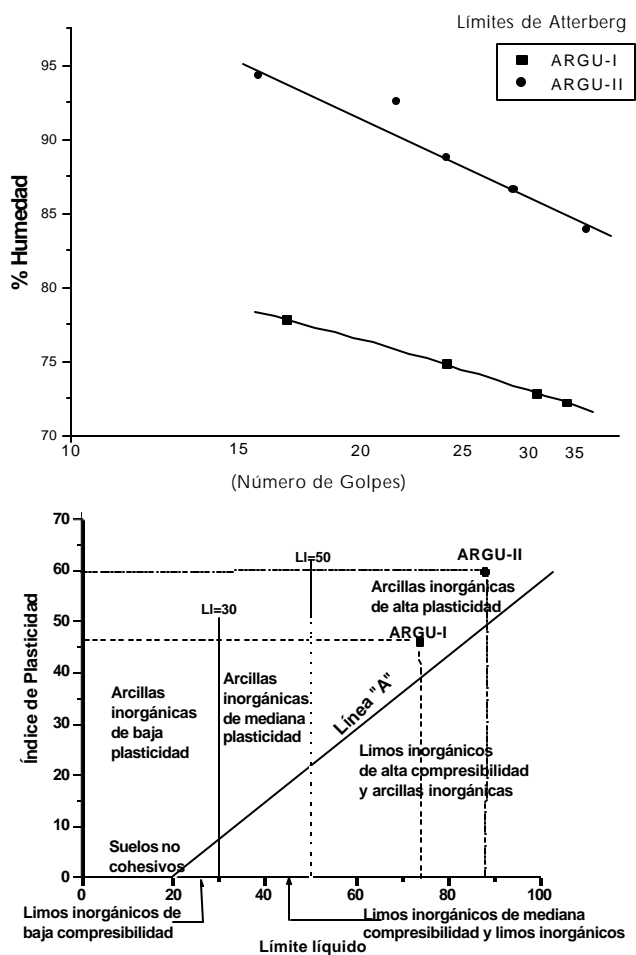


Figura 1. Diagrama de Casa Grande correspondiente a las muestras estudiadas. ARGU-I y ARGU-II

Tabla 1. Valores de los diferentes límites correspondiente a las muestras ARGU-I y ARGU-II de la fuente Codicia-Guapi.

Límites de Atterberg	ARGU-I	ARGU-II
Límite líquido	74.40	88.25
Límite plástico	28.1	28.1
Límite de retracción	15.89	14.12
Índice de plasticidad	46.30	60.15

Con relación al peso específico, para la muestra ARGU-I se obtuvo un valor de 2.585 que corresponde, según la literatura (Bowles, J. E, 1980), a una arcilla volcánica ya que este valor se encuentra entre 2.2 y 2.6. La muestra ARGU-II presentó un peso específico de 2.759 que corresponde a una arcilla inorgánica.

En la Figura 1 se presenta el Diagrama de Casagrande para ARGU-I y ARGU-II donde se puede ver que ellas pueden ser clasificadas como Arcillas de Alta plasticidad.

### Composición química de las muestras

El análisis químico de las muestras ARGU-I y ARGU-II se realizó utilizando fluorescencia de rayos X (FRX), empleando en cada medición una curva cuantitativa calibrada, implementada para determinar elementos mayoritarios en sedimentos arcillosos; los resultados se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de FRX obtenidos para la muestra de interés.

Compuesto	Argu-I	Argu-II
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,384 %	27,536 %
CaO	0,048 %	0,043 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,842 %	1,247 %
K <sub>2</sub> O	0,613 %	0,924 %
MgO	1,041 %	0,384 %
MnO	0,016 %	0,005 %
Na <sub>2</sub> O	0,209 %	0,312 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,015 %	0,022 %
SiO <sub>2</sub>	60,675 %	60,268 %
TiO <sub>2</sub>	1,079 %	1,582 %

En la Tabla 2 se destacan los elevados contenidos de sílice y alúmina presentes en las muestras estudiadas, así como el alto porcentaje de óxido de hierro en la muestra ARGU-I lo que justifica su color amarillo-café. Además, la variación de los porcentajes de óxido de hierro y óxido de titanio, que se evidencian en ARGU-II, pone de manifiesto su tonalidad gris.

De acuerdo a los resultados obtenidos con FRX, se concluye que las arcillas de la Vereda Codicia contienen principalmente: silicio, aluminio, hierro y titanio, en proporciones adecuadas, que las hacen aptas tecnológicamente para la industria cerámica (Dondi M, Fabbri B, Laviano R, 1992).

**Fases cristalinas presentes en el material arcilloso**

Los difractogramas de Rayos X obtenidos para las muestras ARGU-I y ARGU-II se presentan en la Figura 2. Con base en estos se pueden identificar las fases mayoritarias y minoritarias que componen cada una de las arcillas. El análisis de los difractogramas se realizó utilizando como patrón de referencia la base de datos del software PCPDFWIN Versión 2.1 JCPDS-ICDD (International Center for Diffraction Data).

Considerando la ubicación de los picos, más que su intensidad por la posibilidad de haber favorecido durante la preparación de la muestra ciertos planos cristalinos, se pudo determinar la presencia, principalmente, de las siguientes fases: Gismondite (PDF # 20-0452) y  $Na_{0.5}H_{0.5}(AlSi_2O_6)$  (PDF # 80-1394). Otros compuestos cristalinos que pueden estar presentes, fases minoritarias, son la Caolinita (PDF # 78-2109, 03-0058), la Berthierina-1H (PDF # 31-0618) y la Sericita (PDF # 03-0197). Los resultados indican que los minerales arcillosos están constituidos, principalmente, por aluminosilicatos hidratados con presencia de algunas impurezas tales como Na, Fe, K, Ca, etc., que reiteran los resultados del análisis químico obtenido con FRX.

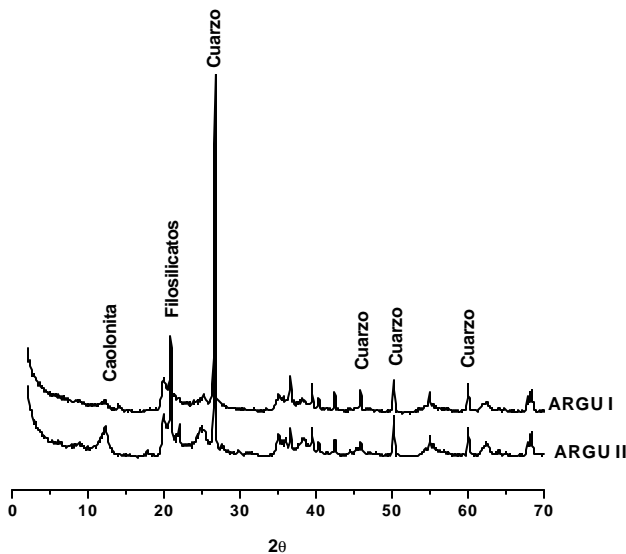


Figura 2. Difractogramas de rayos X correspondientes a: ARGU- I y ARGU-II.

**Efecto del tratamiento térmico sobre las muestras**

Para determinar el efecto del tratamiento térmico sobre las muestras, se realizaron ensayos de ATD y TG en un rango de temperatura entre 25°C (temperatura ambiente) y 800°C, para el análisis termogravimétrico, y de 25°C a 1600°C para el análisis térmico diferencial; para ambas muestras los ensayos se realizaron en presencia de aire. Las curvas de ATD/TG correspondientes a las muestras ARGU-I y ARGU-II se ilustran en la Figura 3.

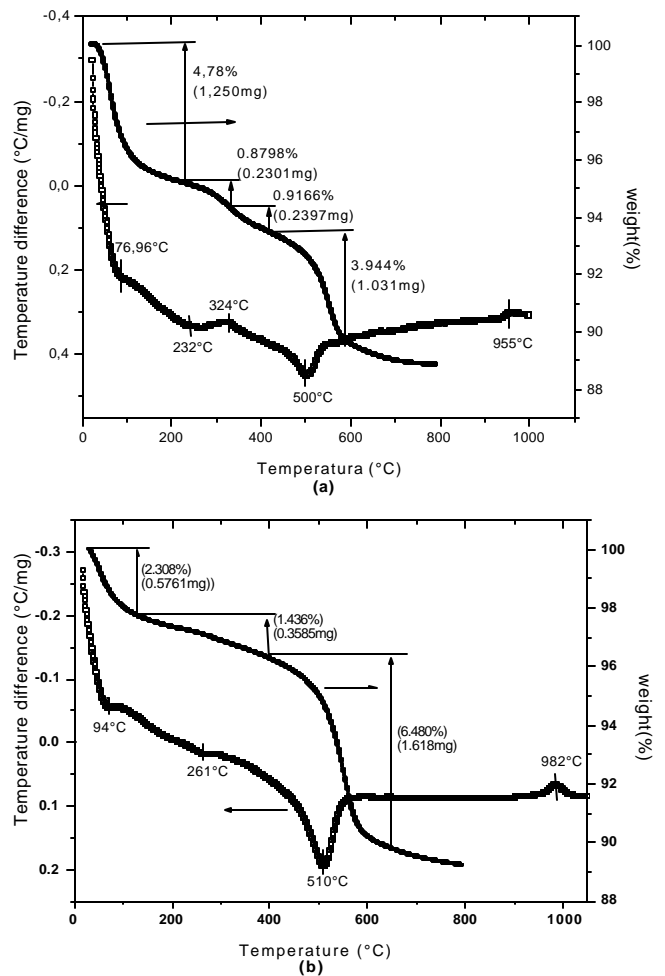


Figura 3. Curvas de ATD/TG correspondientes a (a) ARGU-I y (b) ARGU-II.

Las curvas de ATD/TG de las muestras analizadas presentan un pico endotérmico a 77°C y 94°C, para ARGU-I y ARGU-II respectivamente, y que corresponde a la salida del agua fisisorbida; este pico está acompañado con una pérdida de peso de 4.78% para ARGU I y 2.308% para ARGU II. El gran pico endotérmico a ~ 510°C debe contener infor-

mación de la deshidroxilación de las muestras, proceso que involucra la liberación y separación de grupos hidroxilos de la estructura así como la desestabilización del ion aluminio, reacciones que están acompañadas de una disminución brusca de peso de 3.944% para ARGU I y 6.48% para ARGU II (Figura 3). El pequeño pico exotérmico a 955°C - 982°C puede tener información sobre la transformación de fase  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  a  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  así como de la descomposición de los carbonatos de calcio que existen en la muestra (Mackenzie, R.C. 1972).

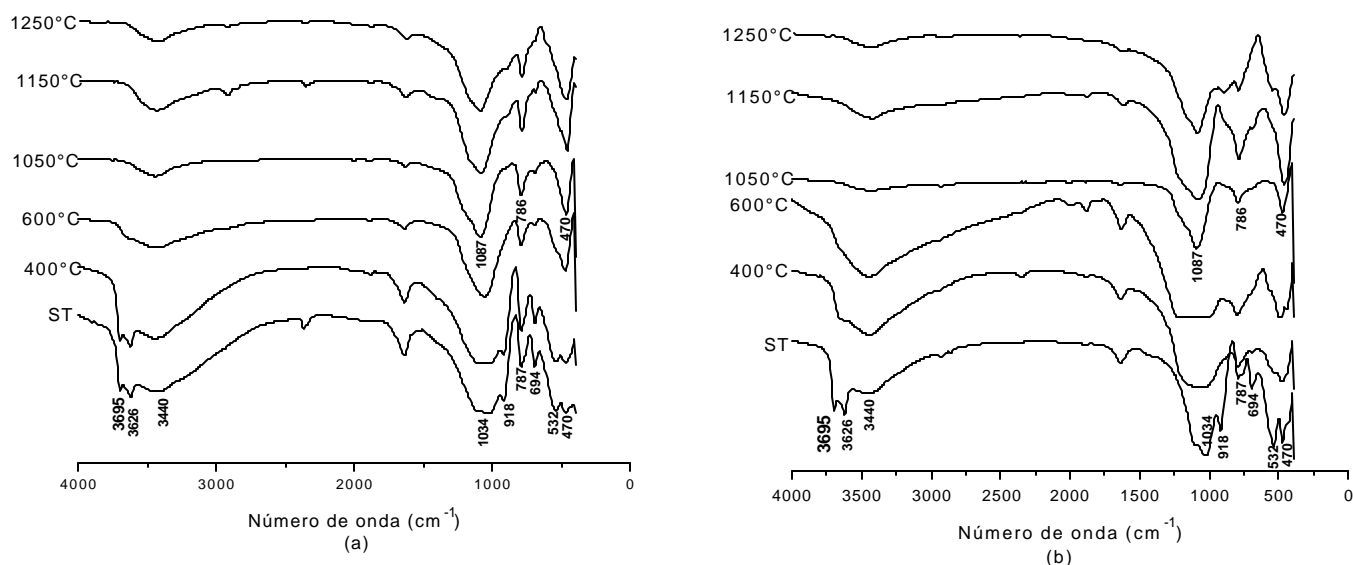
### Grupos funcionales presentes en las muestras

En la Figura 4 se muestran los espectros de IR correspondientes a las muestras ARGU-I, ARGU-II, sin tratamiento térmico y tratadas a diferentes temperaturas, y en la Tabla 3 se indica la asignación de los grupos funcionales a las bandas más importantes que estos presentan.

En estos espectros son evidentes las bandas asociadas a los enlaces Si-O-Si, 789 y 470  $\text{cm}^{-1}$ , además de grupos

**Tabla 3.** Bandas correspondientes a los espectros de las muestras ARGU-I y ARGU-II

ST	400°C ( $\text{Cm}^{-1}$ )	600°C ( $\text{Cm}^{-1}$ )	1050°C ( $\text{Cm}^{-1}$ )	1150°C ( $\text{Cm}^{-1}$ )	1250°C ( $\text{Cm}^{-1}$ )	Grupos Funcionales
3695	3695	—	—	—	—	OH Tensión de los grupos del hidroxilo de la superficie interna
3626	3626	3610	—	—	—	OH Tensión de los grupos internos del hidroxilo
3440	3440	3440	3400	3425	3433	OH Tensión del agua
1635	1635	1635	1628	1627	1620	OH Deformación del agua
1034	1041	1057	1088	1080	1088	Tensión del plano Si-O
918	918	—	—	—	—	Al-OH Deformación
787	794	795	795	787	787	Si-O Tensión del cuarzo y del silicio
694	694	694	694	686	—	Si-O, perpendicular
532	532	—	—	—	—	Al-O-Si deformación
470	471	471	463	455	463	Si-O-Si deformación



**Figura 4.** Espectros de IR correspondientes a las muestras (a) ARGU I y (b) ARGU-II.

hidroxilos asociados a las bandas a  $\sim 3695$  y  $3626 \text{ cm}^{-1}$ ; los hidroxilos asociados a la banda a  $3626 \text{ cm}^{-1}$  estarían más fuertemente enlazados y se ubicarían en las cavidades de los anillos hexagonales de la estructura. Por otro lado, los hidroxilos asociados a las bandas a  $\sim 3695 \text{ cm}^{-1}$  se encontrarían ubicados en la lámina de octaedros y su enlace sería menos fuerte. Es evidente que a medida que aumenta el tratamiento térmico, las bandas asociadas a las tensiones de los grupos hidroxilos ( $3695$  y  $3626 \text{ cm}^{-1}$ ) desaparecen; algo similar ocurre con las deformaciones de los grupos Al-OH y Al-O-Si que se asocian a las bandas ubicadas a  $918$  y  $532 \text{ cm}^{-1}$ , respectivamente. Además, se observa un desplazamiento de las bandas hacia menores números de onda poniendo en evidencia un fortalecimiento y ordenamiento de la estructura (Farmer V.C. 1974).

### Morfología y tamaño de partícula

Como se observa en la figura 5, fotografías obtenidas con MET, en las muestras existen placas de aproximadamente  $500 \text{ nm}$  y  $200 \text{ nm}$ , para ARGU I y ARGU II respectivamente, poniendo en evidencia la naturaleza laminar de la estructura de los aluminosilicatos.

### Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos de este trabajo se puede concluir lo siguiente:

- Los resultados de los ensayos de consistencia indican que la muestra ARGU-II tiene un índice de plasticidad más alto (60.15) que la muestra ARGU-I (46.30), resultado de gran importancia para la formulación de las pastas cerámicas. Estos resultados son ratificados con los valores de peso específico obtenidos, los cuales permiten clasificar estas muestras como del tipo CH o sea arcillas de alta plasticidad.
- Del análisis de FRX realizado a las muestras ARGU-I y ARGU-II, se encontró que ellas tienen un alto contenido de aluminio (mayor al 20%) y silicio (mayor al 60%), con impurezas de hierro, magnesio y titanio principalmente, composición de interés tecnológico, principalmente para la obtención de material para construcción y pisos cerámicos. Esto fue reiterado con los resultados de rayos X ya que las principales fases cristalinas presentes en ellas son Gismondita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) y  $\text{Na}_{0.5}\text{H}_{0.5}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$  y como fases secundarias Sericita ( $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Berthierina-1H ( $(\text{Fe,Al})_3(\text{Si,Al})_2\text{O}_5\text{OH}_4$ ) y Caolinita ( $\text{Al}_2(\text{OH})_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})$ ). Por otro lado, las principales bandas de los espectros IR están asociadas al enlace Si-O-Si, Al-OH, y Si-OH, principalmente.



Figura 5. Micrografías de las muestras ARGU-I y ARGU-II sin tratamiento térmico.

- Los análisis de ATD/TG permiten concluir que al someter las muestras arcillosas estudiadas a tratamientos térmicos, las reacciones más importantes que ocurren son: pérdida de agua, tanto superficial como constitucional, deshidroxilación de las arcillas y la transformación de  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  a  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

Estos resultados han motivado al grupo de investigación a estudiar la posibilidad de utilizar estos materiales arcillosos en la formulación de pastas cerámicas y barbotinas a emplear en la fabricación de piezas cerámicas, estudio que actualmente se está realizando.

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto SENA coordinado por el Ing. Paulino Mancilla. Agradecimiento especial a la Lic. Patricia Mosquera, UME-Unicauca, por su ayuda en el estudio de Microscopía Electrónica y al VRI-Unicauca por su apoyo logístico.

### Bibliografía

**Avgustinik, A. I.**, 1983, "Cerámica". Editorial Reverté, S.A. Argentina: Buenos Aires.

**Bernal, I., H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica & J. Quintero.** 2003, "Análisis próximo de arcillas para cerámica". Rev. Acad. Colomb. Cienc. **27**: 569-578.

**Bowles, J. E.**, 1980. "Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil". Editorial Mc Graw-Hill. Bogotá.

**Dond M. I, Fabbri B. I, Laviano R.** "Characteristics of the clays utilized in the bricks industry in Apulia and Basilicata (southern Italy)". Miner. Petrogr. Acta 35A 179-189 (1992).

**Farmer, V.C.** 1974, "The Infrared Spectra of Minerals. Monograph". Mineralogical Society, London, 539 pp.

**García Romero E. & Suárez Barrios M.** *Las arcillas: Propiedades y usos*. [en línea]. ed. 1. Madrid: Julio 2005 [ref. de 10 de febrero de 2006]. Disponible en Web: <<http://www.uclm.es/users/higuera/yymm/MarcoNuevo.htm>>

**Gippini, Enrique.**, 1979, "Pastas Cerámicas". Sociedad Española de Cerámica. Madrid.

**Mackenzie, R.C.**, 1972, "Differential Thermal Analysis", vol. 2. Applications. Academic Press, London and New York.

**Terpstra R. A., Pex P.P.A.C, De Hires A.H.**, 1995, "Ceramics Processing". Chapman & Hall.

Recibido: febrero 19 de 2007

Aceptado para su publicación: diciembre 17 de 2007



# LOS ÓXIDOS CERÁMICOS COMO MATERIALES TERMOELÉCTRICOS

Por

J.E. Rodríguez\*

## Resumen

Rodríguez, J. F. : Los óxidos cerámicos como materiales termoeléctricos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31(121): 545-555, 2007. ISSN 0370-3908.

Actualmente existe un creciente interés en la investigación de materiales termoeléctricos, generado por las nuevas posibilidades de diseño, preparación y caracterización que ofrece hoy la ciencia de materiales y por la necesidad de encontrar materiales que permitan la fabricación de refrigeradores y generadores eléctricos de estado sólido eficientes y ambientalmente amigables. La eficiencia de un material termoeléctrico es una función de su figura de mérito ( $ZT = S^2T/\rho\kappa$ , donde  $S$  es el coeficiente Seebeck,  $\rho$  la resistividad eléctrica y  $\kappa$  la conductividad térmica). El objetivo central de las investigaciones en materiales termoeléctricos es desarrollar compuestos con altos valores de  $ZT$ . En este sentido, algunas investigaciones están enfocadas hacia la reducción de la conductividad térmica, mientras que otras lo están hacia el incremento del factor de potencia ( $PF = S^2/\rho$ ). Los óxidos cerámicos se encuentran entre los materiales promisorios como termoelementos dada su estabilidad química y sus interesantes propiedades eléctricas y térmicas. Aquí se muestran los resultados de varios estudios los cuales están enfocados hacia la determinación de las propiedades termoeléctricas de los compuestos de  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO),  $La_{2-x}Sr_xCuO_{4+\delta}$  (LSCO) y  $La_{1-x}Sr_xCoO_3$  (LSCoO). Los mejores valores obtenidos para el factor de potencia ( $PF \approx 18 \mu W/K^2 cm$ ) y la figura de mérito ( $ZT \approx 0,5$ ) pueden compararse con los exhibidos por los materiales semiconductores, convencionalmente utilizados hoy en la elaboración de dispositivos termoeléctricos. Esto permite considerar estos óxidos como materiales termoeléctricos promisorios, los cuales podrían funcionar a temperatura ambiente y bajo ella, rango de temperatura en el cual los semiconductores convencionales presentan serias dificultades en su desempeño.

**Palabras clave:** termoelectricidad, coeficiente seebeck, figura de mérito, propiedades de transporte.

## Abstract

Nowadays, there is a renewed interest about thermoelectric materials research, it is driven by both the new possibilities of design and growth that current the materials science offers and by the need of finding materials that allow us to build efficient solid-state coolers and power generators. The performance of a thermoelectric material is a function of its figure of merit ( $ZT = S^2T/\rho\kappa$ , where  $S$  is the Seebeck coefficient,  $\rho$  the electrical resistivity and  $\kappa$  the thermal conductivity). The goal of thermoelectric materials research is to find high- $ZT$  compounds. In this sense, some of these research efforts are focused on minimizing lattice thermal conductivity, while other are focused on increasing the thermoelectric power factor ( $PF = S^2/\rho$ ). In this work, an overview of thermoelectric properties of  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO),  $La_{2-x}Sr_xCuO_{4+\delta}$  (LSCO) and  $La_{1-x}Sr_xCoO_3$  (LSCoO) is presented. The best values obtained for power factor ( $PF \approx 18 \mu W/K^2 cm$ ) and figure of merit ( $ZT \approx 0,5$ ) are comparable to those of conventional semiconductors, which are current used in thermoelectric devices. These results allow us consider these compounds as promissory thermoelectric materials, which could work at room temperature and below it.

**Keywords:** thermoelectricity, seebeck coefficient, figure of merit, transport properties.

# 1. Introducción

Después de varias décadas de lentos progresos los materiales y dispositivos termoeléctricos han recibido una creciente atención gracias a sus potenciales aplicaciones tecnológicas en el campo de la conversión energética, los sensores de temperatura y la refrigeración de estado sólido.

La eficiencia del proceso de conversión energética depende de la diferencia de temperatura entre las junturas que conforman el dispositivo y muy especialmente de las propiedades de transporte de sus materiales, las cuales determinan su figura de mérito termoeléctrica. Este parámetro de desempeño se define en términos de la conductividad térmica, la resistividad eléctrica y el coeficiente Seebeck, en forma adimensional se expresa de la siguiente manera [1, 2, 3]:

$$ZT = \frac{S^2 T}{\kappa \rho} \quad (1)$$

donde  $S$  es el coeficiente Seebeck,  $\rho$  la resistividad eléctrica,  $\kappa$  la conductividad térmica y  $T$  la temperatura absoluta.

Teniendo en cuenta que en un conductor eléctrico, la energía térmica es transportada tanto por los portadores de carga como por las vibraciones de la red, la conductividad térmica total  $\kappa$ , se puede expresar como[4, 5]:

$$\kappa = \kappa_e + \kappa_{ph} \quad (2)$$

donde  $\kappa_e$  y  $\kappa_{ph}$  describen las contribuciones electrónica y fonónica a la conductividad térmica total. Por esta razón  $ZT$  toma la siguiente forma:

$$ZT = \frac{S^2 T}{\rho(\kappa_e + \kappa_{ph})} \quad (3)$$

El problema central de la investigación de materiales termoeléctricos lo constituye la búsqueda de compuestos con altos valores de  $ZT$ . En este sentido, algunos trabajos están enfocados hacia la reducción de la conductividad térmica y muy especialmente la contribución de carácter fonónico, mientras otros lo hacen hacia el incremento del factor de potencia,  $PF$ , el cual está definido como[2]:

$$PF = \frac{S^2}{\rho} \quad (4)$$

Así, altos valores para el factor de potencia y baja conductividad térmica son requisito esencial si se desea mejorar las propiedades termoeléctricas de un determinado material.

Los mejores valores de  $ZT$  los muestran los materiales semiconductores y especialmente los altamente dopados<sup>1</sup>. Esto se debe a que por una parte los materiales aislantes presentan una pobre conductividad eléctrica, mientras que los metales una alta conductividad eléctrica pero bajo coeficiente Seebeck ( $S < 10 \mu V/K$ ). Además, la conductividad térmica en los metales es dominada por electrones y en la mayoría de los casos es proporcional a la conductividad térmica de acuerdo con la ley de Wiedemann-Franz[4, 5]. Como consecuencia de esto es difícil encontrar altos valores de  $ZT$  en los metales, motivo por el cual solamente se les utiliza en la fabricación de sensores de temperatura.

Actualmente, en la fabricación refrigeradores termoeléctricos se utilizan aleaciones semiconductoras de  $Bi_2Te_3$  y  $Sb_2Te_3$ , los cuales producen únicamente moderados niveles de enfriamiento y además son ineficientes si se les compara con los refrigeradores convencionales. Como resultado, este tipo de refrigeradores es utilizado principalmente en aplicaciones en las cuales la confiabilidad y/o la conveniencia son más importantes que la economía. Estas aplicaciones incluyen refrigeradores portátiles, la refrigeración de detectores de infrarrojo y muy especialmente la refrigeración de microprocesadores electrónicos[3, 6]

<sup>1</sup>En los compuestos de  $Bi_2Te_3$ ,  $Sb_2Te_3$  y  $SiGe$ ,  $ZT$  alcanza valores próximos a uno.

Por otra parte, los generadores termoeléctricos son usualmente fabricados a partir de aleaciones de Si-Ge ( $ZT \leq 0,8$ ), estos son ampliamente utilizados por la NASA como fuentes de poder en proyectos relacionados con la investigación del espacio profundo, donde no es posible la utilización de celdas fotovoltaicas.

A temperaturas inferiores a la del ambiente, los mejores materiales termoeléctricos son las aleaciones monocristalinas de bismuto-antimonio[7, 8]. Sin embargo existen algunos estudios enfocados hacia la utilización de materiales superconductores de alta temperatura crítica (HTS) como termoelementos pasivos[9, 10, 11, 12]. Este tipo de dispositivos presenta dificultades dadas principalmente por los valores de su temperatura crítica, su baja densidad de corriente crítica y en muchos casos por su estabilidad química.

La necesidad de encontrar materiales termoeléctricos más eficientes que trabajen a temperatura ambiente y bajo ella, ha hecho que las investigaciones se orienten fuera de los materiales termoeléctricos convencionales. Importantes candidatos son los óxidos cerámicos con estructura tipo perovskita tales como  $La_{1-x}Sr_xCoO_3$  (LSCoO),  $Ca_3Co_4O_9$ ,  $Bi_2Ca_2Co_2O_x$ ,  $Ca_3Co_2O_6$ ,  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO) y  $La_{2-x}Sr_xCuO_{4+\delta}$  (LSCO), las cuales muestran una amplia variedad de útiles e interesantes propiedades de transporte[13, 14].

Las cerámicas de YBCO y LSCO han sido estudiadas desde su descubrimiento, gracias a sus propiedades superconductoras. En ellas las propiedades de transporte dependen de su composición química y en una forma muy especial del contenido y ordenamiento del oxígeno presente en su estructura. Como consecuencia de esto, estas propiedades pueden ser modificadas y optimizadas a través de sustituciones parciales de sus átomos de cobre por otros elementos metálicos tales como Ag, Au, Zn etc. Así como de la alteración de su contenido de oxígeno[15, 16].

Por otra parte, los óxidos de cobalto son reconocidos por mostrar potenciales propiedades termoeléctricas, dada la coexistencia de un comportamiento metálico con un elevado coeficiente Seebeck, este fenómeno se ha observado en compuestos de  $LSCoO$  y  $Na_xCoO_2$ , sin embargo, su origen e interpretación aún no es claro, razón por la cual son el objetivo de muchas investigaciones tanto a nivel teórico como experimental[17, 18, 19].

Todas las actuales investigaciones en materiales termoeléctricos están inspiradas en la propuesta inicial hecha por Slack[2, 3], según la cual se debe sintetizar un compuesto cuya conductividad térmica sea tan baja como la de los vidrios, pero que a la vez sus propiedades eléctricas sean como las de los cristales puros, es decir un material termoeléctrico debe ser un “*electron crystal, phonon glass (ECPG)*”.

En este trabajo se resumen varios estudios cuyo objetivo es determinar las propiedades termoeléctricas de compuestos de YBCO, LSCO y  $LSCoO$ , los cuales de acuerdo con sus propiedades de transporte podrían considerarse como candidatos promisorios para ser utilizados como materiales termoeléctricos.

## 2. Experimental

El método empleado en la preparación de los compuestos cerámicos policristalinos estudiados fue la reacción de estado sólido. En la cual, partiendo de una mezcla estequiométrica de diferentes óxidos precursores ( $Y_2O_3$ ,  $La_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $BaO$ ,  $CoO$ , etc.), después de varias rutinas de mezclado, prensado y calcinación permite obtener compuestos homogéneos con la densidad y estructura requeridas.

La caracterización de materiales termoeléctricos implica la determinación de sus propiedades de transporte eléctrico y térmico, esto se logra a través de mediciones de coeficiente Seebeck, resistividad eléctrica y conductividad térmica, a partir de las cuales es posible determinar su factor de potencia y su figura de merito, parámetros a través de los cuales se evalúa su eficiencia como material termoeléctrico.

En la medición del coeficiente Seebeck comúnmente se utiliza el método diferencial o el integral. Sin embargo, aquí se empleó un método dinámico, el cual es una combinación de los dos. En este, el coeficiente Seebeck absoluto de la muestra se obtiene a partir de la relación lineal existente entre el termovoltaje generado y la respectiva diferencia de temperatura, de tal manera que el coeficiente Seebeck es dado por

la expresión:

$$S(T) = mS_{ter}(T) + S_{Cu}(T) \quad (5)$$

donde  $m$  es la pendiente de la recta  $\Delta V$  vs  $\Delta T$ ,  $S_{Cu}$  el coeficiente Seebeck de los conductores de cobre a través de los cuales se mide el termovoltaje y  $S_{ter}$  el coeficiente Seebeck del termopar con el que se mide  $\Delta T$ , en este caso particular se utilizó un termopar diferencial de cobre-constantan-cobre.

En la medición de la conductividad térmica se utilizó el método estacionario de flujo longitudinal de calor, en el cual la diferencia de temperatura se mide con un termopar diferencial de cobre-constantan-cobre[5]. A fin de reducir las pérdidas de calor vía gases residuales, las medidas se realizan en vacío ( $\approx 10^{-3}mb$ ), esto junto con la estabilidad térmica del sistema permite obtener una seguridad en los datos de  $\kappa(T)$  alrededor de  $0,2W/mK$ .

Por otra parte la resistividad eléctrica se midió utilizando el método estándar de cuatro puntas. Las propiedades estructurales y morfológicas de las muestras se determinaron mediante análisis de difracción de rayos-x y microscopía electrónica de barrido (SEM) respectivamente.

### 3. Compuestos de YBCO

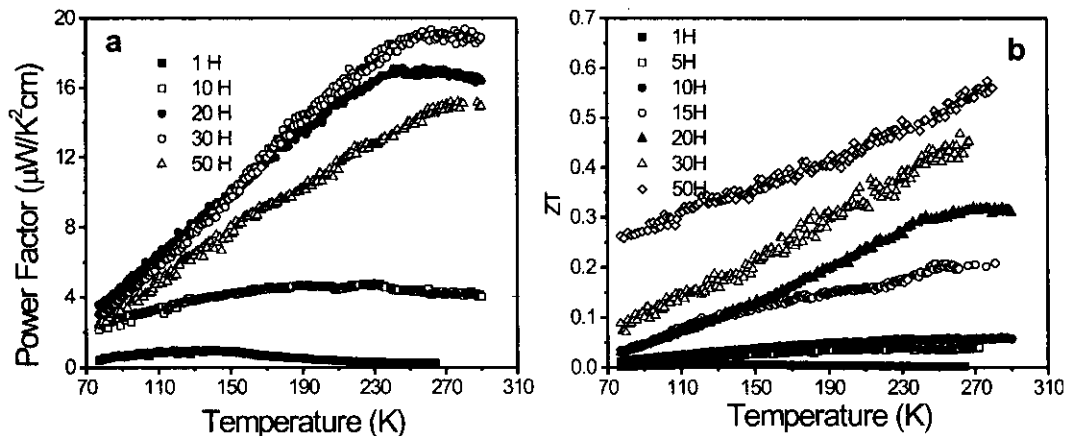


Figura 1: Comportamiento del factor de potencia,  $PF$  (a) y la figura de merito adimensional,  $ZT$  (b) en función de la temperatura para compuestos de  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , sometidos a tratamientos térmicos de diferente duración a  $600^{\circ}C$ .

Dadas las propiedades de transporte de los compuestos de  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  y especialmente teniendo en cuenta que en estas cerámicas la magnitud del coeficiente Seebeck y las propiedades térmicas son fuertemente sensibles a la deficiencia de oxígeno, es posible “manipular” sus propiedades de transporte a fin de optimizar sus propiedades termoeléctricas. Lo cual implica, de acuerdo con la ecuación 3, buscar altos valores para el coeficiente Seebeck, bajos valores para la resistividad eléctrica y la conductividad térmica (es decir buscar un material con propiedades de “ECPG”).

En este sentido, se prepararon muestras policristalinas de  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , por el método estándar de reacción sólida, para las cuales el estudio de difracción de rayos-x y SEM mostraron respectivamente una composición monofásica de estructura YBCO-123 y una adecuada estructura granular.

La primera ruta explorada en la alteración del contenido de oxígeno consistió en someter las muestras a procesos térmicos de diferente duración a una temperatura de  $600^{\circ}C$  en vacío ( $\approx 10^{-3}mb$ ), esto se hace teniendo en cuenta que a esta temperatura se incrementan los procesos de absorción y desorción de oxígeno[20, 21].

Como resultado de este tratamiento se obtuvieron muestras cuyo coeficiente Seebeck es positivo con una débil dependencia con la temperatura, el cual se incrementa con la duración del tratamiento térmico. Su magnitud varía desde  $30\mu V/K$  en el caso de las muestras recocidas durante una hora hasta alcanzar valores próximos a  $1000\mu V/K$  en el caso de las muestras recocidas durante 50 horas, las cuales exhiben una estructura cristalina tetragonal y un comportamiento eléctrico de carácter semiconductor.

El comportamiento del coeficiente Seebeck con la temperatura se puede describir mediante una relación de la siguiente forma[22]:

$$S = AT + B/T \quad (6)$$

donde  $T$  es la temperatura absoluta y  $A$  y  $B$  son parámetros de ajuste. El término  $AT$  representa la contribución de difusión de portadores al coeficiente Seebeck, mientras que  $B/T$  involucra otras contribuciones tales como "phonon drag", "diffusion mass enhancement" etc[23].

Ajustando los datos experimentales a la expresión anterior se encontró que la contribución de difusión,  $A$ , se incrementa con el tiempo de recocido (ver cuadro 1), sugiriendo que la densidad de portadores decrece con la duración del tratamiento térmico, lo cual está de acuerdo con el comportamiento observado en la conductividad térmica y resistividad eléctrica. Puesto que esta última se incrementa también con el tiempo

Cuadro 1: Comportamiento del parámetro de difusión,  $A$  en  $S = AT + B/T$ , en función del tiempo de "annealing".

Muestra	5Horas	10Horas	15Horas	20Horas	50Horas
$A(\mu V/K^2)$	0.71(1)	0.95(8)	2.37(1)	3.21(1)	3.32(1)

de recocido, cambiando su comportamiento de metálico a semiconductor; mientras que la conductividad térmica decrece desde valores cercanos a  $4W/mK$  hasta valores inferiores a  $1W/mK$  en el caso de las muestras sometidas a prolongados tratamientos térmicos.

Por otra parte, el factor de potencia ( $PF = S^2/\rho$ ) muestra un comportamiento lineal con la temperatura alcanzando un valor máximo cercano a  $18\mu W/K^2cm$  en el caso de las muestras tratadas durante 30 horas, mientras la figura de merito adimensional,  $ZT$  alcanza valores cercanos a 0.5 a temperaturas próximas a la del ambiente (ver figura 1).

Otra ruta explorada consistió en someter las muestras a procesos de enfriamiento rápido (quenching) desde diferentes temperaturas, ( $500^{\circ}C$ ,  $600^{\circ}C$ ,  $700^{\circ}C$ ,  $800^{\circ}C$  y  $920^{\circ}C$ ). Aquí, al igual que en el caso anterior el coeficiente Seebeck es positivo en todo el rango de temperatura estudiado y su magnitud se incrementa con la temperatura de "quenching" tomando valores que van desde  $10\mu V/K$  para las muestras con alto contenido de oxígeno hasta alcanzar  $500\mu V/K$  en el caso de las muestras tratadas a  $920^{\circ}C$ .

La conductividad térmica en estas muestras tiene un comportamiento lineal con la temperatura y su magnitud decrece con la temperatura de "quenching", tomando valores desde  $5W/mK$  hasta  $0,5W/mK$ .

La componente electrónica a la conductividad térmica total ( $\kappa_{tot} = \kappa_e + \kappa_{ph}$ ) se calculó asumiendo el modelo de Widemann-Franz,  $L(T) = \kappa(T)/\sigma(T)T$ [4, 5, 24], en la región donde la resistividad eléctrica presenta un comportamiento de carácter metálico con la temperatura y utilizando valores para el número de Lorentz,  $L(T)$ , determinados para los compuestos de YBCO[25, 26]. En todos los casos  $\kappa_e$  es menor que el 10% de la conductividad térmica total, lo cual es un comportamiento típico en estos compuestos, además,  $\kappa_e$  decrece con la reducción del contenido de oxígeno (ver cuadro 2), sugiriendo que la densidad de portadores de carga decrece también. Esto concuerda con el comportamiento del coeficiente Seebeck y la resistividad eléctrica, pues esta se incrementa con la temperatura de recocido desde valores cercanos a  $1m\Omega cm$  hasta  $80m\Omega cm$  en el caso de muestras con bajo contenido de oxígeno.

La figura de merito adimensional (ver figura 2a), calculada a partir de las medidas de resistividad eléctrica, coeficiente Seebeck y conductividad térmica, alcanza valores de 0.3 para el caso de las muestras tratadas a  $920^{\circ}C$ .

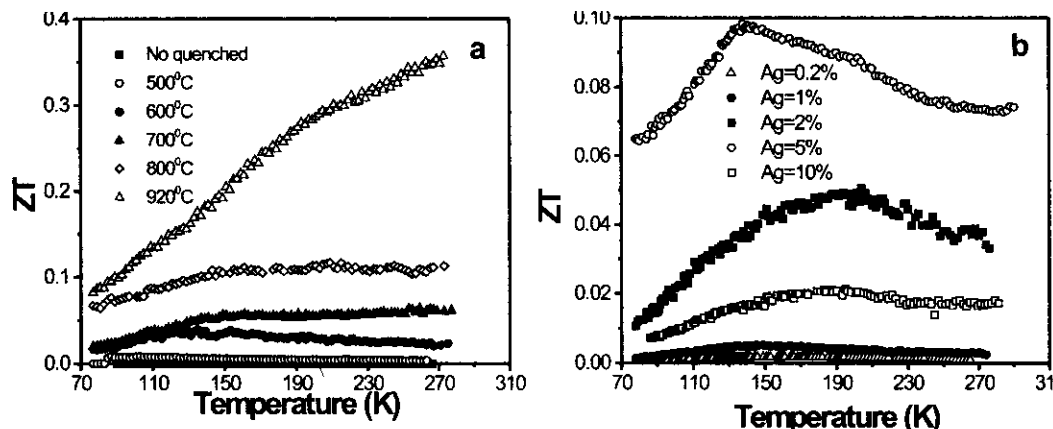


Figura 2: Figura de mérito adimensional,  $ZT$ , para compuestos de YBCO sometidos a procesos de enfriamiento rápido desde diferentes temperaturas (a) y  $Ag - YBCO$  para diferentes niveles de dopado con plata (b).

Cuadro 2: Comportamiento (a  $290K$ ) de la contribución electrónica a la conductividad térmica total en función de la temperatura de “quenching”, para compuestos de YBCO.

Muestra	No quenched	$500^{\circ}C$	$600^{\circ}C$	$700^{\circ}C$	$800^{\circ}C$	$920^{\circ}C$
$\kappa_e(W/mK)$	0.669(4)	0.326(2)	0.312(3)	0.101(2)	0.068(2)	0.013(2)

A fin de modificar directamente la estructura electrónica y además, el contenido de oxígeno se prepararon compuestos policristalinos con una composición nominal de  $YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_{7-\delta}$  ( $0 < x \leq 10\%$ ), los cuales fueron sometidos adicionalmente a un tratamiento térmico en vacío a una temperatura de  $600^{\circ}C$ .

Las muestras no dopadas muestran una resistividad eléctrica cercana  $3m\Omega cm$ , la cual se incrementa hasta alcanzar  $10m\Omega cm$  en el caso de las muestras altamente dopadas ( $Ag = 10\%$ ). El comportamiento de  $\rho(T)$  cambia de metálico a semiconductor cuando el contenido de Ag se incrementa. Es importante notar que para bajos niveles de dopado las propiedades eléctricas mejoran, esta tendencia es comúnmente observada en estos compuestos[27, 28, 29, 30].

El coeficiente Seebeck es positivo en todo el rango de medida y su magnitud se incrementa con el contenido de plata, alcanzando valores máximos cercanos a  $160\mu V/K$  en el caso de las muestras con altos contenidos de plata. Este comportamiento sugiere que la densidad de portadores de carga es afectada tanto por la adición de plata como por el tratamiento térmico.

Por otra parte, el comportamiento de la conductividad térmica para todas las muestras presenta una débil dependencia con la temperatura y su magnitud decrece con el contenido de plata. Lo cual es una indicación del efecto que este tipo de dopado y los procesos de recocido tienen sobre el camino libre medio fonónico sobre la densidad de portadores de carga.

La figura de mérito adimensional (ver figura 2b) muestra valores próximos a 0.1, en el caso de las muestras con el 5% de plata. El comportamiento de las propiedades de transporte sugiere que la densidad de portadores de carga y los mecanismos dispersores pueden ser alterados mediante la modificación del contenido de oxígeno presente en este tipo de compuestos, lo cual abre la posibilidad de utilizarlos como termoelementos.

#### 4. Compuestos de LSCO

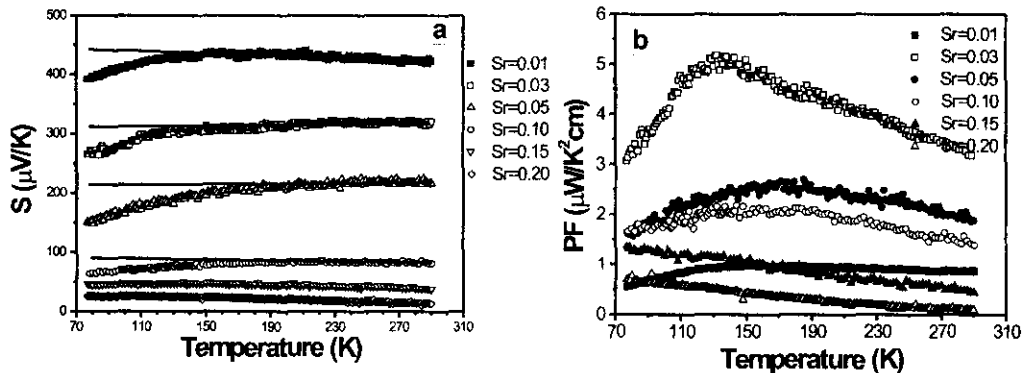


Figura 3: Comportamiento del coeficiente Seebeck (a) y el factor de potencia,  $PF$ , (b) en función de la temperatura para muestras de  $LSCO$  con diferentes de estroncio.

Los compuestos de  $La_{2-x}Sr_xCuO_{4+\delta}$  (LSCO) pertenecen a la familia de las perovskitas, tienen una estructura cristalina tetragonal, con un solo plano de  $CuO_2$  separado por planos de lantano-oxígeno  $La - O$ . Sus propiedades eléctricas y térmicas dependen tanto de su composición química como del contenido de oxígeno presente en ellas. En estos compuestos la estructura electrónica depende críticamente del contenido de estroncio, permitiendo así optimizar sus propiedades de transporte a fin de mejorar sus propiedades termoelectricas[15, 31].

El coeficiente Seebeck para conductores desordenados, donde la conducción eléctrica es dada por "hopping" de rango variable (VRH) entre estados localizados en el "gap", en algunos casos no es simple de analizar. En ellos se espera que  $S(T)$  muestre un comportamiento intermedio entre el de los metales y el de los semiconductores y que varíe con la temperatura como  $T^{1/2}$  para el caso tridimensional y  $T^{1/3}$  en el caso bidimensional[32, 33].

De otra parte, según el modelo de Hubbard donde el "hopping" correlacionado está presente el coeficiente Seebeck se espera de gran magnitud e independiente de la temperatura. Entonces para explicar este tipo de dependencia se propone el uso de la fórmula de Heikes, según la cual el coeficiente Seebeck esta dado por la expresión[34]:

$$S = \pm \frac{\kappa_B}{|e|} \left( \ln(2) + \ln \left( \frac{1-n}{n} \right) \right) \quad (7)$$

donde  $n$  es el número de portadores de carga por sitio de  $Cu^{2+}$ ,  $\kappa_B$  la constante de Boltzmann y  $e$  la carga del electrón. Esta expresión da cuenta tanto de la independencia del coeficiente Seebeck con la temperatura como de su decremento de la concentración de átomos de Sr.

Utilizando el método de reacción sólida se prepararon muestras policristalinas con una composición nominal  $La_{2-x}Sr_xCuO_{4+\delta}$  con  $(0 < x \leq 0,2)$ [35]. Su coeficiente Seebeck es positivo en todo el rango de medida indicando la existencia de portadores de carga mayoritarios positivos, su magnitud decrece con el contenido de Sr desde valores cercanos a  $400\mu\text{V/K}$  en el caso de las muestras con Sr=0.01 hasta  $30\mu\text{V/K}$  para las muestras con Sr=0.2. Entre 160K y 300K,  $S(T)$  es independiente de la temperatura ajustándose al modelo propuesto por Heikes. Las líneas sólidas en la figura 3a muestran el mejor ajuste de los datos experimentales a la ecuación 7. Este ajuste permite calcular el número de portadores,  $n$ , por sitio de  $Cu^{2+}$ , el cual se incrementa monótonicamente con el nivel de estroncio presente(ver tabla 3).

A temperatura ambiente la resistividad eléctrica cambia de  $2,4\Omega\text{cm}$  en el caso de las muestras con bajos contenidos de Sr, hasta alcanzar  $2m\Omega\text{cm}$  en el caso de las muestras con Sr=0.2, igualmente, su

Cuadro 3: Comportamiento del número de portadores de carga por sitio de  $Cu^{2+}$ ,  $n$ , en función del contenido de estroncio para muestras de  $La_{2-x}Sr_xCuO_{4+\delta}$

Muestra	Sr=0.01	Sr=0.03	Sr=0.05	Sr=0.1	Sr=0.2
$n$	0.0132(1)	0.0474(1)	0.141(1)	0.437(1)	0.618(1)

comportamiento cambia de semiconductor a metálico a medida que el nivel de estroncio se incrementa, lo cual concuerda con el comportamiento decreciente del coeficiente Seebeck.

A partir de las medidas de coeficiente Seebeck y la resistividad eléctrica se determinó el factor de potencia termoeléctrico, el cual muestra valores máximos de  $5 \mu W/K^2 cm$  al rededor de 150K en el caso de las muestras con Sr=0.03 (ver figura 3b).

## 5. Cobaltitas de Lantano (LSCoO)

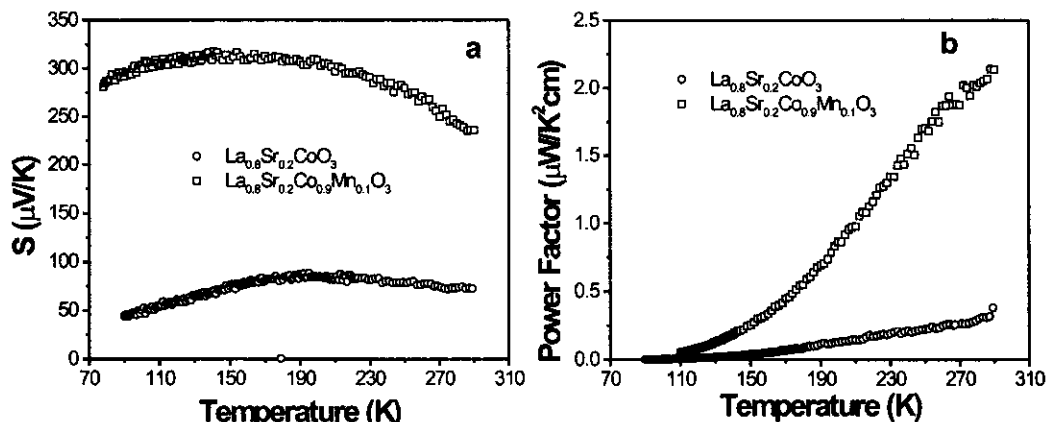


Figura 4: Coeficiente Seebeck (a) y factor de potencia (b) para compuestos de  $La_{0.8}Sr_{0.2}Co_{1-x}Mn_xO_3$  con  $x = 0$  y  $x = 0,1$  respectivamente.

El creciente interés en los óxidos de cobalto es motivado por su potencial utilización como material termoeléctrico, dado por su estabilidad química y de una forma muy especial por la coexistencia de la metalicidad junto con un elevado coeficiente Seebeck<sup>2</sup>. La presencia de esta coexistencia no es clara aún. Para su interpretación se han propuesto dos modelos. El primero de ellos, toma en cuenta la degeneración de los estados de spin asociados con las diferentes valencias que toma cobalto en estos materiales. Mientras el segundo propone la presencia de dos bandas de conducción: una de portadores rápidos responsable de la metalicidad del compuesto, la cual coexiste con otra banda angosta de portadores pesados en la cual yace el nivel de Fermi, cerca del cual la densidad de estados presenta un pico pronunciado, este sería responsable de los grandes valores observados en la magnitud del coeficiente Seebeck<sup>3</sup>[36, 37, 38].

Diferentes tipos de sustituciones de los cationes de estos óxidos se han ejecutado con el ánimo de investigar sus propiedades de transporte y de mejorar sus propiedades termoeléctricas. Entre ellas, sustituciones parciales de  $Co$  por átomos de manganeso han tratado de optimizar tanto la densidad de portadores de carga como el ancho del "gap". En esta dirección se prepararon muestras policristalinas

<sup>2</sup>Es importante notar que de acuerdo con la teoría convencional, el coeficiente Seebeck se incrementa con el incremento de la magnitud de la resistividad eléctrica. Razón por la cual, estas dos propiedades juntas son muy difíciles de conseguir en los metales y semiconductores convencionales.

<sup>3</sup>El coeficiente Seebeck es una función directa de la variación de la densidad de estados con la energía ( $\frac{\partial D}{\partial E}$ ).



de  $La_{0,8}Sr_{0,02}Co_{1-x}Mn_xO_3$ , con  $Mn = 0$  y  $Mn = 0,1$ . Se encontró que su resistividad eléctrica muestra un comportamiento de carácter semiconductor, tomando valores desde  $10^{-2}\Omega cm$  a 290 K hasta alcanzar valores próximos a  $1\Omega cm$  en el caso de las muestras de  $La_{0,8}Sr_{0,2}Co_{0,9}Mn_{0,1}O_3$ . El coeficiente Seebeck es positivo en todo el rango estudiado mostrando un comportamiento aproximadamente independiente de la temperatura, su magnitud presenta valores cercanos a  $100\mu V/K$  para las muestras sin  $Mn$  y  $300\mu V/K$  para las muestras con  $Mn = 0,1$ . Por otra parte, el factor de potencia obtenido a partir de los datos de resistividad eléctrica y coeficiente Seebeck muestra valores cercanos a  $2\mu W/K^2 cm$  a temperaturas cercanas a la del ambiente.

## 6. Conclusiones

- Todos los compuestos estudiados mostraron un coeficiente Seebeck positivo, indicando que el transporte eléctrico mayoritario es vía huecos. La reducción en la densidad de portadores de carga da lugar a un incremento en la magnitud del coeficiente Seebeck, la cual alcanza valores del orden de  $10^2\mu V/K$ , igualmente, la reducción de la conductividad térmica está asociada con este decrecimiento y a la vez con el incremento de los centros de dispersión fonónica originados por los cambios en el ordenamiento del oxígeno, producto de los procesos térmicos.
- Los procesos de alteración del contenido de oxígeno en los compuestos de YBCO condujeron al mejoramiento de sus propiedades termoeléctricas, en ellos la figura de mérito adimensional alcanzó valores que van desde 0.1 hasta 0.5 los cuales son comparables con los típicos de los materiales semiconductores convencionales. Esto es el resultado de los cambios ocurridos en las estructuras electrónica y fonónica generados por los procesos térmicos utilizados, así como por los cambios estructurales dados por la sustituciones de Cu por átomos de plata.
- El contenido de estroncio en los compuestos de LSCO controla la densidad de portadores de carga, la variación de este parámetro permitió alcanzar valores en el factor de potencia de hasta  $5\mu W/K^2 cm$ , en el caso de las muestras con  $Sr = 0,3$ .
- El comportamiento de las propiedades de transporte de los compuestos de YBCO y LSCO muestran que este tipo de compuestos pueden ser optimizados a fin de ser utilizados como potenciales materiales termoeléctricos.
- Teniendo en cuenta su estabilidad química, así como el comportamiento de sus propiedades de transporte los óxidos de cobalto son candidatos excepcionales para ser utilizados como materiales termoeléctricos, si sus propiedades eléctricas y térmicas son optimizadas en esta dirección.

*Si estas aproximaciones al viejo problema de la termoelectricidad producen avances significativos, entonces será posible en un futuro cercano, generar electricidad a partir de las fuentes térmicas de desecho como las existentes en la casa y el automóvil. De la misma manera, los refrigeradores de estado sólido reemplazarán al ruidoso y contaminante refrigerador convencional.*

## Agradecimientos:

Este trabajo fue soportado por la *División de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (DIB)*.

## Referencias

- [1] G. S. Nolas, J. Sharp and H. J. Goldsmid, *Thermoelectrics, basic principles and new materials developments*, Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [2] D. M. Rowe, *CRC handbook of thermoelectrics*, CRC Press, Boca Raton Fl, 1995.
- [3] G. Mahan, B. Sales and J. Sharp, *Physics Today* **50**(1997)42.
- [4] J. M. Ziman, *Electrons and phonons*, Oxford University Press, Oxford, 1960.
- [5] J.E. Parrott and A. Stuckes, *Thermal conductivity of solids*, Pion Limited, London, 1975.
- [6] J.E. Rodriguez, *Revista momento* **28**(2004)p.3-14.
- [7] D. Cadavid and J.E. Rodriguez, *Physica Status Solidi (c)* **2**(2005)3677-3680.
- [8] J.E. Rodriguez and D. Cadavid, *Proc. International Conference on Thermoelectrics 2005 (ICT2005)*, Clemson SC. USA.
- [9] M. G. Fee, *Appl. Phys. Lett.* **62**(1993)1161.
- [10] H. J. Goldsmid, K. K. Gapinathan, D. N. Matthews, K. N. Taylor and C. A. Baird *J. Phys. D* **21**(1988)344.
- [11] Z. M. N. Dashevskii, A. Sidorenko, N. A. Tsvetkov, C. Y. Skidarov and A. B. Mosolov, *Supercond. Sci. Technol.* **5**(1992)693.
- [12] M. Casart and J. P. Issi, *CRC Handbook of thermoelectrics*, Rowe D. M. CRC Press Boca, Raton Fl, 1995, chap. 30.
- [13] Y. Miyazaki, *Solid State Ionics* **172**(2004)463.
- [14] J. Hejtmanek, M. Veverka, K. Knizek, H. Fujishiro, S. Hebert, Y. Klein, A. Maignan, C. Bellouard and B. Lenior, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **886**(2006)P.07.1.
- [15] C.P. Poole, H. Farach and R. Creswick, *Superconductivity*, Academic Press, London, 1995.
- [16] A.B. Kaiser and C. Uher, *Handbook of Applied Superconductivity*, ed. B. Seeber Institute of Physics Publishing, Bristol, 1998.; A.B. Kaiser and C. Uher, *Studies of high Temperature Superconductors*, Vol.7 ed. Narlikar A.V. (Nova Science, New York)P.353.
- [17] A.J. Zhou, T.J. Zhu and X.B. Zhao, *Mat. Sci. and Eng. B*, In press(2006).
- [18] X. Zhang, X.M. Li, T.L. Chen and L.D. Chen, *J. Cryst. Growth* **286**(2006)1-5.
- [19] S. Yamanaka, H. Kabayashi and K. Kurosaki, *J. Alloys and Compounds* **349**(2003)321.
- [20] J.E. Rodriguez, *Physica Status Solidi (c)* **2**(2005)3606-3608.
- [21] J.E. Rodriguez, *Proc. International Conference on Thermoelectrics 2005 (ICT2005)*, Clemson SC. USA. P.31.
- [22] A.B. Kaiser and C. Uher, *Handbook of Applied Superconductivity*, ed. B. Seeber Institute of Physics Publishing, Bristol, 1998.
- [23] J. Giraldo, J.E. Rodriguez and A. Mariño, *Phys. Rev. B* **56**(1997)2383.

- [24] N.W. Ashcroft and N.D. Mermin, *Solid State physics*, Sounders College publishing, Orlando Fl.1976.
- [25] K. Takenaka, Y. Fukuzumi, K.Mizuhshi and S. Ushida,*Phys. Rev. B***56**(1997)5654.
- [26] Z.A. Xu, Y.Zhang, N.P. Ong, K.Krishana, R.Gagnon and L.Taillefer, *Physica C***341-348**(2000)1833.
- [27] D.S. Misra, B. John, R. Pinto, L.S. Mombasawala and S.B. Palmer, *Physica C***248**(1995)276.
- [28] H. Salamati, A.A. Babaeai-Brojeni and M. Safa,*Supercond.Sci. Thecnol.***14**(2001)816.
- [29] C.H. Cheng and Y. Zhao, *J. Appl. Phys.***93**(2003)2292.
- [30] M.Tepe, I.Avci, H.Kocoglu and D. Abukay, *Solid State Commun.* **131**(2004)319.
- [31] M. Cyrot and D. Pavuna, *Introduction to Superconductivity and High- $T_C$  materials*, World Scientific, USA (1992).
- [32] N. Van Lien and D. Tai, *Phys. Lett. A*, **A261**(1999)108-113.
- [33] R. Kishore and A.K. Mishra, *Physica C***408-410**(2004)227.
- [34] J.F. Kwak, G. Beni and P.M. Chaikin,*Phys. Rev.***B13**(1972)647.
- [35] J.E. Rodriguez, *Mater.Res. Soc. Symp.Proc.* **886**(2006)P.05.1-05.5
- [36] P. Boullay, *Chem.Mater.***8**(1996)1482.
- [37] D.J.Singh, *Phys.Rev. B***61**(2000)13397.
- [38] W. Koshibae, K. Tsutsui and S. Maekawa, *Phys.Rev. B***62**(2000)6869.

# SITUACIÓN DE LOS INVERTEBRADOS ÁCUATICOS INTRODUCIDOS Y TRANSPLANTADOS EN COLOMBIA: ANTECEDENTES, EFECTOS Y PERSPECTIVAS

Por

Ricardo Álvarez-León<sup>1</sup> & Francisco de Paula Gutiérrez-Bonilla<sup>2</sup>

## Resumen

Álvarez-León, R. & F. de P. Gutiérrez-Bonilla. Situación de los invertebrados acuáticos introducidos y transplantados Colombia: antecedentes, efectos y perspectivas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31** (121): 557-574, ISSN 0370-3908.

Se incluye el estado actual de las especies de tremátodos, moluscos y crustáceos introducidos a Colombia, analizando la situación de su distribución, el manejo, los impactos y la situación de estas actividades ilícitas que atentan contra la biodiversidad del país. Las 20 introducciones incluyen seis tremátodos, tres moluscos y once crustáceos; los tres trasplantes incorporan un molusco y dos crustáceos. No se han detectado casos de hibridización por las introducciones y trasplantes entre las diferentes cuencas hidrográficas, pero sí su presencia en las granjas de producción acuícola, y en aguas libres. Se discute el futuro de las especies nativas.

**Palabras clave:** acuicultura, pesquerías, especies exóticas, legislación, Colombia

## Abstract

The current state of the species of trematodes, mollusks and crustaceans introduced and transplanting in Colombia, is included, analyzing the situation of their distribution, the handling, the impacts and the situation of these illicit activities that attempt against the biodiversity of the country. The 20 introductions include six trematodes, three mollusks and eleven crustaceans; the three transplantin, incorporate one mollusks and two crustaceans. It exists between these last several cases of hybridizations for introduction and transplanting among the different basins hydrographic, as well as their presence in the aquaculture farms and in free waters, it increases even more the future of the native species.

**Key words:** aquaculture, fisheries, exotic species, legislation, Colombia.

<sup>1</sup> Fundación Maguaré. Manizales (Caldas) Colombia, alvarez\_leon@hotmail.com.

<sup>2</sup> Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá D. C. (Colombia), fgutierrez\_bonil@hotmail.com.

## Introducción

El tema de las especies exóticas es complicado, contradictorio y poco conocido en América tropical. La mayoría de las especies han sido introducidas porque son útiles y necesarias, por ejemplo, las plantas cultivadas y ornamentales y animales domésticos (incluyendo mascotas). Aunque existen controles legales, algunas especies introducidas escapan a éstos y una vez introducidos, expanden su distribución y abundancia, convirtiéndose en plagas o malezas agrícolas y/o bien desplazando especies nativas por competencia, depredación o alteración de los ecosistemas que les sirven de hábitat (Ojasti, 2001). Aparte de las introducciones intencionales son muchas las especies que ingresan de manera fortuita en medio de víveres y mercancías importadas y algunas logran establecerse y convertirse en especie invasora. A manera de ejemplo, se ha estimado que a diario las aguas de lastre de los barcos, transportan entre 3.000 y 4.000 especies de las cuales unas 500 se han establecido en nuevas localidades. Igualmente, se calcula que un barco transporta en promedio cuatro millones de organismos.

Existen muchos casos de estudio sobre los posteriores efectos de introducciones de moluscos y uno que es relevante, es lo ocurrido en la cuenca del río de La Plata con los bivalvos *Limnoperna fortunei* y *Corbicula fluminea*. Respecto al primero, fue detectado por primera vez en la costa argentina de La Plata en 1991 y su densidad era de 5 ind. / m<sup>2</sup>. En mayo de 1992, ésta pasó a 31.200 y en 1993 a 82.000, más del doble que la del año anterior. Igual ocurre con *C. fluminea*, que también se ha convertido en invasora (Ituarte, 1981).

La naturaleza en últimas siempre ha sido global y dinámica. Algunos animales están en constante movimiento: las aves de paso sobrevuelan varios continentes, las ballenas nadan desde los polos al Ecuador y viceversa, e incluso ciertas especies de mariposas recorren miles de kilómetros durante su vida. Ni siquiera las plantas permanecen absolutamente quietas: sus semillas, son transportadas por el viento o por las aves, recorriendo grandes distancias.

Las invasiones biológicas son un proceso natural, pero las actividades humanas en los últimos 150 años han acelerado su tasa de ocurrencia, por lo que una parte de la biota terrestre parece haber entrado en un proceso de homogeneización, raramente observado y registrado en la historia biológica de la tierra. En esta circunstancia confluyen muchas causas: la ampliación de la frontera agrícola, el predominio del monocultivo, la deforestación, la desertización, la fragmentación de hábitat, las necesida-

des alimentarias asociadas al crecimiento demográfico, el cambio climático, la contaminación, la sobreexplotación de los recursos, y hacia el futuro la utilización de los organismos vivos modificados (OVM's) de fauna y flora (en 1999, la agricultura con OVM's tenía bajo su uso en el planeta 40 millones de hectáreas, en el 2002, aumentó a 50).

A través de los años, la humanidad intencional o accidentalmente ha movido o desplazado especies de sus áreas naturales a hábitats en donde nunca antes estuvieron presentes. Muchas de estas especies se han establecido y acoplado, mantienen poblaciones, y llegan a ser parte constitutiva de los ecosistemas a donde se han llevado. De hecho, existe toda una comunidad de animales y plantas que siguen a los humanos a donde quiera que éstos vayan.

Actualmente, entre 10<sup>2</sup> y 10<sup>4</sup> especies exóticas han sido documentadas en muchos países y su número se incrementa rápidamente (Lodge, 1993). En el mundo se estima que el 39% de las extinciones conocidas de animales desde el siglo XVI se deben a la introducción de especies.

En las aguas interiores de 140 países se han registrado entre algas, plantas, crustáceos, moluscos y peces, introducciones de 1354 especies (Welcomme, 1981). La mayoría de las introducciones marinas son producidas por el "fouling" de los barcos, aunque hay otras formas de introducción como las debidas a los escapes de especies cultivadas en granjas y las destinadas a ornamentación en acuarios, ya sea de agua dulce o marina, y las ocasionadas por la pesca deportiva (Benson *et al.*, 2001).

En el ámbito de la Comunidad Andina de Naciones –Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela–, al 2001, se han identificado 227 especies exóticas invasoras, que incluyen insectos, plantas y vertebrados. A su vez, entre Chile, Colombia, Ecuador y Perú a 1999, se habían introducido entre especies marinas, continentales y terrestres 955 especies. Algunas de estas especies, coinciden con las 100 identificadas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), como exóticas invasoras.

Discutir la bondad de las actividades de introducción o trasplante de especies y la posibilidad de eventos invasivos, a través de información primaria y secundaria, permitirá ofrecer un balance del compromiso sobre lo que tales acciones pueden estar significando frente a la diversidad biológica en Colombia y, tangencialmente, a escala global.

La introducción de especies es una actividad que se remonta a las antiguas civilizaciones y siempre ha acompañado los procesos de colonización. Los primeros registros de introducción de especies en aguas continentales

datan del siglo XVI (**Ruiz**, 1997) aunque en aguas marinas el movimiento de ostras (*Crassostrea angulata* y *C. gigas*) ocurrió hace seis centurias (**Carlton**, 1985). Los diferentes análisis, sin embargo, permiten demostrar que en los últimos 150 años el proceso se ha dinamizado enormemente (**Fernando**, 1991), lo cual estaría asociado al aumento de la densidad poblacional y a la necesidad creciente de recursos alimenticios, pero con el peligro de causar la pérdida de diversidad biológica. Refiriéndose a estas acciones de introducción, **Courtenay** (1993) propuso la expresión “contaminación biológica” y efectivamente, estadísticas recientes demuestran que es la segunda causa de pérdida de la diversidad biológica.

El no planificar las introducciones o los trasplantes y prever sus consecuencias, nos está exponiendo a alteraciones genéticas, que nunca se han valorado y que están parcialmente documentadas entre otros autores por **Elton** (1958); **Laycock** (1966); **Welcomme** (1970; 1981; 1988; 1989); **Courtenay** (1979); **Crossman** (1984); **FAO** (1984); **Kohler y Courtenay** (1986) y **Fergusson et al.** (1989).

Los procesos de hibridación pueden ser divididos en dos categorías: (1) la intraespecífica, que es el cruce entre cepas, poblaciones, razas y poblaciones geográficas dentro de una especie; y (2) la interespecífica: cruces entre especies (**Hubbs**, 1955; **Schwartz**, 1972).

La hibridación entre especies nativas y especies emparentadas introducidas (**Moyle**, 1976; **Svardson**, 1979); representa serias consecuencias a los recursos genéticos. El resultado más frecuente es la invasión genética sobre las especies nativas. El gran número de hibridaciones del cual se tiene noticia en Florida fue producida por acuaristas o por la industria de peces ornamentales (**Courtenay y Robins**, 1979) teniéndose veinte especies exóticas y cinco híbridas que han establecido poblaciones reproductivas.

Aunque se conoce muy poco sobre el impacto de las introducciones de los invertebrados en los genomas de las especies controladas, donde se practica el cultivo intensivo y la domesticación, por ejemplo, el cambio genético es inevitable (**FAO**, 1984). Las prácticas de selección de reproductores deben proyectarse de modo que se evite la selección y la consanguinidad inadvertidas y aún más severos deberán ser los controles, si la meta es liberar sus descendientes al medio natural (**FAO**, 1981).

Actualmente, se puede afirmar que los ecosistemas continentales y estuarinos son los más alterados por la “contaminación biológica” (**Moyle y Leidy**, 1992; **Allan y Flecker**, 1993) y ante estos indicios a finales de la década de los 70 se inició la generación de una base de datos

sobre especies introducidas (**FAO**, 1984). En moluscos la mayor frecuencia fue registrada para cinco especies: *Crepidula fornicata*, *Crassostrea gigas*, *Pomacea canaliculata*, *Tridacna derasa* y *Trochus niloticus*. Según **Welcomme** (1988) el 10% de las introducciones son debidas a acciones involuntarias o denominadas “introducciones accidentales”, siendo la fracción restante acciones deliberadas.

**Courtenay** (1993) postula que las introducciones generan impactos a la biota nativa, que inicialmente pueden ser muy leves, pero que a largo plazo llegan a causar extinción de especies nativas por competencia de recursos, depredación, transferencia de patógenos, hibridación y alteración de hábitat. **OTA** (1993) en una revisión sobre el tema de la fauna y la flora introducidas en EUA, registra la ocurrencia de 4.500 especies, que están libremente esparcidas y un 20% de éstas han originado serios problemas económicos y ecológicos.

Estas aparentes contradicciones entre las concepciones previas a la introducción y la realidad resultante es lo que ha llevado a autores como **Fryer** (1959; 1990), **Fryer e Iles** (1972) y **Williamson y Fitter** (1996) a mostrarse escépticos frente a los modelos predictivos sobre las invasiones biológicas, pues las variables biológicas (comportamiento, reproducción, alimentación) pueden volverse incontrolables, impredecibles e irrepresentables en un modelo.

A través de sus estudios ha podido determinar que las especies utilizadas en acuicultura eventualmente pasan al medio natural y por lo tanto cualquier introducción con fines de cultivo es una adición potencial a la fauna silvestre. De ahí, que en algunos de los Estados de Norteamérica, esté prohibida la introducción o cultivo de algunas especies por su marcada competencia, con especies nativas **Welcomme**, 1988.

**Contreras y Escalante** (1984), evaluando los impactos de las especies alienígenas o introducidas en México, realiza, una discusión técnica que le permite concluir al igual que **Dahl** (1958) que los argumentos de “existencia de nichos vacíos”, con el cual se introducen especies: –es un concepto errado, pues las poblaciones de peces dentro de la comunidad juegan un papel y la suma de sus actividades y respuestas es lo que se puede considerar un nicho–.

Sin embargo, si las especies están ausentes de una comunidad, no se puede aseverar que existan nichos vacíos. Puede haber niveles tróficos vacantes, pero nunca nichos vacantes, en consecuencia el estudio del acoplamiento entre las especies introducidas y las nativas ha

cochado como concepto ecológico y de muestreo una gran validez, pues permite ver el grado de adaptabilidad y dinámica lograda o no por las especies alóctonas sobre las poblaciones nativas (Diamond, 1975; Drake, 1983; 1988; 1990; 1991; Drake *et al.*, 1989; Hugueny *et al.*, 1996; Belyea y Lancaster, 1999).

Para Colombia, Welcomme (1981, 1989) no tiene referencia de especies de invertebrados introducidas o trasplantadas. No obstante, vale la pena resaltar que sólo a tres especies se les ha efectuado el estudio de impacto ambiental: camarón gigante malayo (*Macrobrachium rosenbergii*) (Pedini, 1977; Martínez-Silva, 1984), el camarón rojo de río (*Procambarus clarkii*) (Rojas-Pérez y González, 1998) y a la langosta de agua dulce pinzas rojas (*Cherax quadricarinatus*) (Moreno-Madriñán, 2001), para justificar su introducción o trasplante de cuenca.

### Análisis de la situación nacional

Colombia es un país rico en agua y especies en los diferentes pisos térmicos, y con un pobre conocimiento científico y técnico de sus recursos biológicos, lo cual impide garantizar el manejo adecuado de los mismos. Varios factores inciden en este aspecto, entre los cuales se identifica la falta de elaboración completa y posterior difusión de los paquetes tecnológicos para especies nativas potencialmente aprovechables, lo cual ha originado la introducción de especies exóticas y el trasplante de las nativas, como la vía más fácil de actuar (Tabla 1). El paquete tecnológico para las primeras, ya ha sido desarrollado en otros países; sin embargo la inadecuada canalización y fluidez de las líneas de crédito disponibles para aprovechar especies nativas, la existencia de científicos preparados para evaluaciones biológicas pero con pocos recursos y herramientas, así como el oportunismo de diversos sectores, está generando aún por encima de la legislación vigente en materia de protección a la biodiversidad y al material genético, algunos problemas que no se ven como relevantes.

Según la legislación colombiana vigente, se entiende por introducción de especies de fauna silvestre, “todo acto que conduzca al establecimiento o implantación en el país, bien sea en medios naturales o artificiales, de especies o subespecies exóticas de la fauna silvestre (Artículo 274 del Decreto-Ley 2811 de 1974. Artículo 138 del Decreto 1608 de 1978. Artículo 1 del Decreto 1681 de 1978)”. Se entiende por trasplante de fauna silvestre, “toda implantación de una especie o subespecies de la fauna silvestre en áreas donde no ha existido en condiciones naturales (Artículo 274 del Decreto-Ley 2811 de 1974. Artículo 136 del

Decreto 1608 de 1978. Artículo 1 del Decreto 1681 de 1978)”. Se entiende por repoblación faunística, “todo acto que conduzca a la reimplantación de poblaciones de especies o subespecies nativas de fauna silvestre en áreas en las cuales existen o existieron (Artículo 274 del Decreto-Ley 2811 de 1974. Artículo 129 del Decreto 1608 de 1978. Artículo 1 del Decreto 1681 de 1978)”.

Colombia tiene una distribución de especies introducidas y trasplantadas, que parecen estar originando impactos biológicos aún no precisados, debidos especialmente al impensado proceso de la acuicultura. De todas maneras hay opiniones contrastadas, pues Erazo-Keller (1989) afirma que un adecuado control de las poblaciones exóticas puede evitar efectos negativos sobre las nativas; opiniones similares han expresado De Iongh y Van Zon (1993) quienes han encontrado en Tailandia, por lo menos nueve aspectos que han beneficiado al país desde el punto de vista socio-económico, sin que el uso de especies introducidas provoque severos impactos ecológicos en términos de deterioro de los ecosistemas acuáticos, salvo casos incidentales.

Un ejemplo claro y de actualidad es el trasplante a que ha sido sometido el camarón blanco (*Litopenaneus vannamei*), que ya se ha convertido en el componente principal de la camaronicultura de la costa Caribe, aunque su origen este en el Océano Pacífico Americano. En la Península de La Guajira con *L. vannamei*, se pretende adelantar un proyecto con una cobertura de 10.300 hectáreas. Además de los trasplantes relacionados con las especies que intervienen en la cadena alimenticia del mismo, dentro del ciclo de cultivo, como la artemia (*Artemia salina*) o los rotíferos (*Brachionus plicatilis*). Es de resaltar la importancia comercial que posee hoy en día el camarón dentro de la acuicultura, cuyas divisas representan un porcentaje decisivo dentro de este renglón de la economía colombiana. Al igual que con los peces y en general con casi todas las especies introducidas o trasplantadas, no hay estudios sobre los efectos de su introducción en el ecosistema de la costa Caribe.

### Consecuencias

Ahora que está tan de moda hablar de “bioseguridad” y cuando lo que muchos pretenden es que el término quede restringido a los “Organismos Vivos Modificados” o “Genéticamente Modificados” (OVM’s – OGM’s), es bueno reflexionar sobre los impactos que producen las introducciones y los trasplantes, que se efectúan bien con fauna o con flora y que global, nacional y regionalmente en su gran mayoría nunca han estado dotadas del debido bio-rigor, ni

**Tabla 1.** Especies nativas trasplantadas y exóticas introducidas a Colombia. Establecidas en: (1) ambientes naturales, (2) ambientes artificiales; propósito: (3) acuicultura, (4) experimentación, (5) recuperación; observaciones: (6) consumo, (7) trasplante exitoso, (8) buenos resultados, (9) en policultivos, (10) cultivo y exportación, (11) introducción no exitosa; procedencia: ATO (Atlántico Oriental), CHI (Chile), ECU (Ecuador), HAW (Hawai), IDP (Indopacífico), NIC (Nicaragua), PAN (Panamá), USA (Estados Unidos), VZL (Venezuela); (12) accidental.

Taxa / Familia / Especie / Nombre Vernacular	Desde	Año	Establecido (Departamento)	Propósito	Anotaciones
<b>Tremátodos</b>					
Ancyrocephalidae	----	----	2 (Valle)	3	8
1. <i>Cichliodogyrus sclerosus</i>					
2. <i>Cichliodogyrus tilapiae</i>	----	----	2 (Valle)	3	8
Dactylogyridae					
3. <i>Anacanthorus colombianus</i>	----	----	2 (Valle)	3	8
4. <i>Anacanthorus culticulovaginus</i>	----	----	2 (Valle)	3	8
5. <i>Dactylogyrus</i> sp.			2 (Nacional)	3	8
Gyrodactylidae					
6. <i>Gyrodactylus</i> sp.	----	----	2 (Meta)	3	8
<b>Moluscos</b>					
Mytilidae					
7. <i>Perna perna</i> Mejillón	VZL	1965	1 (Bolívar)	3, 4	11
Pteriidae					
8. <i>Electroma</i> spp. Ostra perlífera	IDP	----	1 (Guajira, Magdalena, Sucre, Córdoba)	3	7
Ostreidae					
9. <i>Crassostrea rhizophorae</i> Ostra de mangle	COL	1971	1 (Magdalena)	7, 8	7
10. <i>Crassostrea gigas</i> Ostra importada	CHI	1995	2 (Cundinamarca)	6	8
<b>Crustáceos</b>					
Lernidae					
11. <i>Lernea cyprinacea</i>	----	----		3	11
12. <i>Lernea</i> sp.	----	----		3	11
Artemiidae					
13. <i>Artemia salina</i> Artemia	USA	1972	2 (Guajira, Magdalena, Atlántico, Bolívar, Sucre, Córdoba, Antioquia, Valle, Cauca, Nariño)	3, 8	7, 8
Peneidae					
14. <i>Farfantopenaeus duorarum</i> Camarón rosado	USA	1975	2 (Atlántico)	4, 9	11
15. <i>Litopenaeus stylirostris</i> Camarón blanco	COL, ECU, NIC, PAN	1976	2 (Atlántico, Bolívar, Sucre, Nariño)	3, 6	7, 8
16. <i>Litopenaeus vannamei</i> Camarón blanco	COL, ECU, NIC, PAN	1976	2 (Atlántico, Bolívar, Sucre, Nariño)	3, 6	7, 8
17. <i>Penaeus monodon</i> Camarón gigante	BRA	1987	1 (Córdoba)	3, 6, 10	11
Palemonidae					
18. <i>Macrobrachium rosebergii</i> Camarón malasio gigante	HAW	1980	2 (Atlántico, Bolívar, Valle, Llanos Orientales)	3, 6, 9	8
Hippolytidae					
19. <i>Hippolyte zostericola</i> Camarón	ATO	-	1 (Magdalena)	16	12
Astacidae					
20. <i>Procambarus clarkii</i> Camarón rojo	USA	1987	2 (Cundinamarca, Valle)	3, 6	8
Portunidae					
21. <i>Charybdis helleri</i> Jaibita	IDP	-	1 (Guajira, Magdalena)	16	12
Parastacidae					
22. <i>Cherax quadricarinatus</i> Langosta australiana	USA	1998	2 (Atlántico)	4, 9	8
Nephropidae					
23. <i>Homarus americanus</i> Langosta americana	USA	1996	2 (Cundinamarca)	6	8



de los procedimientos técnicos y científicos que hubieran permitido ser categóricos para la toma de tales determinaciones. Ahora con las especies ya instaladas en las cuencas, en los ríos y en los arroyos, sólo se intenta justificar tales acciones afirmando que con ellas estamos generando una fuente de recursos alimentarios y una pesquería que permita aliviar en algo la pérdida de las poblaciones naturales.

La pérdida se debe a la falta de control, de manejo y de administración de las pesquerías y de las condiciones de acceso. Definitivamente las deficiencias detectadas y ampliamente conocidas que nos conducen a ver muchos recursos, especies y poblaciones pesqueras amenazadas, no se pueden suplir con acciones que atentan contra la biodiversidad y que demuestran un doble discurso: por un lado se soporta el discurso de la megadiversidad y por el otro lado se agrede a la misma, con el prurito de la generación de igualdades y de oportunidades socioeconómicas.

Aunque el conocimiento de las especies nativas en Colombia dista de ser completo y es necesario definir lo que significa para los diferentes estratos sociales, la búsqueda de proteína buena y de bajo precio, se siguen descartando *per se* especies nativas y promoviendo la introducción de especies exóticas (huevos, alevinos y adultos) sin calcular todos los riesgos de su introducción y la poca experiencia en el manejo de las especies, aunque hayan dado buenos resultados en otros países (Tabla 1).

Esta actividad trae riesgos sanitarios no evaluados suficientemente, en especial cuando el Servicio Ictiopatólogico Nacional para certificar que las especies se encuentran libres de agentes patógenos u organismos parásitos. Por otra parte, el suministro de alevinos de especies nativas. Esta situación es preocupante, máxime cuando con el programa de fomento de especies nativas se podría haber avanzado suficientemente a nivel rural y masivo.

Para citar un caso, el camarón rojo de Louisiana (*Procambarus clarkii*), introducido con fines experimentales por la Universidad del Valle en 1985, llegó al Zanjón Romero y lagos del bosque municipal de Palmira (Valle) que drena al río Palmira contaminado con aguas servidas del municipio, debido a fugas accidentales. En 1998, se realizaron muestras bacteriológicas preliminares en esta especie, resultando positivas para el cólera (Flórez, 2002). En ese mismo año, a su vez, se adelantó la evaluación ambiental y dispersión de esta especie, determinándose que su distribución estaba restringida a la zona comprendida entre el nacimiento del Zanjón Romero y el lago del bosque municipal de Palmira, evidenciándose una alta tasa reproductiva, afectada por dos factores: la extracción ma-

nual de ejemplares por los pobladores de la región y en segunda instancia por el desecamiento temporal de un tramo considerable en la parte alta de dicho zanjón. A su vez, competencias por espacio o alimentación parecen no existir y por ende, no hay circunstancias de desplazamientos u ocupación de nichos ecológicos.

Como se puede ver, en Colombia, las introducciones y los trasplantes han sido realizados por particulares y por entidades gubernamentales, sin que para ello se hubiesen llevado a excepción de pocos casos, los estudios biológicos previos que estableciesen la bondad o no de tales acciones. Sin estos presupuestos, las especies han sido utilizadas para acuicultura (de fomento, intensiva, extensiva) y para recuperación de poblaciones en cuerpos de aguas naturales. Los más comúnmente introducidos y/o trasplantados son los recursos de origen hidrobiológico continental, por la intensa actividad socio-económica que la actividad pesquera (artesanal) y acuícola (de fomento) generan.

Para efecto de cualquier análisis y planteamiento, debe considerarse que el trasplante, es en un todo similar a la introducción de una especie, subespecie o variedad exótica, por cuanto la población introducida nunca estuvo (o no hay prueba de ello) representada en el área donde se le introduce. Los trasplantes ofrecen los mismos problemas y peligros potenciales que las introducciones (Lachner *et al.*, 1970) pues son elementos adventicios.

Las decisiones tomadas a diferente nivel para proceder a las introducciones, no parecen haber cuestionado qué efectos nocivos traerían las especies en el medio natural (no en confinamiento). Hernández-Camacho (1971) establece que, omitiendo la eventualidad de que la especie introducida pueda experimentar ciertos cambios significativos de sus hábitos alimenticios, cambios por cierto muy difíciles de prever en la mayoría de los casos, los principales peligros que conllevan las introducciones son: imposibilidad de controlar efectivamente su densidad y capacidad de expansión de su área de distribución; ausencia de mecanismos naturales (acción de competidores y depredadores efectivos), que regulen su número; incremento exagerado en su población que atenta contra la estabilidad de la biocenosis; alteración de las cadenas tróficas por la competencia directa o indirecta por alimento con los consumidores primarios nativos, pudiendo llevar a muchas especies a una drástica reducción numérica o a procesos de extinción. Este peligro es tanto mayor, si se trata de especies exóticas o nativas muy prolíficas o carnívoras.

No obstante, aún sabiendo que las especies exóticas se han establecido y que el daño ya está hecho, con efec-

tos son difíciles de predecir y son irreversibles, **Goldson et al.** (1994), propuso organismos que actúen como controles biológicos de especies introducidas que se han transformado en plagas. Los requerimientos para incrementar la especificidad del anfitrión, ponen de manifiesto que los predadores polífagos exóticos son menos apropiados para su introducción, y que se debe hacer un mayor énfasis sobre los organismos oligófagos como son muchas especies parásitas. Los agentes de control pueden reducir la resistencia de la densidad de relación-dependencia de poblaciones “plaga”. Universalmente y frente a la pérdida de poblaciones nativas, quienes apoyan las introducciones, han continuado argumentado “la existencia de nichos ecológicos vacíos”.

Una primera aproximación a las “Declaraciones de Efecto Ambiental”, realizadas para autorizar las introducciones en Colombia, deja ver que estas se centraron en análisis bibliográficos, sin la ejecución de estudios que permitieran tener certeza sobre sus probables efectos. La metodología de los análisis bibliográficos comparativos, siempre condujo a permitir las introducciones, sin tener en cuenta la estructura de la fauna nacional implicada, sus factores ambientales favorables y restrictivos, sus requerimientos ecológicos y el potencial que las especies nativas ofrecen a través de un fomento y manejo adecuados. En otros casos, los estudios fueron realizados con posterioridad a las introducciones, o simplemente no se han realizado.

A continuación se ofrecen los comentarios sobre las especies observadas libres o en asociación de crustáceos y peces en los ambientes naturales y controlados de Colombia.

## Tremátodos

### Ancyrocephalidae

#### *Cichlidogyrus sclerosus*

Encontrada en el Valle del Cauca por **Dossman** (1976), asociada a la tilapia negra introducida (*Tilapia mossambica*), y como primer registro para Suramérica. Actualmente, se le ha registrado en otros países, parasitando a *Oreochromis mortimeri* y *O. niloticus*; esta última asociación se ha encontrado en México.

#### *Cichlidogyrus tilapiae*

Encontrada en el Valle del Cauca por **Dossman** (1976), asociada a la tilapia negra introducida (*Tilapia mossambica*), y como primer registro para Suramérica. Actualmente, no se le conoce en otros países de América.

## Dactylogyridae

### *Anacanthorus colombianus* (Dossman, 1976)

Aunque es típica de la picuda (*Salminus affinis*) (Characidae) en el Valle del Cauca, **Dossman** (1976) la encontró también en la tilapia negra (*Tilapia mossambica*). Se trata de un caso de intercambio de parásitos, cuando los hospederos comparten los mismos ecosistemas naturales o artificiales.

### *Anacanthorus culticulovaginus* (Dossman, 1976)

También es típica de la picuda *Salminus affinis* (Characidae) en el Valle del Cauca, **Dossman** (1976) no la registró en la tilapia negra (*Tilapia mossambica*). Sin embargo se considera que la asociación con la especie introducida sea posible, pero no se han realizado los estudios para comprobarlo tanto en los ecosistemas naturales o artificiales.

### *Dactylogyrus* sp.

Se le ha encontrado asociado a tres especies exóticas (*Oreochromis niloticus*, *Oreochromis* spp., *Trichogaster* sp.) y siete nativas (*Ageneiosus caucanus*, *Corydoras metae*, *Pimelodus grosskopfi*, *Piaractus brachypomus*, *Pseudoplatystoma fasciatum*, *Prochilodus magdalenae*, *P. metae*) (**Conroy y Vásquez-Díaz**, 1975; **Cruz-Merchán**, 1985; **López-González**, 1987; **Guinard-Voelkl y Morales-Morales**, 1990; **Sanabria-Tamayo y Useche-López**, 1995; **Eslava-Mocha et al.**, 2001).

## Gyrodactylidae

### *Gyrodactylus* sp.

Registrado por lo menos en cinco investigaciones entre 1985 y 1995, en las cuales se cita el género en Colombia, asociado a dos especies nativas (*Loricaria* sp., *Hypostomus plecostomus*) y a tres exóticas (*Carassius auratus*, *Oreochromis niloticus*, *Oreochromis* spp.). Todos los registros provienen de cultivos desarrollados en diferentes localidades del país (**Díaz-Ercole**, 1985; **Guinard-Voelkl y Morales-Morales**, 1990); **Sanabria-Tamayo y Useche-López**, 1995).

Aunque no se le ha registrado oficialmente en Colombia, se sospecha que el parásito *G. cichlidarum* Paperna, 1968, esté en el país, especialmente con las introducciones y posteriores trasplantes de la tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*) cultivada en diferentes regiones de Colombia y utilizada en los programas de fomento del INCODER (antes INDERENA e INPA). Dichas introducciones y trasplantes se han incrementado en forma reciente con la introducción de otra tilapia procedente de Brasil, denominada chitralada

(*O. niloticus*) (Ramírez-Lesmes, 2003). Dicho parásito ha sido registrado en una gran cantidad de peces de diferentes familias, especialmente los cichlidos (*Tilapia galilea*, *T. guineensis*, *T. heudebtii*, *T. zillii*, *Hemichromis bimaculatus*, *H. fasciatus*, *H. flavijosephi*, *Tristamella aurea*, *T. simonis*) y también en diferentes partes del mundo. *Gyrodactylus* ha sido registrada en las aguas dulces de América, especialmente en la isla de Puerto Rico, asociada a *Tilapia aurea* y a *T. mossambica*. En la actualidad la especie está siendo redescrita (García-Vásquez *et al.*, en prensa) en la Universidad de Stirling (R. U.).

## Moluscos

### Mytilidae

#### *Perna perna* (Linnaeus, 1758)

Fue introducida desde Venezuela por la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Magdalena y del Sinú CVM (Medem, 1965a; 1965b; 1966), para realizar experiencias de cultivo en la Bahía de Cartagena (Bol.) y sus alrededores (CVM, 1965a, 1965b, 1965c, 1965d, 1965e; 1965f). Actualmente ha desaparecido (Álvarez-León, 1982) y sólo se tiene el registro de valvas frescas recuperadas en las playas de la bahía y de Bocachica (Díaz-Merlano y Puyana-Hegedus, 1994).

### Pteriidae

#### *Electroma* spp.

Su presencia se detectó inicialmente durante la realización de proyectos de investigación en la Bahía de Portete (Gua.), la zona de Santa Marta (Mag.) y el Golfo de Morrosquillo (Suc.-Cor.), y al parecer la introducción se llevó en forma incidental por parte de barcos petroleros o carboneros que periódicamente visitan los puertos colombianos sobre el Caribe (Puerto Bolívar, Santa Marta, Coveñas).

Inicialmente fue erróneamente identificada como juvenil de la especie nativa *Pteria colymbus* (Roding) durante la evaluación de moluscos de la familia Pteriidae y su posible utilización en la maricultura (Borrero y Díaz-Merlano, 1998). Actualmente no se conoce lo que ha pasado con la especie ni la identidad de lo que podría ser una segunda especie, especialmente por la gran fragilidad de sus conchas que ha impedido la identidad de las mismas por parte de especialistas (J. M. Díaz-Merlano, com pers.).

### Ostreidae

#### *Crassostrea rhizophorae* (Guilding, 1828)

En el Caribe colombiano existe la ostra de mangle, la cual se adhiere en número considerable a las raíces del

mangle rojo y a las valvas de la misma especie formando racimos o piñas. También se puede encontrar fijada a sustratos constituyendo bancos de fondo. Para su aprovechamiento, los pescadores cortan las raíces de mangle, ejerciendo gran presión sobre el manglar y/o extrayéndolas del fondo y no devolviendo las valvas vacías al lugar de extracción, sino utilizándolas en la compactación de vías en las poblaciones de los pescadores.

Aunque siempre se le ha conocido en la Ciénaga Grande de Santa Marta (Mag.) las poblaciones actuales provienen de un trasplante decidido por los técnicos del Instituto de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente INDERENA, para repoblar los bancos afectados por la dulcificación estacional de dicha ciénaga a comienzos de la década de los 70 (Peña-Guau, 1971). La semilla se trajo de las lagunas costeras de la Guajira colombiana, especialmente de la Ciénaga de Camarones pero su efecto no fue cuantificado (Álvarez-León, 1982, 1988).

Los primeros ensayos experimentales de cultivo de ostra de mangle en el Caribe colombiano se adelantaron en la Ciénaga Grande de Santa Marta, empleando el método de adecuación de fondos constituidos por conchas de las mismas ostras y trasladando semillas previamente fijadas en colectores de conchas suspendidos (Ciardelli y Cataño, 1970). Posteriormente, Wedler *et al.* (1978) y Wedler (1980, 1982) realizaron los primeros diseños experimentales sobre el cultivo de ostra usando como colectores llantas, tejas, raíces de mangle y láminas plásticas, encontrándose en estos últimos más ventajas y mejores resultados.

Squires y Riveros (1971) evaluaron la producción potencial de ostra en esta ciénaga destacando la necesidad de conocer mejor cómo influye la salinidad, recolección de la ostra y aspectos socioeconómicos del área. Rivera (1978) estudió los procesos de maduración gonadal permitiendo predecir las épocas de desove durante las cuales es propicio colocar los sustratos de fijación de semilla. Pinzón (1978) estableció las diferentes etapas de maduración gonadal, utilizando técnicas histológicas y describió la morfología externa e interna. Así mismo, Pérez-Carmona (1977), Pedraza-Alfonso (1979), Carmona-Pérez *et al.* (1983), Aguilera-Quñones (1984), Escobar-Nieves (1987), Escobar-Nieves y Celis-Rincón (1991) Barliza y Quintana (1992) y Wedler (1994) adelantaron diferentes experiencias sobre cultivo, recuperación y evaluación de bancos naturales. Hernández-Jiménez (1983) evaluó el estado actual de los bancos naturales de *C. rhizophorae* en el norte de la Ciénaga Grande de Santa Marta, y posteriormente Hernández-Jiménez y Márquez-Calle (1987) calcularon el potencial cosechable de la ostra.

**Bernal y Mosquera-Arango** (1975) estudiaron la bioecología, pesquería y aspectos de cultivo de la ostra en la Bahía de Barbacoas (Bol.). **Ramírez-Castillo y Salazar** (1977) realizaron el estudio preliminar sobre el cultivo artificial de la ostra de mangle *C. rhizophorae* en la Bahía de Cispatá (Cór.), estudiaron su morfología y anatomía, fauna acompañante, factores bióticos, abióticos y ensayaron diferentes colectores de semilla (bandas de caucho, tejas de asbesto, palos y ramas de mangle); además, evaluaron la fijación por unidad de área, el crecimiento en cajas ostrófilas y la maduración gonadal. En el Golfo de Urabá, Bahía de Marrirí (Ant.), **Escobar** (1981) realizó un cultivo experimental de la ostra a fin de evaluar su viabilidad técnica y económica. Los tres trabajos constituyeron la base para el cultivo de la ostra al sur de Cartagena.

Existen dudas sobre la ubicación taxonómica de la ostra de mangle. **Wedler** (1994) menciona que observaciones comparativas de la morfología de las conchas de la ostra de mangle *C. rhizophorae* en los diferentes sitios de la Ciénaga Grande de Santa Marta y experimentos de crecimiento llevaron a la hipótesis de que la ostra del mangle es una variación ecológica de la especie americana *Crassostrea virginica*. Sobre este mismo aspecto **Díaz-Merlano y Puyana-Hegedus** (1994) manifiestan que estudios adelantados por **Newball y Carriker** (1983) a nivel de la ultraestructura de la concha de ambas formas no justifica una separación de éstas a nivel específico. Sin embargo, de realizarse estudios más detallados que permitan comprobar la hipótesis formulada, *C. rhizophorae* podría pasar a ser un sinónimo de *C. virginica*, ya que este último nombre tiene prioridad.

A pesar de contar con todas estas investigaciones y experiencias, su trascendencia ha sido poca y hoy el país no cuenta con proyectos a nivel comercial. De otro lado, es importante considerar que el mayor número de investigaciones se han llevado a cabo en la Ciénaga Grande de Santa Marta, cuerpo de agua que presenta problemas en el balance halohídrico, alta contaminación por coliformes, pesticidas y metales pesados. La circulación de las aguas marinas y continentales ha sido modificada por obras de ingeniería como son la construcción de carreteras, distritos de riego, diques, entre otros y desafortunadamente no se ha presentado continuidad en las investigaciones.

El Proyecto INPA / COLCIENCIAS 1994-1998, planteó actividades en dos etapas: (1) un estudio biológico de la población natural de ostra de mangle en la Ciénaga de Mestizo (Córdoba) y (2) la implantación y desarrollo de la tecnología cubana para su producción a nivel comercial (**Arias-Reyes, 1994, Arias-Reyes et al., 1994; Victoria-Daza et al., 1995**). Este proyecto significó el logro de todas

las etapas del cultivo (biológicas y técnicas), la comercialización y el consumo, con un beneficio comprobado para las comunidades locales.

### *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793)

Esta ostra de amplia distribución en el Pacífico americano, fue introducida desde Chile aproximadamente en 1995 con el propósito de ofrecer un producto fresco, que pudiera ser degustado por los clientes de restaurantes especialmente de la capital de la República. No hay información sobre los resultados obtenidos por parte de los responsables de dicha introducción. Como no ha sido liberada en el medio natural ni se ha intentado su cultivo controlado, al parecer el impacto sobre la fauna nativa ha sido nulo.

## Crustáceos

### Lernaeidae

#### *Lerne cyprinacea* (Linnaeus, 1761)

Dentro de los trabajos de vigilancia y control de las especies nativas e introducidas, **Rodríguez-Gómez** (1980, 1981) registró el copépodo *L. cyprinacea* en aguas colombianas y en los ciprínidos (*Carassius auratus* y *Cyprinus carpio*), y belodóntidos (*Trichogaster microlepis*), que a su vez han sido introducidos a las aguas dulces de Colombia hace varios años. **Alvarado-Forero y Gutiérrez-Bonilla** (2002) en su trabajo sobre introducciones y trasplantes de peces, advierten de los peligros sanitarios que pueden presentarse y confirman la presencia en Colombia del género *Lerne* tanto en peces como en crustáceos. Estas observaciones y comprobaciones coinciden cuando se afirma que *L. cyprinacea* fue introducida tanto en Norteamérica como en Suramérica, con las especies introducidas.

#### *Lerne* sp.

Una segunda especie del género fue registrada en cultivos de la especie nativa *Piaractus brachipomus* por **Eslava-Mocha e Iregui-Castro** (2000) en el área de los Llanos Orientales, cuenca del río Orinoco.

### Palaemonidae

#### *Macrobrachium rosenbergii* (Bate, 1868)

El camarón gigante o camarón malasio fue introducido al país desde Hawai en 1980, inicialmente a los Departamentos del Valle y al Atlántico. Se han realizado experiencias de cultivo en el Pacífico colombiano, habiéndose evaluado en experiencias industriales de Acuicultura de Mariscos Ltda. en Sabaletas (Valle aluvial del río Anchicayá), alrededores de Buenaventura, los rendimien-

tos obtenidos con el *M. rosenbergii*. La región donde se encuentra el proyecto, es una zona selvática que cuenta con condiciones ambientales muy favorables para la cría de la especie: aguas abundantes de gran pureza y altas precipitaciones pluviales. El laboratorio con una capacidad de producir un millón de postlarvas mensuales, que alcanza tanto para el proyecto como para otros que comienzan a desarrollarse; el agua de mar se purifica y puede reutilizarse hasta por un año, retirando de ella todos los productos tóxicos derivados del metabolismo de las postlarvas, logrando además altas tasas de supervivencia. Después de 30-35 días las larvas pasan a postlarvas y se llevan a los estanques nodriza donde permanecen bajo condiciones especiales hasta por dos meses, al cabo de los cuales se transforman en juveniles de 4 g; en este nuevo estado se trasladan a los grandes estanques de cría, sembrándose a razón de 10 juveniles/m<sup>2</sup> y permaneciendo allí por cuatro meses. Su actividad empieza al atardecer, cuando comienzan a salir de sus refugios o se desentieran y nadan activamente durante la noche en busca de alimento (vivo y también concentrado) debidamente dosificado y balanceado de acuerdo a su desarrollo; después de 120 días de cría y después de realizar diferentes mudas, durante las cuales son especialmente vulnerables, se realiza la pesca selectiva (dejando unos 5000 m<sup>2</sup> de espejo de agua y con una red rectangular de arrastre) de los machos más grandes y desarrollados, para así dar oportunidad de que el resto de la población del estanque alcance también, su pleno desarrollo. Los ejemplares pescados pesan en promedio 40 g, se lavan y congelan inmediatamente, con el fin de que no pierda calidad ni propiedades nutritivas (Prah y Abadi, 1983).

Una vez introducido se convino mantener la mitad de los padrotes en el Valle del Cauca al cuidado de la Universidad del Valle y los acuicultores industriales que lo importaron, y la otra mitad de los padrotes en la Estación de INDERENA en Repelón (Atlántico). En el Caribe, *M. rosenbergii* fue evaluado en cuanto a los aspectos bio-ecológicos así como en cuanto a los rendimientos obtenidos en la producción masiva de larvas en confinamiento así como la interacción con las especies nativas de crustáceos y peces (Martínez-Silva, 1977; 1984; Grupo Acuicultura Marina, 1982; 1983; 1985; 1987a; 1987b; Grupo Colombo Chino, 1987; 1988). Más recientemente, la evaluación integral de los diferentes aspectos relacionados con el cultivo de la especie en el Caribe colombiano, permitió conocer los detalles (densidad, dieta, crecimiento, manejo, larvicultura, entre otros) de dicha actividad y su factibilidad tanto técnica como económica en el país (Martínez-Silva y Torres-Virviescas, 1993, 2001).

No se realiza pesquería, pues hasta la fecha todo el manejo de la especie se realiza en confinamiento. Hasta el momento sólo constituye un importante recurso industrial y privado, para la exportación, aunque los últimos índices del mercado no lo hacen competitivo frente a los camarones marinos y su comercialización se circunscribe a países y regiones muy específicas, esta condición ha restringido mucho la actividad para la acuicultura nacional. El exigente mercado internacional y nacional reciben el producto prácticamente fresco, debido a la calidad de las aguas en las que se le cultiva y al procesamiento y línea de frío a la que se le somete. Prácticamente toda la producción nacional se exporta, debido al gran aprecio que tiene su sabor, textura y valor proteínico.

### Hippolytidae

#### *Hypolyte zostericola* (Smitt, 1873)

El camarón de las raíces del manglar y comensal de algas fue registrado por primera vez en el área de la bahía de Cartagena (Pérez-García y Victoria-Rueda, 1977), posteriormente en el área de las islas de Providencia y Santa Catalina (Melendro-Galvis y Torres-Frohlich, 1985), y confirmada su presencia en el Caribe sur, específicamente en la región de Santa Marta (Reyes de Castillo y Campos-Campos, 1992, Campos-Campos, 1995). También se le ha registrado en la costa continental del Pacífico colombiano (Wicksten, 1989; Lemaitre y Álvarez-León, 1992) y para varias localidades del Océano Atlántico también por Wicksten (1989); otras observaciones indican que se le puede encontrar asociado al cirripedio *Bopyrina abbreviata* Richardson (Bopyridae: Ioninae) (Markham, 1988). A pesar de su importancia para los ecosistemas que habita, no se le ha considerado para proyectos de aprovechamiento bioecológico. En todo caso, esta especie al encontrarse en las dos costas colombianas, parece que es la que en mayor variedad de sitios se ha introducido y transplantado en forma ocasional y natural, usando posiblemente los barcos de diferente naturaleza y que usan los puertos marítimos colombianos como destino o escala.

### Cambaridae

#### *Procambarus clarkii* (Girard, 1852)

El camarón rojo de río de Louisiana, langosta de quela roja o red claw, fue introducido a Colombia en 1985 desde Estados Unidos, con fines de experimentación exclusivamente. *P. clarkii* fue mantenida en confinamiento en las instalaciones de Agropecuaria Heliodoro Villegas Sucesores S. A., en Palmira (Valle) en el Pacífico colombiano, hasta que fue liberada accidentalmente en la cuenca del río Palmira. La introducción se realizó con el Registro Sanita-

rio del ICA No. ON-867-85, no se efectuó el correspondiente estudio de impacto ambiental a su llegada, aunque sí se realizaron estudios durante 17 meses que incluyeron aspectos relacionados con el cortejo, cópula, desarrollo postlarval y cría de juveniles con dietas naturales, así como su relación con la temperatura; recientemente un estudio en la cuenca permitió comprobar la adaptación de la especie y su armónico desarrollo, junto con peces nativos y exóticos, aunque se desconoce su verdadera interacción (Romero-Trigueros, 1988; Romero-Trigueros y Prahl, 1988, y Álvarez-León, 2002a, 2002b). Internacionalmente se dio a conocer del inicio de cultivos limitados en Colombia (Hobbs, 1989). Se realizó una evaluación preliminar sobre las alternativas socioeconómicas para las comunidades del Alto Magdalena (Jaramillo-Cobo, 1997). Recientemente se le ha registrado en la Sabana de Bogotá por Rocha de Campos (2005), lo cual indica o bien una reintroducción o un trasplante desde el Valle del Cauca, a donde llegó inicialmente, y la gran adaptabilidad de la especie a la altura y a las aguas frías.

#### Parastictidae

##### *Cherax quadricarinatus* (Von Martens, 1868)

La langosta de agua dulce pinzas rojas o langosta australiana fue introducida desde los Estados Unidos a Colombia durante 1997, con fines de experimentación exclusivamente (Resolución 1186 de noviembre 1 de 1996) (MinAmbiente, 1996). Aunque la citada norma autorizó la introducción de 50.000 larvas y 1.000 juveniles, la cantidad importada y sometida a la cuarentena prevista ascendió a 83 juveniles y los 150 adultos (48 hembras ovígeras). Los ensayos programados se llevaron a cabo en la Estación Piscícola de Repelón (Atlántico), del Gobierno Nacional; allí se llevaron a cabo las evaluaciones de impacto ambiental de la especie frente a las especies nativas (los crustáceos, *Macrobrachium acanthurus*, *M. carcinus*, *M. crenulatum*, *Palaemonetes carteri* y los peces, *Aequides pulcher*, *Caquetaia kraussii*, *Ctenolucius hujeta*, *Hoplias malabaricus*, *Plagioscium magdalenae*, *Roeboides dayi*, *Synbranchus marmoratus*), con un diseño experimental que incluyó variables como: crecimiento, comportamiento, producción, capacidad de carga, supervivencia, densidad, madurez sexual, fecundidad, técnicas de mantenimiento de larvas y capacidad de hacer madrigueras o túneles, hábitos alimenticios, diagnóstico, prevención y control de enfermedades, así como variables físico-químicas del agua (turbidez, potencial de hidrógeno, dióxido de carbono, dureza total, alcalinidad, nitritos, nitratos, amonio) y su efecto en la población de los estanques. Moreno-Madriñán (1998; 2000; 2001) y Álvarez-León (2002a; 2002b; 2002c).

#### Peneidae

##### *Farfantopenaeus duorarum* (Burkenroad, 1939)

En la segunda mitad de la década de los 70 en la costa Caribe se procedió a experimentar en el área de Galerazamba (Atl.), utilizando para los ensayos el *F. duorarum* (camarón rosado) procedente de Florida (USA); sin embargo, los resultados fueron poco satisfactorios (Álvarez-León, 1982).

##### *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson, 1874)

El cultivo del camarón azul se inició a partir de los trabajos realizados con la misión técnica de China (Proyecto INDERENA-TAIWÁN) durante la cual fue posible realizar el cultivo experimental de cinco especies del Caribe (*Farfantopenaeus brasiliensis*, *F. subtilis*, *F. notialis*, *Litopenaeus schmitti*, *Xiphopenaeus kroyeri*) en el Caribe y dos del Pacífico colombiano (*L. stylirostris* y *L. vannamei*). Hacia mediados de los 80 se establecieron granjas de cultivo industrial de *L. stylirostris* en el área de Tumaco (Nariño) y posteriormente en el sur de Cartagena (Bol.), Caribe colombiano, a donde llegó como especie incidental en las remesas de las postlarvas de *L. vannamei* (Álvarez-León, 1982; Martínez-Silva et al., 1989; Álvarez-León y Rodríguez-Forero, 2000).

Varios trabajos se han realizado sobre la especie y sobre las particularidades de su bio-ecología (Prahl y Gardeazábal, 1977; Prahl y Schiller, 1980), al igual que sobre la descripción de las larvas (Prahl et al., 1978) y sobre la oferta anual de las postlarvas de los camarones blancos (*Litopenaeus occidentalis*, *L. stylirostris*, *L. vannamei*) (Prahl et al., 1987). Un estudio comparativo del comportamiento y desarrollo en el cultivo de camarones marinos tanto en el Pacífico como en el Caribe colombiano, enfatizó las bondades de la especie (Martínez-Silva et al., 1989).

La casi totalidad de camarón azul o langostino se lleva a las ciudades del Pacífico, donde las pesqueras de gran capacidad (Buenaventura y Tumaco) y su destino final lo constituye el comercio nacional y principalmente el internacional. La comercialización de este producto se realiza de manera general en los centros de comercio más importantes del litoral. En el mercado nacional, su precio oscilaba a finales de la década de los 90 entre \$14.000-15.000 el kilogramo, en sus lugares de captura, hasta los \$16.000 por kilogramo, en Buenaventura (Álvarez-León y Bravo-Pazmiño, 1998).

##### *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931)

Su cultivo se inició a partir de los trabajos realizados en asocio con la misión técnica de China (Proyecto

INDERENA-TAIWÁN) durante la cual fue posible realizar el cultivo experimental de cinco especies del Caribe (*Farfantopenaeus brasiliensis*, *F. subtilis*, *F. notialis*, *Litopenaeus schmitti*, *Xiphopenaeus kroyeri*) en el Caribe, y dos del Pacífico colombiano (*L. stylirostris* y *L. vannamei*). Hacia mediados de los 80 se establecieron granjas de cultivo industrial de *L. vannamei* y *L. stylirostris* en el área de Tumaco (Nariño) y posteriormente de *L. vannamei* en el sur de Cartagena (Bol.). Inicialmente se dependía de las postlarvas y juveniles proveniente de Salvador, Panamá y Ecuador; posteriormente, la instalación de laboratorios de maduración y larvicultura en el Caribe y Pacífico, se redujo esta dependencia (Álvarez-León, 1982; Álvarez-León y Rodríguez-Forero, 2000).

La presencia de patologías ocasionadas por virus ha dado como resultado descensos de las producciones de camarón en las costas colombianas. La aparición del Síndrome del Taura (TSV), introducido a Colombia por ejemplo, debido a la importación de reproductores y postlarvas, dieron como resultado que las producciones cayeran drásticamente trayendo pérdidas millonarias para la industria camaronera. Desde entonces, con el fin de evitar la aparición de nuevas patologías, se usaron ciclos cerrados del cultivo, y las fincas camaroneras colombianas empezaron a producir reproductores de alta calidad y los laboratorios de maduración fueron adquiriendo e implementando tecnologías apropiadas para abastecer de semilla mejorada genéticamente al sector camaronero (*L. vannamei* var. *colombiana*) (De la Roche-Cadavid *et al.*, 2001).

*L. vannamei* es la especie preferida por los cultivadores de camarón, por sus ventajas en el rápido crecimiento y el alto porcentaje de supervivencia (Prah, 1982). En Colombia se obtienen supervivencias del 51%, mientras en el Ecuador solo llegan a un 33%. El gremio está reunido en la Asociación de Cultivadores de Camarón (ACUANAL), a través de la cual se generan proyectos de investigación que se llevan a cabo en CENIACUA, el centro de investigaciones que tiene la asociación para tal efecto. Parte del éxito del sector se debe al grado de especialización en el control y tratamiento de las patologías más frecuentes (cabeza amarilla y mancha blanca) (De la Roche-Cadavid *et al.*, 2001).

La casi totalidad de camarón azul o langostino se lleva a las ciudades del Pacífico, donde las pesqueras de gran capacidad (Buenaventura y Tumaco) y su destino final lo constituye el comercio nacional y principalmente el internacional. La comercialización de este producto se realiza de manera general en los centros de comercio más importantes del litoral. En el mercado nacional, su precio oscila

ba a finales de la década de los 90 entre \$14.000 y 15.000 el kilogramo, en sus lugares de captura, hasta los \$16.000 por kilogramo, en Buenaventura (Álvarez-León y Bravo-Pazmiño, 1998).

#### *Penaes monodon* (Fabricius 1798)

Su hallazgo en un arrastre camaronero realizado en el Golfo de Morrosquillo, permitió comprobar su presencia e introducción ilegal a Colombia; después de su hallazgo no se ha vuelto a saber nada de esta especie (Álvarez-León, 1982; Álvarez-León y Rodríguez-Forero, 2000).

En Ecuador se han registrado adultos de la especie (Barragán-Virviescas, 1993). En México se registran larvas y postlarvas que fueron sometidas a bioensayos, comprobándose que son muy resistentes a los descensos de temperatura (15 a 5°C), pues al llegar a la temperatura mínima se produjo una mortalidad del 85% de *L. vannamei* y de *L. stylirostris*, pero no de *P. monodon* (Córdoba-Murueta *et al.* (1994).

#### Portunidae

##### *Charybdis helleri* (A. Milne-Edwards, 1867)

Este portúnido o jaibita fue registrado por primera vez en la región de la Guajira colombiana por Campos-Campos y Turkay (1989), y confirmada su presencia en la zona costera del área de Santa Marta por Reyes de Castillo y Campos-Campos (1992), Trujillo-Arcila (1997) y Arango y Solano-Plaza (1999), Ciénaga Grande de Santa Marta (Campos-Campos *et al.*, 2004). No se aprovecha artesanal ni en forma industrial a pesar de su gran abundancia.

#### Nephropidae

##### *Homarus americanus* (H. Milne Edwards, 1837)

Esta langosta americana fue introducida desde los Estados Unidos en 1996 con el propósito de ofrecer un producto fresco y vivo, que pudiera ser observado y escogido por los clientes de restaurantes especialmente de la capital de la República. No hay información sobre su manejo y los resultados obtenidos por parte de los responsables de dicha introducción. Al parecer el impacto sobre la fauna nativa es mínimo, dadas las condiciones de su manejo en cautiverio.

#### Conclusiones

Los problemas detectados aquí son el resultado de un país aún joven en la acuicultura, en el cual ha sido muy difícil convencer al nivel político decisorio, de sus ventajas y la factibilidad de su estructuración. Además de lo anterior, en Colombia que siempre ha dependido de los

sectores agrarios y pecuarios para su desarrollo económico y social, actividades como la pesca y la acuicultura han sido adscritas como subsector y por tanto dependientes del Ministerio de Agricultura, con los problemas y limitaciones obvias.

En todo caso, el hecho de que el Gobierno Nacional haya fomentado y mantenido un presupuesto más o menos creciente en el período 1985-2000 es un índice alentador de lo que puede hacerse dentro de la actividad, sin olvidar que los principales productos de la acuicultura colombiana han sido trasplantados (camarón). Con las reuniones nacionales e internacionales de evaluación e identificación de líneas de acción e investigación prioritaria, celebradas en diferentes ciudades del país, las acciones de la Red Nacional de Acuicultura, así como la formulación del Programa Nacional para la Acuicultura en las décadas de los 80 y los 90, se dieron los pasos necesarios para identificar los proyectos prioritarios y orientar en forma optimiza los fondos destinados a la investigación, el fomento y la comercialización.

La adecuada asistencia técnica y la elaboración de los paquetes tecnológicos de las especies evaluadas que ya han demostrado suficiente capacidad para producir resultados rentables en términos económicos, nutricionales y sociales, indudablemente facilitarían el desarrollo armónico de la acuicultura en Colombia, ya que como se ha expresado existe la suficiente base científica para hacerlo.

La protección de los recursos naturales nativos debe estar administrada a través de varias acciones, incluidas la legislación y la regulación de los aspectos de impacto medio ambiental, siendo además muy clara la necesidad de involucrar a la población en programas de educación y capacitación, en los que se recalque la importancia de la prevención sobre el cuidado de nuestras especies nativas, la conservación y preservación de recursos acuáticos, todo esto dentro de un proceso educacional a largo plazo y el establecimiento de metas concretas de investigación.

La discusión de la bondad de las actividades de introducción o de trasplante de especies y la posibilidad de eventos invasivos, a través de información primaria y secundaria, ofrece un balance del compromiso sobre lo que tales acciones pueden estar significando frente a la diversidad biológica en Colombia y, tangencialmente, a escala global. En programas de modelación biológica controlada, para la recuperación de especies vulnerables, o que se encuentran en peligro de extinción, se podría empezar a ver estos trasplantes o introducciones de una manera más optimista y con objetivos encaminados hacia la recuperación responsable de nuestras propias especies.

## Referencias

- Aguilera-Quiñones, A.** 1984. Proyecto ostricultura, IV Etapa (enero-diciembre, 1983). Proy. COLCIENCIAS / CIID. Santa Marta (Mag.). Inf. Final, 93 p.
- Allan, J. D. & S. Flecker.** 1993. Biodiversity conservation in running waters: identifying the majors factors that affect destruction of riverine species and ecosystems. *BioScience*, 43: 497-502.
- Alvarado-Forero, H. & F. de P. Gutiérrez-Bonilla.** 2002. Especies hidrobiológicas continentales introducidas y transplantadas y su distribución en Colombia. MinAmbiente / RAMSAR / CVC. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia), 180 p.
- Álvarez-León, R.** 1982. Antecedentes y posibilidades para el desarrollo de la acuicultura en Colombia. *Rev. Lat.-Amer. Acuic.*, 13: 9-19.
- . 1988. La ostricultura, realidad al alcance de los pescadores artesanales. *INDERENA / Reg. Bolívar-Rev. Manglaría*, 7: 17-19.
- . 2002a. Introducción a Colombia de los astacóideos, *Procambarus clarkii* (Decapoda: Cambaridae) y *Cherax quadricarinatus* (Decapoda: Parastacidae): Estado de su conocimiento y perspectivas de su aprovechamiento. 14th. Reun. Soc. of Crayfish. Querétaro (Que.) México, agosto 10-14 de 2002. (resumen)
- . 2002b. Resultados de las evaluaciones realizadas ante la introducción a Colombia de *Procambarus clarkii* y *Cherax quadricarinatus* (Decapoda: Cambaridae, Parastacidae). 14th. Reun. Soc. of Crayfish. Querétaro (Que.) México, agosto 10-14 de 2002. (resumen)
- . 2002c. Introducción de la langosta de agua dulce *Cherax quadricarinatus* (Decapoda: Parastacidae) a Colombia: Estado de su conocimiento y perspectivas de su aprovechamiento. 14th. Reun. Soc. of Crayfish. Querétaro (Que.) México, agosto 10-14 de 2002. (resumen)
- Álvarez-León, R. & H. E. Bravo-Pazmiño.** 1998. Crustáceos y moluscos de los ecosistemas de manglar del Pacífico colombiano y aprovechados por las comunidades negras. Proy. PD 171 / 91 Rev. (F) Fase II (Etapa I) Conservación y Manejo para el Uso Múltiple y el Desarrollo de los Manglares en Colombia, MMA / ACOFORE / OIMT. Santa Fe de Bogotá D. C. Inf. Técnico, 29: 1-106.
- Álvarez-León, R. & A. Rodríguez-Forero.** 2000. La acuicultura en Colombia: estado actual y perspectivas. *Rev. INFOPECA Internacional*, 6: 40-47.
- Arango, C. P. & O. D. Solano-Plaza.** 1999. Soft bottom megafauna (Crustacea: Mollusca) at the southwestern region of Santa Marta, Colombian Caribbean. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 29: 155-180.
- Arias-Reyes, L. M.** 1994. Informe de avance cultivo experimental de la ostra de mangle *Crassostrea rhizophorae*, en la bahía de Cispatá. INPA. Montería (Córdoba). Inf. Técnico, 32 p.
- Arias-Reyes, L. M., J. A. Frías-Laporeau, P. Victoria-Daza, H. Rodríguez-Gómez & P. R. Dueñas-Ramírez.** 1995. El cultivo de la ostra de mangle *Crassostrea rhizophorae*, Cap. V pp. 153-208 In: Rodríguez-Gómez, H., G. Polo-Romero & C. O. Mora-Lara (eds.). 1995. Fundamentos de acuicultura marina. INPA-MinAgricultura y Desarrollo Rural. Santa Fe de Bo-



- gotá D. C. (Colombia). 2ª Edición. Serie de Fundamentos 1, 225 p.
- Barliza, F. & C. Quintana.** 1992. Contribución al desarrollo de la ostricultura en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Tesis Profesional. Fac. de Ing. Pesquera. Univ. de Magdalena, 120 p.
- Barragán-Virviescas, J.** 1993. Presencia de *Penaeus mondon* (F.) en aguas ecuatorianas. INP-Rev. Ciencias el Mar y Limnología, 3 (1): 225-227.
- Belyea, L. R. & J. Lancaster.** 1999. Assembly rules within a contingent ecology. *Oikos*, 86: 402-416.
- Benson, A. M., P. L. Fuller & J. C. Colette.** 2001. Summary Report of nonindigenous aquatic species in U.S.A. Fisheries and Wildlife Services-Region 4. US Geological Survey. Florida (USA).
- Bernal, M. S. & C. Mosquera-Arango.** 1975. Bioecología y pesquería de la *Crassostrea rhizophorae* (Mollusca, Pelecypoda en la Bahía de Barbacoas. Tesis Profesional. Fac. Biología Marina. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 101 p.
- Borrero, F. J. & J. M. Díaz-Merlano.** 1998. Introduction of the Indo-Pacific periid bivalve *Electroma* sp. to the tropical western Atlantic. *Bull. Mar. Sci.*, 62 (1): 269-274.
- Campos-Campos, N. H.** 1995. Crustáceos decápodos asociados a comunidades algales en la región de Santa Marta, Caribe colombiano. *Caldasia*, 18 (86): 57-69.
- Campos-Campos, N. H. & M. Turkay.** 1989. On a record of *Charybdis helleri* from the Caribbean coast of Colombia (Crustacea: Decapoda: Portunidae). *Senckenbergiana Marit.*, 20 (3/4): 119-123.
- Campos-Campos, N. H., J. Blanco-Racedo & F. Troncoso.** 2004. La fauna asociada a los bosques de manglar de la ecoregión Ciénaga Grande de Santa Marta, Cap. 5 pp. 97-111 En: Garay-Tinoco, G. A., J. Restrepo-Martínez, O. Casas-Monroy, O. D. Solano-Plazas & F. Newmark-Umbreit (eds.). *Los Manglares de la Ecoregión Ciénaga Grande de Santa Marta: Pasado, Presente y Futuro*, INVEMAR / MMA. Serie Publicaciones Especiales No. 11. Santa Marta (Mag.) Colombia. 2004, 236 p.
- Carlton, J. T.** 1985. Transoceanic and inter-oceanic dispersal of coastal marine organisms: the biology of ballast water. *Oceanogr. Mar. Biol., Annual Rev.*, 23: 313-371.
- Carmona-Pérez, G. E., L. Pérez-Carmona & E. Wedler.** 1983. Proyecto de Ostricultura, III Etapa, INVEMAR-COLCIENCIAS / CIID / Univ. Tecnol. del Magdalena. Santa Marta (Mag.), 46 p.
- Ciardelli, F. A. & J. Cataño.** 1970. Estudios preliminares de las ostras de Ciénaga Grande de Santa Marta y bases para mejorar su producción. INDERENA-Centro de Investigaciones Marinas. Cartagena (Bol.). *Inf. Técnico*.
- Contreras, S. & M. A. Escalante.** 1984. Distribution and known impacts of exotics fishes in Mexico, pp. 102-130. In: Courtenay, W. R. (ed.). *Management of Exotics Fishes*. John's Hopkins University Press. Baltimore (USA).
- Conroy, D. A. & C. Vásquez-Díaz.** 1975. Informe sobre el trabajo del Proyecto (Col / 552), en el campo de la ictiopatología durante el año de 1974. Proy. INDERENA / FAO para el Desarrollo de la Pesca Continental en Colombia. Bogotá D. E. Doc. Fi: DP / COL / 71 / 552 / Ser. Publicación, 10: 1-47.
- Córdoba-Murueta, J. H., M. de J. Acosta-Ruíz & D. Voltolina-Lobina.** 1994. Primer registro de *Penaeus monodon* Fabricius 1798 en las costas de Sinaloa, México. *Rev. Invest. Científica*, 5 (1): 31-32.
- Courtenay, W. R. Jr.** 1979. Biological impacts on introduced species and management policy in Florida, pp. 237-257 In: Mann, R. (ed.) *Exotic species in mariculture*. The MIT Press, Cambridge (Ma.) USA.
- . 1993. Biological pollution through fish introductions, pp. 36-61 In: Mcknight, B. N. (ed.) *Proc. Symp. Biological Pollution: The Control and Impact of Invasive Exotic Species*. Indiana Academy of Science. Indianapolis (USA).
- Courtenay, W. R. Jr. & C. R. Robins.** 1979. Exotic aquatic organisms in Florida with emphasis on fishes: A review and recommendations. *Transactions of The American Fisheries Society*, 102: 1-12.
- Crossman, E. J.** 1984. Introductions of exotics fishes into Canada, pp. 78 - 101 In: Courtenay, W. R. Jr. & J. R. Stauffer Jr. (ed.) *Distribution, Biology, and Management*.
- Cruz-Merchán, P.** 1985. Ecto y endoparásitos causantes de enfermedades infecto-contagiosas y su control en *Corydoras metae* y *Corydoras aenus*. Tesis Biólogo. Fac. Ciencias. Pontificia Univ. Javeriana, 113 p.
- CVM.** 1965a. Informe sobre la siembra de mejillones colocados en Puerto Nao. Corp. Autón. Reg. de los valles del Magdalena y el Sinú. Cartagena (Bol.). *Inf. Técnico*, 1: 1-5.
- . 1965b. Informe sobre los mejillones colocados en la ensenada entre Bocachica y Castillete. Corp. Autón. Reg. de los valles del Magdalena y el Sinú. Cartagena (Bol.). *Inf. Técnico*, 2: 1-4.
- . 1965c. Informe sobre los primeros trabajos con balsas experimentales de mejillón en aguas colombianas y resultados de los mismos (Ensenada Salada, Tierrabomba). Corp. Autón. Reg. de los valles del Magdalena y el Sinú. Cartagena (Bol.). *Inf. Técnico*, 3: 1-5.
- . 1965d. Informe sobre los primeros trabajos con balsas experimentales de mejillón en aguas colombianas y resultados de los mismos (El Laguito, Bocagrande). Corp. Autón. Reg. de los valles del Magdalena y el Sinú. Cartagena (Bol.). *Inf. Técnico*, 4: 1-5.
- . 1965e. Primer informe sobre el crecimiento del mejillón en las instalaciones montadas en la Bahía de Cartagena, en la Ensenada Salada y El Laguito, Bocagrande. Corp. Autón. Reg. de los valles del Magdalena y el Sinú. Cartagena (Bol.). *Inf. Técnico*, 5: 1-5.
- . 1965f. Informe sobre las observaciones y conclusiones sobre los mejillones. Corp. Autón. Reg. de los valles del Magdalena y el Sinú. Cartagena (Bol.). *Inf. Técnico*, 6: 1-5.
- Dahl, G.** 1958. Los peces del río Sinú. Informe preliminar. Publicación de la Secretaría de Agricultura y Ganadería de Córdoba. Impr. Deptal. Montería (Córdoba), 47 p.
- De Iongh, H. H. & J. C. J. Van Zon.** 1993. Assessment of impact of the introduction of exotic fish species in northeast Thailand. *Aquaculture and Fisheries Management*, 24 (3): 279-289.
- De la Roche-Cadavid, J. P., J. Gómez-León, R. Álvarez-León & S. Lamouroux-López.** 2001. Oportunidades de desarrollo de

- cultivos marinos en Colombia. Congreso Internacional Océanos II Milenio. Pontevedra (España) abril 24-27 de 2001.
- Diamond, J. M.** 1975. Assembly of species communities, pp. 342 - 444 In: Cody, M. L. & J. M. Diamond (eds.) Ecology and evolution of communities. Harvard University Press. Cambridge (Mass.) USA.
- Díaz-Merlano, J. M. & M. Puyana-Hegedus.** 1994. Moluscos del Caribe colombiano. Un catálogo ilustrado. COLCIENCIAS / Fundación Natura / INVEMAR. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia), 291 p. + Láminas I – LXXVIII.
- Díaz-Ercole, P.** 1985. Ecto y endoparásitos causantes de enfermedades infecto-contagiosas y su control en *Loricaria* sp. Linnaeus (1758) e *Hypostomus plecostomus* Linnaeus (1786). Tesis Profesional. Fac. Ciencias. Pontificia Univ. Javeriana, 104 p.
- Dossman, D.** 1976. Los ectoparásitos de los peces de agua dulce del Valle del Cauca. Rupicola Notas, 1 (1-2): 1-16.
- Drake, J. A.** 1983. Invasibility Lotka-Volterra interaction webs, pp. 83 - 90 In: DeAngelis, D., W. M. Post, & G. Sugihara (eds.) Current trends in food web theory. TM 5983. Oak Ridge National Laboratories, Oak Ridge (Tenn.) USA.
- . 1988. Models of community assembly and the structure of ecological landscapes, pp. 585 - 604 In: Gross, L., T. Hallan & S. Levin (eds.). Proc. of the Internal. Conference on Mathematical Ecology. World Press, Singapore (Thailandia).
- . 1990. Communities as assembled structures: do rules govern pattern? Trends in Ecology and Evolution, 5: 159-164.
- . 1991. Community assembly mechanics and the structure of an experimental species ensemble. American Naturalist, 137: 1-26.
- Drake, J. A., H. A. Mooney, F. Di Castri, R. H. Groves, F. J. Kruger, M. Rejmánek & M. Williamson.** 1989. Biological invasions. A global perspective. John Wiley & Sons. Chichester (U. K.).
- Eltou, C.** 1958. The ecology of invasions by animals and plants. Methuen, London (U. K.), 181 p.
- Erazo-Keller, A.** 1989. Introduction of exotic species for fish culture at the Llanos Orientales region, pp. 43-46 In: Mem. Workshop on Introduction of Hydrobiologic Species to Aquaculture.
- Escobar, J. G.** 1981. Métodos y posibilidades para desarrollar el cultivo de la ostra de mangle *Crassostrea rhizophorae* en el Golfo de Urabá. III Taller Acuicultura IFS. Montería (Córdoba) Colombia. Informe 10.
- Escobar-Nieves, A.** 1987. Distribución bacteriana y niveles de contaminación fecal presentes en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Tesis M. Sc. Fac. de Ciencias. Univ. Nal de Colombia, 266 p.
- Escobar-Nieves, A. & A. Celis-Rincón.** 1991. Cartilla guía para la repoblación y cultivo de la ostra de mangle *Crassostrea rhizophorae* en la Ciénaga Grande de Santa Marta. CORPOMAG. Santa Marta (Mag.). Contribución Técnica (2), 15 p.
- Eslava-Mocha, P. R. & C. A. Iregui-Castro.** 2000. Estudios sobre enfermedades branquiales de la cachama blanca *Piaractus brachyomus*. UNILLANOS-IIOC - Rev. Orinoquía, 4 (4): 123-149.
- Eslava-Mocha, P. R., N. Verjan & C. A. Iregui-Castro.** 2001. Plathelminthos (tremátodos) en cultivos de cachama blanca *Piaractus brachyomus*: aspectos clínicos y patológicos de tratamiento y control. UNILLANOS-IIOC - Rev. Orinoquía, 5 (1): 138-154.
- FAO,** 1981. Situación actual de la acuicultura en América Latina. 2ª Reunión Com. Pesca Continental para América Latina (COPEscal). Santo Domingo (Rep. Dominicana), dic. 2-4, 14 p.
- , 1984. Trabajos presentados al Taller Internacional Sobre Ecología y Manejo de Peces en Lagos y Embalses. Roma (Italia), 110 p.
- Flórez, P.** 2002. Informe sobre especies introducidas y trasplantadas en el Valle del Cauca. CVC. Buga (Valle), 6 p.
- Fergusson, M., M. R. G. Danzman & F. W. Allendorf.** 1989. Development success of hybrids between two taxa of salmonid fishes with moderate structural gene divergence. Can. J. Zool. 66: 1389-1395.
- Fernando, C. H.** 1991. Impacts of fish introductions in tropical Asia and America. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 48 (Suppl. 1): 24-32.
- Fryer, G.** 1959. The trophic interrelationships and ecology of some littoral communities of Lake Nyasa with special reference to the fishes, and a discussion of the evolution of a group of rock-frequenting Cichlidae. Proc. Zool. Soc. London, 132: 11-280.
- . 1990. Hypotheses versus reality: Ecology of biological invasions in the tropics, pp. 87-102 In: Ramakrishnan, P. S. (ed.) Ecology of biological invasions in the tropics. Int. J. Ecol. Environm. Sci. Spec.
- Fryer, G. & T. D. Iles.** 1972. The cichlid fishes of the Great Lakes of Africa: Their Biology and Evolution. Oliver and Boyd., Edinburgh (U. K.), 641 p.
- García-Vásquez, A., A. P. Shinn & C. Sommerville.** Re-description of the parasite *Gyrodactylus cichlidarum* Paperna 1968 (Monogenea, Gyrodactylidae) from Nile Tilapia *Oreochromis niloticus niloticus* L. (Cichlidae). Systematic Parasitology (en prensa).
- Grupo Acuicultura Marina.** 1982. Producción masiva de postlarvas del camarón gigante malasio *Macrobrachium rosenbergii* (De Man) y la influencia de la densidad poblacional. Proy. INDERENA / República de China Taiwan. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico.
- . 1983. Análisis de la interacción del camarón gigante malasio *Macrobrachium rosenbergii* (De Man) con relación a la especie nativa *Macrobrachium carcinus* (Weigman) en estanques en tierra. Proy. INDERENA / República de China Taiwan. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico.
- . 1985. Análisis de la interacción del camarón de agua dulce *Macrobrachium rosenbergii* (De Man), respecto a la especie nativa *Macrobrachium acanthurus* (Weigman, 1836). Proy. INDERENA / República de China Taiwan. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico, 21 p.
- . 1987a. Cultivo intensivo del camarón de agua dulce *Macrobrachium rosenbergii* (De Man). Proy. INDERENA / República de China Taiwan. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico, 25 p.
- . 1987b. Técnica de reproducción artificial del camarón de agua dulce *Macrobrachium rosenbergii* (De Man). Proy.

- INDERENA / República de China Taiwan. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico, 23 p.
- Grupo Colombo-Chino.** 1987. Técnica de reproducción del camarón de agua dulce *Macrobrachium rosenbergii*. Proy. INDERENA / República de China Taiwan. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico.
- . 1988. Cultivo intensivo del camarón de agua dulce *Macrobrachium rosenbergii* (De Man). Trianea (Act. Cient. Tecn. INDERENA), 1: 45-55.
- Goldson, S. L., C. B. Phillips & N. D. Barlow.** 1994. The value of parasitoids in biological control. New Zeland J. Zoology, 21 (1): 91-96.
- Guinard-Voelkl, E. M. & R. A. Morales-Morales.** 1990. Evaluación de ectoparásitos en peces ornamentales de exportación. Tesis Profesional. Fac. Medicina Veterinaria y Zootecnia. Univ. Nal. de Colombia, 107 p.
- Hernández-Camacho, J. I.** 1971. Aspectos sobre la introducción de especies exóticas. I Sem. Nal. de Piscicultura. Manizales (Caldas), enero 12-16.
- Hernández-Jiménez, C.** 1983. Estado actual de los bancos naturales de *Crassostrea rhizophorae* en el norte de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Tesis Profesional. Fac. de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, 167 p.
- Hernández-Jiménez, C. & G. Márquez-Calle.** 1987. Potencial cosechable de la ostra *Crassostrea rhizophorae* (Guilding), en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Acta Biol. Colombiana, 1 (3): 25-40.
- Hobbs, H. H. Jr.** 1989. An illustrated checklist of the American crayfishes (Decapoda: Astacidae, Cambaridae, and Parastacidae) Smith. Contrib. to Zoology, 480: 1-236.
- Hubbs, C. L.** 1955. Hybridization between fish species in nature. Syst. Zool., 4(1): 1-20.
- Hugueny, B., S. Camara, B. Samoura & M. Magassouba.** 1996. Applying an index of biotic integrity based on fish assemblages in a West African river. Hydrobiologia, 331: 71-78.
- Ituarte, C.** 1981. Primera noticia acerca de la introducción de pelecípodos asiáticos en el área norplatense (Molusco: Coriulidae). Neotrópico, 27 (77): 79-93.
- Jaramillo-Cobo, A.** 1997. El cultivo de la langosta australiana de agua dulce, como una alternativa para el desarrollo socioeconómico de la comunidad pesquera del alto Magdalena. Monografía Negociaciones Internacionales y Relaciones con el Medio Ambiente. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, s.p.
- Kohler, C. C. & W. R. Courtenay Jr.** 1986. American Fisheries Society position on introductions of aquatic species. Fisheries, 11: 53-56.
- Lachner, E. A., C. R., Robins & W. R. Courtenay Jr.** 1970. Exotic fishes and other aquatic organisms introduced into North America. Smithsonian Contrib. Zool., 59: 1-29.
- Laycock, G.** 1966. The alien animals. Natural History Press. Garden City. New York (USA), 240 p.
- Lemaitre, R. & R. Álvarez-León.** 1993. Crustáceos decápodos del Pacífico colombiano: lista de especies y consideraciones zoogeográficas. An. Inst. Inv. Mar.-Punta Betún (21): 33-76.
- Lodge, D. M.** 1993. Biological invasions: lessons for ecology. Trends in Ecology & Evolution, 8: 133-137.
- López-González, H.** 1987. Hallazgos de ectoparásitos en pescado comercializado en la plaza de Paloquemado de Bogotá. Tesis Profesional. Fac. Medicina Veterinaria y Zootecnia. Univ. Nal. de Colombia, 95 p.
- Martínez-Silva, L. E.** 1977. Mullet (*Mugil incilis*), and fresh water prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) polyculture in Colombia. Proc. World Mariculture Society, 8: 195-206.
- . 1984. Análisis sobre la conveniencia de introducción una especie de camarón de agua dulce *Macrobrachium rosenbergii* en aguas colombianas. INDERENA-Reg. Costa Atlántica. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico, sp.
- Martínez-Silva, L. E. & M. J. Torres-Virviescas.** 1993. Cultivo del camarón de agua dulce (*Macrobrachium rosenbergii*), Cap. VIII pp. 170-192 In: Rodríguez-Gómez, H., G. Polo-Romero & G. Salazar-Ariza (eds.). Fundamentos de acuicultura continental. INPA-MinAgricultura y Desarrollo Rural. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia). 1ª Edición. Serie de Fundamentos 1, 295 p.
- Martínez-Silva, L. E. & M. J. Torres-Virviescas.** 2001. Cultivo del camarón de agua dulce (*Macrobrachium rosenbergii*), Cap. XII pp. 265-282 In: Rodríguez-Gómez, H., P. Victoria-Daza & M. Carrillo-Avila (eds.). 2001. Fundamentos de acuicultura continental. INPA-MinAgricultura y Desarrollo Rural. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia). 2ª Edición. Serie de Fundamentos 1, 423 p.
- Martínez-Silva, L. E., D. Osorio-Dualiby & M. J. Torres-Virviescas.** 1989. Estudio comparativo del comportamiento y desarrollo en el cultivo de camarones marinos en el Pacífico y en el Caribe colombianos, con énfasis en *Penaeus stylirostris* (Stimpson), pp. 567-576 In: R. Jordán, R. Kelly, O. Mora, A. de Vildoso & N. Henríquez (eds.) Mem. Simp. Internal. Rec. Vivos y las Pesquerías del Pacífico Sudeste, CPPS / FAO / COI / PNUMA / CEE / CIID / PROCOPA. Viña del Mar, Chile, mayo 9-13 de 1988. CPPS-Rev. Pacífico Sur (Número Especial) 1989, 741 p.
- Medem, F.** 1965a. Informe sobre la comisión realizada a la Guajira. Corp. Autón. Reg. de los valles del Magdalena y el Sinú. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico, 1: 1-8.
- . 1965b. Informe sobre las observaciones y conclusiones de los mejillones. Corp. Autón. Reg. de los valles del Magdalena y el Sinú. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico, 2: 1-5.
- . 1966. Informe sobre el estado actual de los mejillones. Autón. Reg. de los valles del Magdalena y el Sinú. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico, 3: 1-7.
- Melendro-Galvis, E. A. & M. L. Torres-Frohlich.** 1985. Crustáceos decápodos de aguas someras de las Islas Vieja Providencia y Santa Catalina (13°20'N, 81°22'W) Colombia. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 568 p.
- Miller, R. R., J. D. Williams & J. E. Williams.** 1989. Extinctions of North American Fishes during the last century. Fisheries (Bethesda), 14 (6): 22-38.

- MinAmbiente.** 1996. Resolución 1186 de noviembre 1 de 1996. Por medio de la cual se autoriza la introducción al país de la langosta de agua dulce *Cherax quadricarinatus*, especie foránea, exótica, no nativa, o alienígena que será importada en estado larval y / o juvenil de los Estados Unidos de América. Bogotá D. C., 6 p.
- Moreno-Madriñán, M. J.** 1998. Estudios e interacción de la langosta australiana de agua dulce *Cherax quadricarinatus*, con especies nativas del plano inundable del río Magdalena. INPA-Regional Costa Atlántica, Centro de Investigaciones Acuícolas de Repelón. Santa Fe de Bogotá D. C. Inf. Técnico (1), 81 p.
- . 2000. Estudio de impacto ambiental para la introducción de la langosta australiana de agua dulce *Cherax quadricarinatus*. INPA-Regional Costa Atlántica, Centro de Investigaciones Acuícolas de Repelón. Santa Fe de Bogotá D. C. Inf. Técnico (2), 52 p.
- . 2001. Estudio de impacto ambiental para la introducción de la langosta australiana *Cherax quadricarinatus*. INPA-Reg. Costa Atlántica. Repelón (Atl.). Inf. Final, 50 p.
- Moyle, P. B.** 1976. Inland fishes of California. University of California Press, Berkeley Ca.) USA, 405 p.
- Moyle, P. B. & R. L. Leidy.** 1992. Loss of biodiversity in aquatic ecosystems: evidence from fish faunas, pp. 127- 127 In: Fiedler, P. I. & S. K. Jain (eds). In: Conservation biology: The theory and practice of nature conservation, preservation and management. Chapman and Hall, New York (NY) USA.
- Newball, S. de & M. Carriker.** 1983. Systematic relationship of the oysters *Crassostrea rhizophorae* and *C. virginica*: A comparative ultrastructural study of the valves. Amer. Malacol. Bull., 1: 35-42.
- Ojasti, J.** 2001. Especies exóticas invasoras. Estrategia regional de biodiversidad para los Países del Trópico Andino. Convenio de Cooperación Técnica ATN/JF-5887-RG CAN-BID. Caracas (Venezuela), 63 p.
- OTA.** 1993. Harmful non - indigenous species in the United States. U. S. Government Printing Office, Washington D. C. (USA).
- Pedini, M.** 1977. Declaración de efecto ambiental para la introducción de *Macrobrachium rosenbergii*. Proy. INDERENA-FAO para el Desarrollo de la Pesca Continental en Colombia FI: DP/COL/71/551. Bogotá D. E. (Colombia): 1-8.
- Pedraza-Alfonso, R.** 1979. Evaluación del potencial y distribución del recurso ostrícola de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Tesis Profesional. Fac. de Biología Marina. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 45 p.
- Peña-Guau, J. F.** 1971. Transplante de las ostras (*Crassostrea rhizophorae*) de la Ciénaga de Camarones para la recuperación de los bancos naturales en la Ciénaga Grande de Santa Marta. INDERENA-Reg. Magdalena. Santa Marta (Mag.). Inf. Técnico.
- Pérez-Carmona, L.** 1977. Observaciones ecológicas y ensayos de cultivo de la ostra de mangle (*Crassostrea rhizophorae* Guildin) en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Tesis Profesional. Fac. de Ciencias. Univ. de Antioquia.
- Pérez-García, M. E. & C. H. Victoria-Rueda.** 1977. Diversidad y macrofauna de la comunidad de las raíces sumergidas del mangle rojo en la Bahía de Cartagena y la Ciénaga de los Vásquez. Tesis Profesional. Fac. Biología Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 113 p.
- Pinzón, E.** 1978. Estudios morfológicos, biológicos y taxonómicos de la ostra *Crassostrea rhizophorae* Guilding, en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Tesis Profesional. Fac. de Ciencias. Pontificia Univ. Javeriana.
- Prahl, H. von.** 1980. Zur Biologie der Blaven Gornele *Penaeus (L.) stylirostris* Stimpson, 1879 und deren zucht in Teichanlagen. Diss. Dr. rer. nat. Univ. Kasel- Inst. Max Plank, 128p.
- . 1982. Cultivo de *Penaeus vannamei* en jaulas, una alternativa para el pequeño acuicultor. Rev. Lat-Amer. de Acuicultura, 14: 46-50.
- Prahl, H. von & M. Gardeazábal.** 1977. Descripción de las larvas de *Penaeus stylirostris* Stimpson. An. Inst. Inv. Mar.- Punta de Betín, 9:157-172.
- Prahl, H. von & H. Schiller.** 1980. La cría del camarón en Colombia. CONTEC / GMBH / PROEXPO. Bogotá D. E. (Colombia), 85p.
- Prahl, H. von & R. Abadi.** 1983. Cultivo experimental de *Macrobrachium rosenbergii*, en el Valle del Cauca. Proy. Universidad del Valle. Cali (Valle), 97 p.
- Prahl, H. von M. Gardeazábal & R. Arreaza.** 1978. Observaciones sobre la biología del camarón azul *Penaeus stylirostris* Stimpson. Cespedesia, 7 (25-26): 25-45.
- Prahl, H. von, W. Renjifo, A. Arango, J. J. Ruíz, A. Palacios & L. Barbosa.** 1987. Oferta de postlarvas de camarones marinos del género *Penaeus* (*P. vannamei*, *P. stylirostris* y *P. occidentalis*) en áreas específicas del Pacífico colombiano. CENIPACÍFICO. Cali (Valle) Colombia. Inf. Final, 207 p.
- Ramírez-Castillo, M. & A. Salazar.** 1977. Estudio preliminar sobre el cultivo artificial del ostión del mangle *Crassostrea rhizophorae* (Guilding, 1828), en la Bahía de Cispatá, Córdoba. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 151 p.
- Ramírez-Lesmes, R.** 2003. Observaciones de crecimiento de las tilapias nilóticas (*Oreochromis niloticus*) de la línea chitralada en Colombia. Rev. Apropesca, 11 (25): 19-22.
- Reyes de Castillo, R. & N. H. Campos-Campos.** 1992. Macroinvertebrados colonizadores de raíces de *Rhizophora mangle* en la Bahía de Chengue, Caribe colombiano. An. Inst. Invest. Mar. Punta de Betín, 21: 101-116.
- Rivera, L. F.** 1978. Estudio preliminar de la ostra *Crassostrea rhizophorae* (Guildin) y aspectos de la dinámica de su población en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Tesis Profesional. Fac. Biología Marina. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 132 p.
- Rocha de Campos, M.** 2005. *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Girard, 1852) (Crustacea: Decapoda: Cambaridae). Una langostilla no nativa de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc., 29 (111): 295-302.
- Rodríguez-Gómez, H.** 1980. Peces exóticos introducidos a Colombia, pp. 72 In: Álvarez-León, R., C. N. Beltrán-Galeano, C. O. Mora-Lara & C. Vásquez-Díaz (eds.) Mem. Resúmenes III Simp. Lat.-Amer. y IV Sem. Colombiano de Acuicultura, ALA /

- ACUICOL. Cartagena (Bol.) Colombia, agosto 25-30, Resumen 089.
- Rodríguez-Gómez, H.** 1981. Parásitos piscícolas, en aguas continentales de Colombia. INDERENA-Subgerencia de Pesca y Fauna Terrestre. Bogotá D. E. (Colombia), 35 p.
- Rojas-Pérez, R. & E. González.** 1998. Evaluación ambiental y dispersión del camarón rojo (*Procambarus clarkii* Girard, 1852) en el área de influencia del Zanjón Romero, Municipio de Palmira, Departamento del Valle del Cauca. Corp. Autón. Reg. del Valle del Cauca. Cali (Valle). Inf. Técnico, s.p.
- Romero-Trigueros, L. E.** 1988. Reproducción y desarrollo post-larval del camarón de río *Procambarus clarkii* (Baird, 1852). Tesis Profesional. Fac. de Ciencias. Univ. del Valle, 86 p.
- Romero-Trigueros, L. E. & H. von Prahl.** 1988. El camarón de río, *Procambarus clarkii*, una especie promisorio? COLCIENCIAS / CIID-Bol. Red de Acuicultura, 2 (1 y 2): 11-15.
- Ruiz, G.** 1997. The aliens among U. S. Chesapeake Bay. Program SERC. Internet. Aliens, 1-3.
- Sanabria-Tamayo, C. M. & R. A. Useche-López.** 1995. Determinación de ecto y endoparásitos en híbridos de tilapia roja. Tesis Profesional. Fac. Medicina Veterinaria y Zootecnia. Univ. Nal. de Colombia.
- Schwartz, F. J.** 1972. World literature of fish hybrids with analysis by family, species and hybrids. Gulf Coast Res. Lab. Mus. Publ. (3): 1-328.
- Squires, H. J. & G. Riveros.** 1971. Algunos aspectos de la biología del ostión (*Crassostrea rhizophorae*) y su producción potencial en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Proy. INDERENA / FAO. Para el Desarrollo de la Pesca Marítima en Colombia. Estudios e Investigaciones, 6: 1-61.
- Svardson, G.** 1979. Speciation of Scandinavian Coregonus. Rep. Inst. Freshwater Res. Drottningholm. (57): 1-95.
- Trujillo-Arcila, C. A.** 1997. Estructura de la taxocenosis Crustácea asociada a fondos blandos en la ensenada de Pozos Colorados - Santa Marta - Caribe colombiano. Tesis Profesional. Fac. Biología Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 97 p.
- Victoria-Daza, P., L. M. Arias-Reyes & H. Rodríguez-Gómez.** 1994. Evaluación preliminar del cultivo de ostra *Crassostrea rhizophorae* en el estuario de la Bahía de Cispata, Ciénaga de Mestizo y Pepino, San Antero, Córdoba. Mem. IX Sem. Nal. de Ciencias y Tecnologías del Mar y I Congr. Lat.-Amer. en Ciencias del Mar, CCO / EAFIT / COLCIENCIAS. Medellín (Ant.) Colombia, nov. 21-25.
- Wedler, E.** 1980. Experimental spat collecting and growing of the oyster *Crassostrea rhizophorae* Guilding, in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Aquaculture, 21: 251-259.
- . 1982. El cultivo de la ostra *Crassostrea rhizophorae* (Guilding) en el Caribe colombiano. Revista Ingeniería Pesquera. Universidad Tecnológica del Magdalena, 3 (1 y 2): 1-76.
- . 1994. Condiciones para el cultivo comercial de la ostra *Crassostrea rhizophorae* en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Mem. 1ª Reunión Grupo de Trabajo sobre Bivalvos. INPA, Montería (Córdoba).
- Wedler, E., L. Pérez-Carmona, J. Palacio-Baena & E. Pinzón.** 1978. Ostricultura en la Ciénaga Grande de Santa Marta. I Etapa. Proy. 30003-1-01-76 INVEMAR / COLCIENCIAS. Santa Marta (Mag). Inf. Final, 64 p.
- Welcomme, R. L.** 1970. Studies on the effects of abnormally high waters levels on the ecology of fish in certain shallow regions of lake Victoria. J. Zool. Lond., 160: 405-436.
- . 1981. Registro de transferencias internacionales de especies de peces de aguas continentales. FAO. Doc. Tec. Pesca, 213: 1-20.
- . 1988. International introductions of island aquatic species. FAO Fish. Tec. Pap., 294: 1-318.
- . 1989. Review of the present state of knowledge of fish stocks and fisheries in African rivers. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 106: 515-532.
- Wicksten, M. K.** 1989. *Hyppolite zoostericola* (Crustacea: Decapoda) in the eastern Pacific Ocean. Proc. Biol. Soc. Nat. Wash., 102 (3): 644-645.
- Williamson, M. & A. Fitter.** 1996. The varying success of invaders. Ecology, 77 (6): 1661-1666.

Recibido: junio 20 de 2007

Aceptado para su publicación: diciembre 17 de 2007